



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN
DE MUROS DE MAMPOSTERÍA**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Diana Cristina Ramírez Quintero

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres, Lupita y Rodrigo, a mi hermana Paulina, y a Abu, por su amor incondicional

A la memoria de los que ya no están físicamente pero siempre están en el corazón:

Mis abuelitos Rafael y Trini

Mamá Ros y Mamá Teresa

Tío Cris

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por ser mi segunda casa, por darme las herramientas necesarias para crecer y formarme como persona y como profesionista.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado para la realización de mis actividades académicas.

Al Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro, por su mentoría, sus enseñanzas, su paciencia, por ser para mí un ejemplo de que la ingeniería también es humanista y de que hay que apoyar a la sociedad a través de nuestro conocimiento y servicio.

Al M.I. Roberto Durán Hernández, por impulsar mi gusto por las estructuras a través de sus clases y por invitarme a participar en el proyecto de rehabilitación de escuelas en el Instituto de Ingeniería, después de los sismos del 2017.

A mis sinodales, la M.I. Adriana Cafaggi, al Dr. Gerardo Rodríguez, el M.I. Octavio García y el Ing. Heriberto Esquivel, por tomarse el tiempo de leer mi trabajo y de brindarme sus observaciones y sugerencias.

A mi familia, por su amor, por creer en mí y ser mi red de apoyo. A mi prima Lety, por su cariño, su compañía y su cercanía desde que llegué a la Ciudad de México.

A la Dra. Blanca E. Oseguera Fernández, por su guía, su consejo y por su invaluable amistad. Gracias por ayudarme a no quitar los ojos de la meta.

A Luis Olivares y a Maggy Orozco, por su amistad incondicional, por apoyarme en mis decisiones y acompañarme en cada paso que doy.

A los amigos que la Facultad de Ingeniería me dio, por ayudarme a disfrutar de mi estancia en la universidad, y por haber sumado a mi vida en muchas formas.

A mis compañeros del grupo de investigación, por los gratos momentos compartidos y por motivarme a seguir en el camino de la ingeniería estructural.

Al Dr. Julián Carrillo, el Dr. Héctor Guerrero y el M.I. Cyprien Lubin por su disponibilidad para facilitarme literatura de apoyo para la realización de esta tesis.

Al Arq. Sebastián Martínez Negrete, por el apoyo brindado en la elaboración de figuras para este trabajo.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una descripción y análisis del comportamiento de diversas técnicas de rehabilitación de muros de mampostería. Las técnicas incluidas en este trabajo son: el encamisado mediante malla de alambre soldado y mortero o concreto, el encamisado mediante placas y bandas de acero, el encamisado con bandas de polipropileno, el uso de polímeros reforzados con fibras (PRF), los textiles estructurales y los morteros reforzados con fibras. Para estudiar los procedimientos de análisis, diseño y construcción de las técnicas anteriormente mencionadas, se llevó a cabo la elaboración de una base de datos con la información de 94 especímenes conformados por muros de mampostería ensayados bajo distintas condiciones de análisis.

Con base en las curvas de comportamiento asociadas a cada espécimen de la base de datos, se conformaron distintos modelos de comportamiento bajo el enfoque de diseño por desempeño. Para la elaboración de las curvas de comportamiento se tomaron en consideración distintos parámetros generales, entre los que se encuentran la modalidad de la mampostería (mampostería simple, confinada, reforzada interiormente y muros diafragma), tipo de pieza empleada, relación de aspecto y presencia de daño previo.

Se presentan conclusiones y recomendaciones que sugieren la incorporación de las técnicas estudiadas en la normatividad futura.

ABSTRACT

A description and analysis of the behavior of different retrofit techniques for masonry walls is presented. The techniques included are: jacketing with welded wire mesh, jacketing using steel plates and steel bands, jacketing with polypropylene bands, the use of fiber-reinforced polymers (FRP), jacketing with textile fibers, and jacketing with fiber-reinforced mortars. To study the analysis, design and construction procedures of each technique, a database was developed with the information of 94 specimens tested under different analysis conditions.

Based on the behavior curves associated with each specimen in the database, different backbone curves were proposed under a performance-based seismic design approach. For the development of the backbone curves, different general parameters were considered, including masonry type (unreinforced masonry, confined masonry, reinforced masonry, and diaphragm masonry walls), type of units used in the specimen's construction, the height-to-length aspect ratio (H/L) and the presence of previous damage to the walls.

Conclusions and recommendations are presented that suggest the incorporation of the techniques studied in future regulations.

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	9
ANTECEDENTES	9
OBJETIVO.....	9
CAPÍTULO 1 COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA 10	
1.1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 ESTRUCTURACIÓN DE SISTEMAS A BASE DE MAMPOSTERÍA	10
1.2.1 Mampostería simple	11
1.2.2 Mampostería confinada.....	11
1.2.3 Mampostería reforzada interiormente.....	13
1.2.4 Muros diafragma	14
1.3 MODOS DE COMPORTAMIENTO EN ESTRUCTURAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA	15
1.4 DAÑOS OBSERVADOS DURANTE EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017 EN ESTRUCTURAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LA CIUDAD DE MÉXICO	20
CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN POSTSÍSMICA Y ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES CON MUROS DE MAMPOSTERÍA	26
2.1 INTRODUCCIÓN.....	26
2.2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN POSTSÍSMICA APLICADA A ESTRUCTURAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA.....	26
2.2.1 Método de Evaluación Rápida (MER)	27
2.2.2 Método de Evaluación Intermedia (MEI)	29
2.2.3 Método de Evaluación Profunda (MEP).....	33
CAPÍTULO 3 TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN DE MUROS DE MAMPOSTERÍA	37
3.1 INTRODUCCIÓN.....	37
3.2 REPARACIÓN DE GRIETAS.....	37
3.2.1 Inyección.....	37
3.2.2 Rajuelo.....	39
3.3 REPARACIÓN Y/O ADICIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO	40
3.4 ENCAMISADO CON MALLA DE ALAMBRE SOLDADO	43
3.4.1 Descripción de la técnica	43
3.4.2 Revisión de la literatura.....	44
3.4.3 Metodología de implantación	57

3.5	ENCAMISADO CON BANDAS Y PLACAS	66
3.5.1	Bandas y placas de acero	66
3.5.2	Bandas de polipropileno	73
3.5.3	Polímeros reforzados con fibras (PRF)	78
3.5.4	Textiles estructurales	87
3.6	ENCAMISADO CON MORTEROS ESPECIALES CON FIBRAS	92
3.6.1	Clasificación.....	92
3.6.2	Descripción de la técnica	93
3.6.3	Revisión de la literatura.....	93
3.6.4	Metodología de implantación	96
3.7	Análisis comparativo de costos de rehabilitación de muros de mampostería.....	98
CAPÍTULO 4 BASE DE DATOS DE ENSAYES EXPERIMENTALES EN MUROS DE MAMPOSTERÍA 111		
4.1	INTRODUCCIÓN.....	111
4.2	DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	111
4.3	CAMPOS ESPECÍFICOS DE LA BASE DE DATOS.....	111
4.3.1	Información general.....	112
4.3.2	Características estructurales generales	112
4.3.3	Sistema estructural.....	113
4.3.4	Daño previo	114
4.3.5	Reparación de grietas	115
4.3.6	Reparación / adición de elementos de confinamiento	115
4.3.7	Rehabilitación	115
4.3.8	Propiedades mecánicas de la mampostería	119
4.3.9	Desarrollo experimental.....	120
4.3.10	Resultados teóricos	120
4.3.11	Resultados experimentales	120
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA BASE DE DATOS	122
4.4.1	Análisis de las características estructurales generales de los especímenes 122	
4.4.2	Análisis de las técnicas de rehabilitación.....	125
4.4.3	Análisis de la respuesta estructural de los especímenes	133
CAPÍTULO 5 MODELOS PARA DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO 142		
5.1	INTRODUCCIÓN.....	142
5.2	DEFINICIÓN DE PARÁMETROS.....	142

5.2.1	Parámetros generales	142
5.2.2	Parámetros específicos.....	143
5.2.3	Exclusión de datos para el análisis.....	144
5.3	CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A FUERZA CORTANTE	145
5.3.1	Fuerza cortante resistida por la mampostería	145
5.3.2	Fuerza cortante resistida por el encamisado con malla de alambre soldado 148	
5.3.3	Fuerza cortante resistida por el encamisado con bandas y placas de acero 149	
5.3.4	Fuerza cortante resistida por el encamisado con bandas de polipropileno.150	
5.3.5	Fuerza cortante resistida por el encamisado con bandas de polímeros reforzados con fibras (PRF).....	151
5.3.6	Fuerza cortante resistida por los encamisados textiles	157
5.3.7	Fuerza cortante resistida por los encamisados con morteros reforzados con fibras 159	
5.4	CURVAS DE COMPORTAMIENTO	159
5.4.1	Modelos de comportamiento para encamisado mediante malla de alambre soldado 161	
5.4.2	Modelos de comportamiento para encamisado mediante placas de acero 170	
5.4.3	Modelos de comportamiento para encamisados mediante bandas de polipropileno.....	175
5.4.4	Modelos de comportamiento para encamisados mediante bandas de PRF176	
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES.....		178
6.1	INTRODUCCIÓN.....	178
6.2	BASE DE DATOS.....	178
6.3	MODELOS PARA DISEÑO	179
6.4	RECOMENDACIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS	182
APÉNDICE A BASE DE DATOS		184
A.1	MALLA DE ALAMBRE SOLDADO.....	184
A.2	BANDAS Y PLACAS DE ACERO	201
A.3	BANDAS DE POLIPROPILENO	210
A.4	BANDAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA (PRF).....	214
A.5	TEXTILES ESTRUCTURALES.....	221
A.6	MORTEROS REFORZADOS CON FIBRAS.....	223
APÉNDICE B CURVAS DE COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO DE LOS ESPECÍMENES INCLUIDOS EN LA BASE DE DATOS		225

APÉNDICE C CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES INCLUIDOS EN LA BASE DE DATOS	239
APÉNDICE D EJEMPLO DE DISEÑO: REHABILITACIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE MAMPOSTERÍA SIMPLE MEDIANTE ENCAMISADO CON MALLA DE ALAMBRE SOLDADO Y MORTERO	252
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	325

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

La mampostería ha sido el material por excelencia que se ha usado para la construcción en México a lo largo de los años debido a distintos factores, entre ellos, factores económicos al ser la mampostería un material de construcción de menor costo a comparación del concreto y el acero, además de la facilidad y rapidez que implica construir con este material. La mampostería comenzó a utilizarse fuertemente en México desde la década de 1940 (Brzev y Pérez, 2014), tanto que, hasta el año de 2003, aproximadamente el 70% de las construcciones en México se identificaron como hechas a base de mampostería.

Es importante considerar que la mampostería, a pesar de contar con una normatividad específica para su análisis, diseño y construcción, resulta ser uno de los materiales más utilizados para la autoconstrucción en México, lo que lleva a suponer que, al no seguir procedimientos adecuados en su construcción, o si se incurre en las malas prácticas constructivas la seguridad estructural pueda estar comprometida.

En la actualidad, la normatividad mexicana expresa, de forma somera, las distintas opciones que se tienen para llevar a cabo la rehabilitación de muros de mampostería. No se cuenta con información precisa respecto al detallado de cada una de estas técnicas ni de su comportamiento estructural, con excepción de la técnica de rehabilitación mediante malla de alambre soldado y recubrimiento con mortero y concreto, que es la única que se aborda a mayor nivel de detalle. Por lo anterior, surgió la necesidad de investigar los distintos parámetros que controlan el comportamiento de otras técnicas de rehabilitación de muros de mampostería con objeto de considerarlos en la normatividad futura.

OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es presentar algunas técnicas de rehabilitación aplicables a muros de mampostería. El fin último es contribuir a la documentación de diversas técnicas de rehabilitación en estructuras con muros de mampostería para su posterior aplicación en México.

De manera particular, los objetivos principales de este trabajo son:

- Hacer un análisis de la literatura existente respecto a programas experimentales empleando diversas técnicas de rehabilitación en muros de mampostería.
- Elaborar una base de datos con las características y resultados de los programas experimentales previamente estudiados.
- Utilizar los resultados de los ensayos para desarrollar modelos de comportamiento basados en el desempeño de la respuesta no lineal de los muros de mampostería rehabilitados con distintas técnicas de rehabilitación.
- Comparar el comportamiento obtenido para cada técnica, con la finalidad de conocer la aplicabilidad de los modelos desarrollados.

CAPÍTULO 1

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una descripción general de los distintos tipos de sistemas estructurales compuestos por muros de mampostería, como son la mampostería simple o no reforzada, la mampostería confinada, la mampostería reforzada interiormente, la mampostería postensada (como caso particular de la reforzada interiormente) y los muros diafragma. Posteriormente, se abordan los distintos modos de comportamiento asociados a cada una de las estructuraciones anteriormente mencionadas. Por último, se hace un análisis de los daños observados en estructuras de mampostería durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, a través de un proyecto colaborativo entre el Instituto de Ingeniería de la UNAM y la Universidad de Texas en Austin, mediante el programa ConTex.

1.2 ESTRUCTURACIÓN DE SISTEMAS A BASE DE MAMPOSTERÍA

En México, la mampostería ha mostrado ser, a lo largo de los años, el material más empleado para la construcción de diversas estructuras, ya sean de vivienda, escolares, industriales e incluso en edificios cada vez más altos, esto debido en gran parte a su buen desempeño estructural y a su asequibilidad, considerándose un material económico y de fácil manejo.

Cada vez es más notoria la evolución de tecnologías en torno a los diversos materiales, técnicas y sistemas de construcción. Sin embargo, para el caso de la mampostería, el factor humano sigue siendo muy importante, ya que la colocación y pegado de piezas de mampostería se hace (en la mayoría de las ocasiones) a mano.

Existe, desde el punto de vista de su función estructural, la siguiente clasificación de muros: muros de carga, muros divisorios o no cargadores y muros diafragma (San Bartolomé, 1994):

- Los muros de carga son empleados como elementos estructurales, soportando cargas verticales (incluido su propio peso) y horizontales, contenidas tanto en su plano como perpendiculares a él. Dentro de esta clasificación se ubican los muros a base de mampostería simple, mampostería confinada y mampostería reforzada interiormente.
- Los muros no cargadores son aquellos en los que se considera un nulo soporte ante cargas verticales. Estos muros son básicamente diseñados para solicitaciones perpendiculares a su plano (sismo o viento, por ejemplo). Dentro de esta clasificación entran los muros divisorios, pretilas, parapetos y bardas.
- Finalmente, los muros diafragma son los que se encuentran contenidos dentro de un sistema a base de marcos, ya sea de concreto reforzado o acero estructural, y

tienen la función de resistir fuerzas horizontales e incrementar la rigidez lateral. Este tipo se aborda de manera más profunda en el inciso 1.2.3 de este trabajo.

1.2.1 Mampostería simple

En México, la construcción de estructuras de mampostería simple (no reforzada) ha sido, con los años, una práctica común en algunas regiones, teniendo mayor incidencia en zonas cercanas a fuentes sísmicas, siguiendo la influencia de la autoconstrucción en el país. Ésta es una práctica que se ha buscado reducir a través del reforzamiento de estructuras existentes para aumentar su capacidad ante cargas laterales y cumplir con los niveles de seguridad adecuados. Incluso, en la versión 2017 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-Mampostería), se prohíbe el uso de mampostería simple o que no cumpla con ser confinada o reforzada interiormente.

La importancia del estudio de las estructuras de mampostería simple se basa en la susceptibilidad de estas estructuras de dañarse ante eventos sísmicos, ya que, al no contar con acero de refuerzo y conexiones adecuadas entre los muros y el sistema de piso, existe una alta probabilidad de presentar daños severos después de un sismo, debido a fallas en el plano y/o el total volteo de los muros.

En la construcción de estructuras de mampostería simple, el material más empleado es el tabique de arcilla macizo de fabricación artesanal. También es común observar en estas estructuras tabiques de arcilla o concreto huecos, tabiques de concreto macizos o incluso piedra y adobe. En la figura 1 se muestra la construcción de una estructura de mampostería simple; en ella se puede observar la ausencia de elementos de confinamiento exterior e interior.



Figura 1. Construcción de una estructura de mampostería simple (Mahajan, 2016).

1.2.2 Mampostería confinada

Hasta la fecha, los sistemas a base de mampostería confinada siguen siendo la solución más empleada en México para la construcción de estructuras de diversos usos (principalmente para vivienda), considerando las condiciones sociales, económicas y geográficas de las distintas regiones del país. Esto debido a que se ha observado que, las

edificaciones de mampostería confinada, construidas de acuerdo con la normatividad, han mostrado, en general, un desempeño bueno ante acciones sísmicas. (Tena y Del Valle, 1996).

En este tipo de estructuración, la mampostería se encuentra “rodeada” o confinada, por elementos de concreto reforzado de sección transversal relativamente pequeña. En México, se denominan castillos y dalas o cerramientos, a los elementos de confinamiento en sentido vertical y horizontal, respectivamente. En la figura 2 se muestra un ejemplo de configuración básica de una estructura de mampostería confinada.

Las funciones de los elementos de confinamiento en los muros de mampostería son las siguientes:

- Dar continuidad a los muros entre sí y a su vez con los sistemas de entrepiso (losas).
- Brindar mayor capacidad de resistencia, de deformación y de disipación de energía ante fuerzas laterales reversibles, como las inducidas por sismo.

En términos de los materiales empleados para la construcción de estos muros, es posible emplear piezas macizas o piezas huecas. Es importante considerar que por lo general, las piezas macizas han mostrado tener un comportamiento más estable, con mayor mantenimiento de la resistencia y capacidad de deformación inelástica ante la acción de fuerzas laterales cíclicas reversibles, mientras que las piezas huecas, a pesar de exhibir una mayor resistencia inicial (debido a los procesos de calidad con los que son fabricadas), muestran una caída notable en la capacidad de resistencia una vez que los muros alcanzan su resistencia.

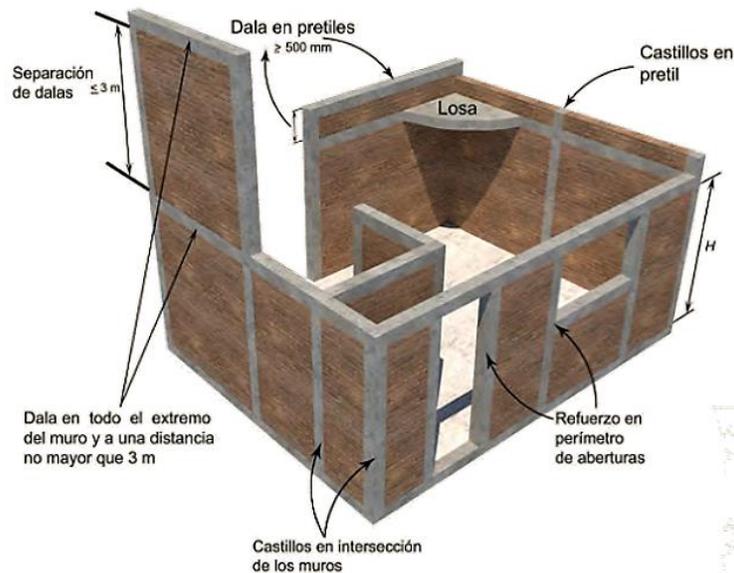


Figura 2. Configuración básica de una estructura de mampostería confinada (INIFED,2021b).

1.2.3 Mampostería reforzada interiormente

En los muros de mampostería reforzados interiormente el acero de refuerzo se encuentra distribuido dentro de las piezas de mampostería, tanto en dirección vertical como en horizontal. Se colocan barras de acero dentro de las celdas de las piezas de mampostería (de arcilla o concreto) rellenas de manera total o parcial por concreto y a lo largo de las juntas entre hiladas, respectivamente. En la figura 3 se muestra la distribución de acero de refuerzo horizontal y vertical en un muro de mampostería reforzada interiormente.



Figura 3. Acero de refuerzo en un muro de mampostería reforzada interiormente (Flores, 2007).

En México, la mampostería reforzada interiormente no ha sido tan empleada como la mampostería confinada, debido a que se considera que no se han logrado implantar prácticas correctas para su ejecución (Meli, 1994). En otros países como Estados Unidos, Canadá, Nueva Zelanda y Japón la mampostería reforzada interiormente representa la opción más utilizada.

1.2.3.1 Mampostería presforzada (postensada)

Como caso particular de la mampostería reforzada interiormente se encuentra la mampostería postensada. Ha sido un sistema muy poco empleado en México, debido a que su construcción es costosa y de difícil aplicación y es necesario contar con mano de obra especializada para poder llevar a cabo la construcción de estos sistemas. En estos tipos de muros una serie de cables o barras son anclados en la base de los muros. Posteriormente se colocan las hiladas de mampostería y se levanta el muro en su totalidad para después colocar el mortero o *grout* inmediatamente antes de realizar el tensado de los cables o barras.

Diversas investigaciones han mostrado que la mampostería postensada es aproximadamente un 11% más costosa que la mampostería confinada y un 3% más económica frente al sistema de marcos de concreto reforzado (Wight, 2007). En la figura 4 se muestra un ejemplo del empleo de mampostería postensada en un sistema de piso.



Figura 4. Sistema de mampostería postensada (Bonett, 2014).

1.2.4 Muros diafragma

Los muros diafragma, de acuerdo con las NTC-Mampostería (2017), son los que se encuentran rodeados por las vigas y columnas de un marco estructural al que proporcionan rigidez y resistencia ante cargas laterales. Estos muros pueden ser de mampostería simple, confinada o reforzada interiormente. Éstos se han considerado, en lo general, como muros de relleno dentro de las crujiás de marcos de concreto reforzado o acero, donde los marcos son los elementos diseñados especialmente para resistir las cargas gravitacionales, mientras que, para el caso de las cargas laterales, en ocasiones los muros diafragma son tomados en cuenta para aportar resistencia y rigidez lateral a la estructura.

Los muros diafragma pueden estar contruidos de concreto reforzado o de mampostería, siendo posible, para el segundo caso, el empleo de piezas de mampostería macizas o huecas de arcilla o concreto. En la figura 5 se muestra la configuración de dos estructuras de uso escolar, una a base de marcos de concreto (izquierda) y otra con marcos de acero (derecha), con presencia de muros diafragma.



Figura 5. Edificios escolares a base de marcos de concreto (izq.) y de acero (der.) con muros diafragma de mampostería (INIFED, 2017).

1.3 MODOS DE COMPORTAMIENTO EN ESTRUCTURAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA

El desempeño de las estructuras de mampostería ante la acción de distintas cargas está definido por un comportamiento generalmente frágil, con una caída rápida de su resistencia y rigidez cuando no posee refuerzo.

En estructuras a base de muros de mampostería, los desplazamientos laterales generados por las acciones sísmicas generan fuerzas axiales y de cortante, además de momento. La combinación de esfuerzos de tensión y corte son la causa principal de daño observado en dichas estructuras.

En términos generales, se pueden observar cuatro tipos de agrietamiento en muros de mampostería:

- a) Inclinado. Debido a esfuerzos de tensión diagonal en las piezas.
- b) En forma de escalera, siguiendo las juntas de mortero. Generado por esfuerzos de corte cuando el mortero es más débil que las piezas.
- c) Horizontal en la base y vertical en las intersecciones con muros transversales, originado por la flexión fuera del plano del muro y el volteo del elemento.
- d) Horizontal en la base del muro, con agrietamiento escalonado característico de una falla por flexión o fuerza cortante por deslizamiento.

En zonas de alto peligro sísmico, el modo de falla más común asociado a estructuras a base de muros de carga de mampostería es por tensión diagonal o fuerza cortante (Otani, 1994).

En estructuras de mampostería simple, el comportamiento difiere de la mampostería confinada. La mampostería cuenta con una baja capacidad para resistir esfuerzos de tensión al no contar con la presencia de elementos de confinamiento que aporten a la resistencia de fuerzas laterales; las estructuras de este tipo muestran un comportamiento frágil. Una vez que es alcanzada la resistencia, la caída de la resistencia y rigidez es inminente, generando una falla generalmente súbita en sus elementos y componentes.

Para el caso de las estructuras de mampostería confinada, se ha realizado una mayor investigación experimental con la finalidad de estudiar el comportamiento de éstas ante eventos sísmicos. De diversos estudios se ha observado que, inicialmente, este tipo de estructuras muestran un comportamiento elástico-lineal ante distorsiones inferiores a las que generan el primer agrietamiento inclinado. Una vez sucedido este agrietamiento se acelera la caída de la rigidez con la presencia marcada de un agrietamiento más generalizado que sigue la dirección de las diagonales de los muros, generando un par de bloques triangulares.

Para resistir la fuerza horizontal en los muros se considera la aportación a la resistencia por parte de los castillos ya que generan fuerzas cortantes concentradas en sus extremos. También se considera la aportación de la mampostería debido al efecto de fricción y trabazón entre la superficie de las grietas en las piezas. Una vez que las grietas de los muros se extienden a los extremos de los castillos, el muro llega a su resistencia. Después de alcanzar la resistencia, la estructura experimenta grandes desplazamientos junto a una notable degradación de la resistencia y la rigidez.

El buen desempeño de una estructura a base de muros de mampostería confinada se puede ver afectado por un inadecuado confinamiento, aberturas sin confinar, errores y defectos constructivos, mala calidad en los materiales (piezas y mortero), contracción de las juntas de mortero, ausencia de anclaje (o insuficiencia) entre el muro y los elementos de confinamiento, entre otros (Alcocer, 1997).

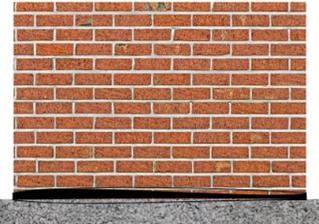
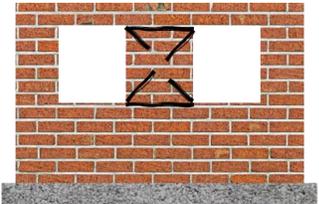
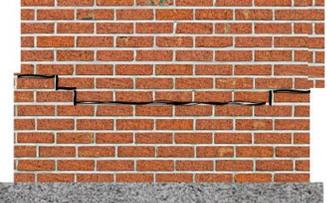
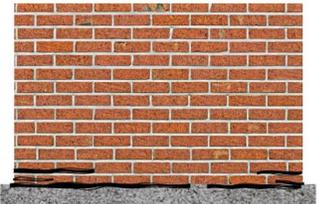
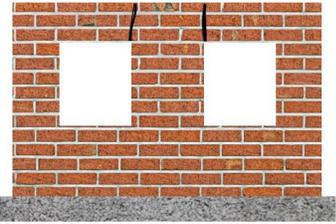
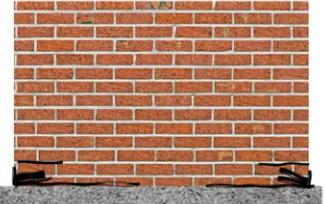
En el caso de las estructuras de mampostería reforzada interiormente, el comportamiento de este tipo de estructuras es hasta cierto punto comparable al de estructuras a base de muros de concreto reforzado. Esto es válido cuando la construcción es adecuada, y no existen deficiencias en la colocación del refuerzo ni en la colocación del mortero/concreto fluido de relleno. Este tipo de estructuras, cuando no cuentan con una adecuada supervisión y control de calidad durante su construcción pueden presentar deficiencias como fallas locales de las piezas (huecas) por el desprendimiento de sus paredes debido a errores de colado de los huecos, fallas y desprendimientos debido a sistema de anclaje inadecuado e insuficiente en el refuerzo interior. A pesar de que las piezas huecas suelen tener resistencias altas, al agrietarse presentan una caída rápida en su resistencia. Es por esto que, además de asegurar una buena construcción, es necesario contar con cuantías adecuadas de acero de refuerzo para asegurar un buen comportamiento de estas estructuras.

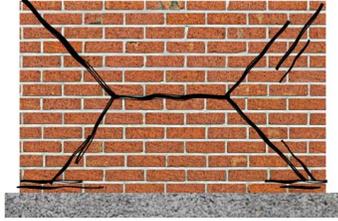
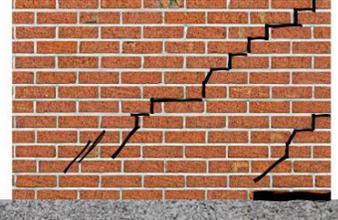
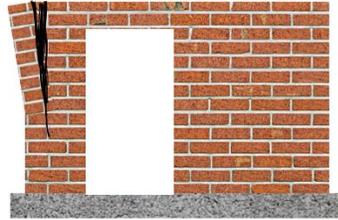
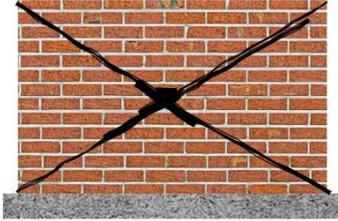
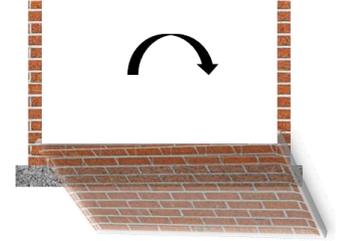
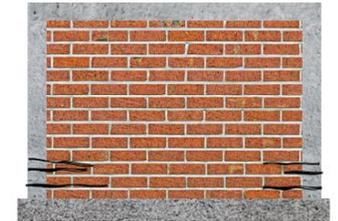
Los muros diafragma de mampostería han tenido un comportamiento variable en México. Esto es debido a las distintas consideraciones que toman los proyectistas al diseñar estructuras que contengan muros diafragma. Comúnmente se han designado a los muros diafragma como muros sin función estructural. Sin embargo, los eventos sísmicos que han sucedido en México han demostrado que los muros diafragma han contribuido a aumentar la resistencia, la rigidez y la disipación de energía en las estructuras.

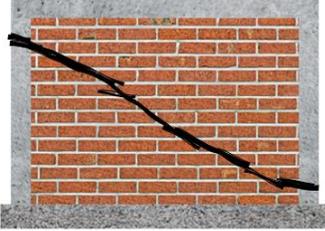
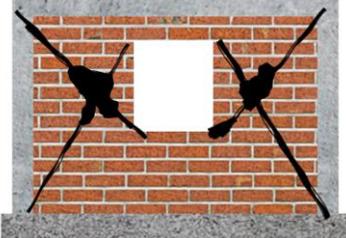
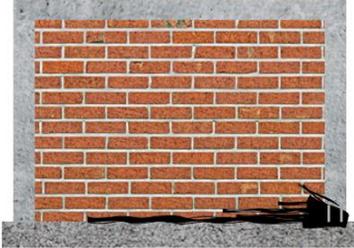
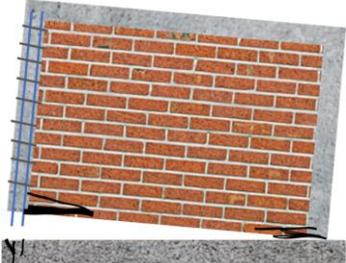
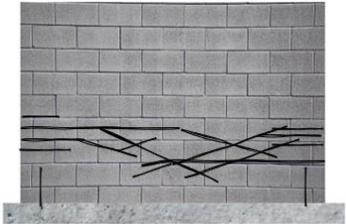
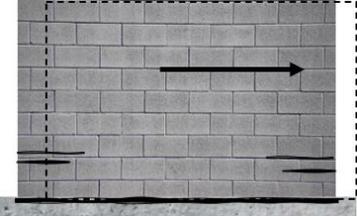
Además de los materiales, la geometría y estructuración empleada en muros diafragma, el tipo de conexión que estos muros tengan con el marco, ya sea de concreto o acero, es un punto determinante para conocer su comportamiento. Por una parte, al ligar ambos elementos, los muros estarán aportado a la resistencia de acciones incidentes sobre la estructura, generando una concentración de esfuerzos en las esquinas. Al desligar los muros sin una adecuada conexión que permita el libre desplazamiento del muro en dirección paralela al movimiento, los muros pueden llegar a presentar una falla por flexión fuera del plano, alcanzando, incluso, el volteo.

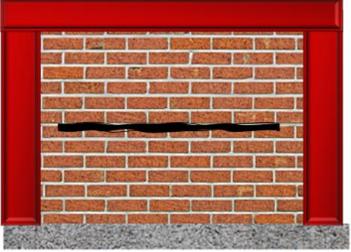
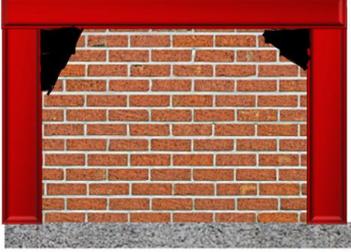
De acuerdo con el Volumen II de la Metodología de Evaluación Postsísmica de la Infraestructura Física Educativa de México (INIFED, 2021b), en la tabla 1 se describen los modos de comportamiento asociados a estructuraciones a base de muros de mampostería.

Tabla 1. Descripción de modos de comportamiento en muros de mampostería (INIFED, 2021b).

Modo de falla	Estructuración	Descripción	Representación gráfica
Cabeceo de la cimentación junto con el muro	-M. Simple -M. Confinada -M. Reforzada interiormente	Causada por el desprendimiento de la cimentación debido a la ocurrencia de un sismo. Se muestra agrietamiento horizontal por flexión. Cada vez que el edificio golpea el suelo existe disipación de energía.	
Cabeceo de muros o de segmentos de muros	-M. Simple -M. Reforzada interiormente	Ocurre posterior al agrietamiento por flexión del segmento de muro, éste adopta un comportamiento de cuerpo rígido, girando alrededor de la punta.	
Cortante por deslizamiento	-M. Simple	Deslizamiento del muro a lo largo de las juntas de mortero. El agrietamiento puede ser escalonado u horizontal.	
Deslizamiento del muro en su base	-M. Simple	El deslizamiento se da en la base del muro, considerando una pobre o nula conexión con la cimentación.	
Agrietamiento vertical en vigas de acoplamiento	-M. Simple	Ocurre cuando la resistencia a flexión en las vigas de acoplamiento que conectan dos muros se alcanza antes que la resistencia a fuerza cortante.	
Cabeceo y aplastamiento de los puntales del muro	-M. Simple	Se observa aplastamiento en las esquinas de la mampostería debido al cabeceo del muro.	

<p>Tensión diagonal posterior al agrietamiento por flexión</p>	<p>-M. Simple</p>	<p>El agrietamiento comienza en el talón del muro (grieta horizontal), debido a flexión, generando una redistribución de la fuerza cortante hacia la punta del muro, causando una grieta con inclinación a 45 grados.</p>	
<p>Agrietamiento por flexión y aplastamiento de la punta del muro</p>	<p>-M. Simple</p>	<p>Inicia con una grieta a flexión en el talón del muro aunado a un deslizamiento en la base. Se origina un agrietamiento inclinado y un aplastamiento y falla local de la mampostería debido a la concentración de fuerza cortante en la punta del muro.</p>	
<p>Agrietamiento vertical en las esquinas</p>	<p>-M. Simple</p>	<p>Sucede en la intersección de muros con el sistema de piso, generalmente en las esquinas. Se formación se debe a las demandas en el plano del muro y fuera de él.</p>	
<p>Tensión diagonal pura</p>	<p>-M. Simple -M. Confinada -M. Reforzada interiormente -Muros diafragma</p>	<p>Grietas inclinadas (forma de letra X) a través de las piezas y mortero. Las grietas llegan a penetrar las puntas del muro, provocando separación entre los triángulos superior e inferior de este.</p>	
<p>Flexión fuera de plano</p>	<p>-M. Simple -M. Confinada -Muros diafragma</p>	<p>Agrietamiento horizontal en la base y su caída. Puede suceder por desprendimiento del diafragma del sistema de piso del muro.</p>	
<p></p>	<p>-M. Reforzada interiormente</p>	<p>Observable en muros planos (sin patines y de bajo espesor) y esbeltos sometido a grandes desplazamientos fuera del plano.</p>	
<p>Flexión pura</p>	<p>-M. Confinada -M. Reforzada interiormente</p>	<p>Se destaca por la presencia de grietas horizontales en la mitad inferior de los muros que comienzan en los castillos (en mampostería confinada). Es poco frecuente, sin embargo, es un modo de falla deseable.</p>	

<p>Flexión – tensión diagonal</p>	<p>-M. Confinada -M. Reforzada interiormente</p>	<p>Comienza con la aparición de una grieta horizontal en el talón del muro, seguido por la formación de una grieta a 45 grados (tensión diagonal) que puede llegar a penetrar los castillos. Es un modo de falla común.</p>	
<p>Flexión – compresión diagonal</p>	<p>-M. Confinada</p>	<p>Se distingue por el aplastamiento de piezas en la parte media y media superior del muro, combinado con un agrietamiento diagonal que penetra los castillos.</p>	
<p>Flexión - deslizamiento</p>	<p>-M. Confinada -M. Reforzada interiormente</p>	<p>Comienza con agrietamiento por flexión en el talón del muro, que posteriormente se extiende en toda la longitud. Ante grandes desplazamientos puede generar aplastamiento local en las primeras hiladas de mampostería.</p>	
<p>Flexión y fallas en anclaje de castillos</p>	<p>-M. Confinada</p>	<p>Se observan grietas verticales a la altura del anclaje. Se da por una longitud de desarrollo escasa del acero longitudinal de los castillos respecto a la cimentación.</p>	
<p>Flexión y fallas por adherencia en traslapes</p>	<p>-M. Reforzada interiormente</p>	<p>Se generan grietas verticales a la altura de los traslapes del refuerzo, debido a una longitud insuficiente de las barras en la base del muro. Además, se presenta aplastamiento de la mampostería en la punta del muro. Puede generarse cabeceo del muro sobre la cimentación por la falla de adherencia.</p>	
<p>Deslizamiento puro del muro en su base</p>	<p>-M. Reforzada interiormente</p>	<p>Se presenta poco agrietamiento, generalmente horizontal en la mitad inferior del muro, aplastamiento y desprendimiento de piezas en la primera hilada. El muro presenta un desplazamiento como cuerpo rígido.</p>	

<p>Deslizamiento por cortante a lo largo de las juntas</p>	<p>-Muros diafragma</p>	<p>Se genera en muros sin aberturas, ante resistencias bajas de mortero y una relación de aspecto del muro pequeña. Se presenta agrietamiento horizontal a la mitad de la altura del muro, asociado a grandes desplazamientos laterales. Este modo es más común en marcos de acero.</p>	
<p>Aplastamiento en las esquinas</p>	<p>-Muros diafragma</p>	<p>El agrietamiento se da en las esquinas extremas del puntal diagonal de los muros debido a una alta concentración de esfuerzos. Ante un aumento en los desplazamientos laterales, el daño se extiende hacia el centro del claro/ mitad de la altura de las columnas.</p>	

Fuente de las imágenes: Elaboración propia con base en INIFED (2021b) y FEMA 306 (1998).

1.4 DAÑOS OBSERVADOS DURANTE EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017 EN ESTRUCTURAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Con la finalidad de obtener información estadística referente al comportamiento de las estructuras durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, se realizó en un proyecto colaborativo entre la Universidad de Texas en Austin y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM) a través del programa ConTex. El objetivo del proyecto fue analizar el desempeño estructural de edificios rehabilitados tras el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México, y a su vez, estudiar edificios que presentaron algún nivel de daño o la necesidad de ser reforzados, reparados, reestructurados o, en su caso, demolidos. A través de la consecución y análisis de la información fue posible la elaboración de una base de datos de edificios con información relativa a la ubicación, tamaño, tipo de material y sistema de construcción, así como los daños identificados y las acciones correctivas que se tomaron para rehabilitar los edificios.

Uno de los principales objetivos del proyecto fue la conformación de un inventario de los edificios dañados y que requirieron ser rehabilitados con el fin de identificar las tendencias de técnicas empleadas para la rehabilitación de edificios, así como para encontrar diferencias entre las prácticas y criterios de análisis, diseño y construcción. Como resultado del análisis de la información brindada por el Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México (ISC-CDMX) logró conformarse una base de datos con información referente a la rehabilitación de 208 edificios que presentaron daños tras el sismo del 19 de septiembre de 2017.

La base de datos consta de diversas secciones, como son:

- Información del proyecto original, referente al año de construcción, así como la existencia de planos, estudios y memorias de cálculo originales.
- Uso del inmueble.
- Clasificación de la estructura por grupo de importancia según las NTC-Sismo.
- Propiedades del suelo. Con datos referentes a la ubicación geotécnica según las NTC-Cimentaciones, periodo y aceleración máxima del suelo, así como el coeficiente sísmico y el factor de comportamiento sísmico del proyecto original y del proyecto de rehabilitación.
- Clasificación del sistema estructural.
- Peligro de resonancia. Mediante expresiones de Murià-Vila y González (1995), se calcularon los periodos fundamentales de vibración de las estructuras y la relación entre éstos y el periodo dominante del suelo (T/T_s).
- Vulnerabilidades. Con campos para evaluar las condiciones de regularidad establecidas en las NTC-Sismo.
- Características del edificio. Se incluyen longitudes, alturas, áreas, número de niveles, presencia y profundidad de sótanos, uso del último piso, presencia de cubos de iluminación, elevadores y escaleras.
- Características de los elementos del edificio. Con información referente a las dimensiones de los elementos estructurales que conforman la estructura del edificio (columnas, vigas, castillos, dadas, muros de carga, muros diafragma, muros divisorios, sistemas de piso y de cimentación) y propiedades mecánicas de los materiales que los conforman como parte del proyecto original.
- Evaluación del daño. Se identifican problemas geotécnicos, estructurales, no estructurales, colapsos y clasificación de daño.
- Rehabilitación previa al sismo de 2017. Con el fin de conocer si el edificio presentó daños ante sismos anteriores y tuvo la necesidad de ser rehabilitado.
- Rehabilitación posterior al sismo de 2017. Se incluye el tipo de rehabilitación llevada a cabo, los tipos de documentos disponibles sobre el proyecto de rehabilitación (planos arquitectónicos, estructurales, memoria de cálculo, estudios de laboratorio, de suelo y topográficos) y la técnica de rehabilitación empleada.

Con objeto de relacionar el nivel de daño de los edificios con la técnica de rehabilitación empleada, el equipo de trabajo del II-UNAM revisó la clasificación de daño para cada edificio estudiado tomando en cuenta los informes y dictámenes de seguridad estructural emitidos por el ISC-CDMX, fotografías incluidas y visitas de campo realizadas. Se definieron cuatro niveles de daño: grave, intermedio, ligero y sin información (S/I). En la figura 6 puede observarse la frecuencia o porcentaje de edificaciones correspondiente a cada una de las clasificaciones de daño evaluadas por el equipo de trabajo del II-UNAM.

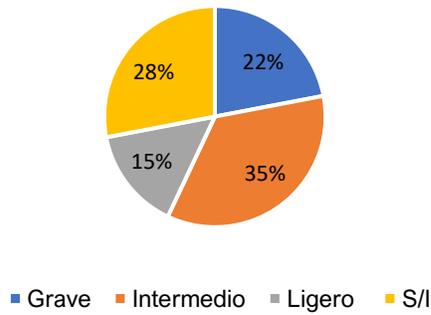


Figura 6. Magnitud de daño general II-UNAM (Proyecto colaborativo ConTex, 2020).

En virtud de que el levantamiento de daños fue muy heterogéneo en los edificios rehabilitados, se estableció arbitrariamente que el nivel de daño del edificio fuera el nivel de daño más desfavorable de sus elementos estructurales. Esta es una convención conservadora, si bien se reconoce su imprecisión.

Adicionalmente, resultó relevante identificar las variables que permitieron conocer cuáles son las edificaciones y sus elementos estructurales en los que habría de prestarse mayor atención durante los procedimientos constructivos y el mantenimiento. En la figura 7 es posible observar la relación entre el año de construcción (que brinda un parámetro respecto a la normatividad con la que fue diseñada la edificación), el número de niveles y los elementos estructurales dañados. Es relevante mencionar que al menos 94% de los edificios estudiados presentó algún tipo de daño estructural.

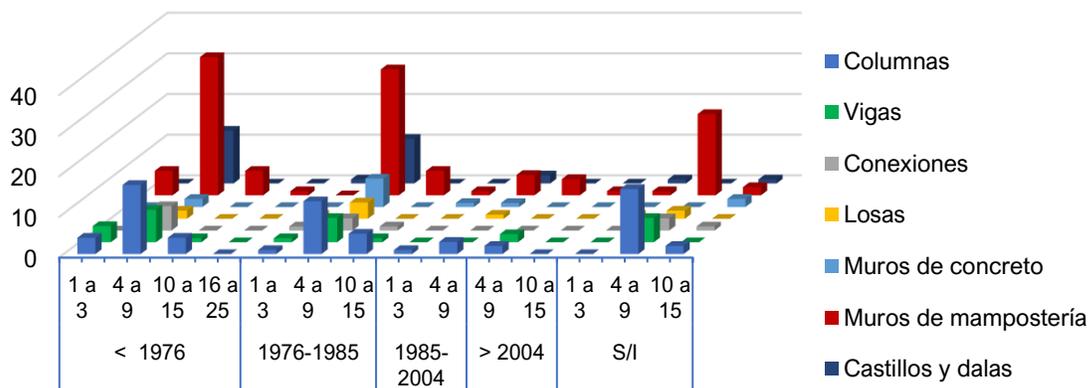


Figura 7. Relación entre año de construcción-número de niveles-daño en elementos estructurales (Proyecto colaborativo ConTex, 2020).

Se puede observar que independientemente del año de construcción y del número de niveles, los elementos estructurales con mayor nivel de daño estructural resultaron ser los muros de mampostería, seguido por las columnas de concreto reforzado. Respecto al año de construcción, es posible observar que la mayor cantidad de daño en elementos estructurales se presenta en edificaciones construidas antes de 1976. En la figura 8 se muestran evidencias de daños estructurales en muros de mampostería.

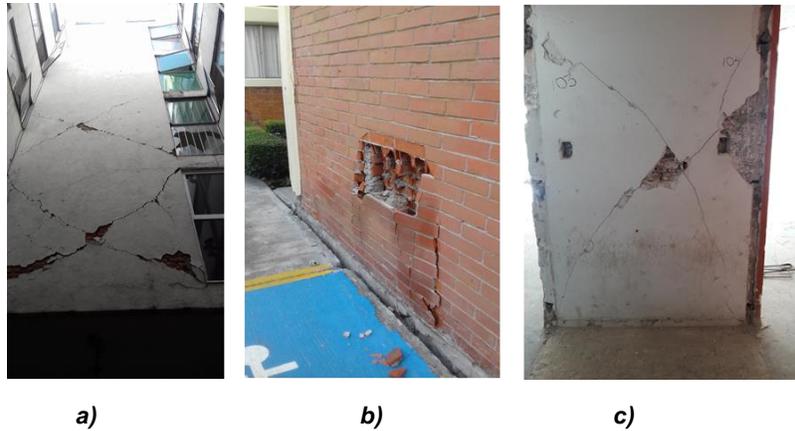


Figura 8. Evidencias de daños estructurales en muros de mampostería: a y c) daños por tensión diagonal, b) aplastamiento local. (Proyecto colaborativo ConTex, 2020).

Como resultado del análisis de la información brindada por el ISC-CDMX, lograron identificarse 20 distintas técnicas que formaron parte de la rehabilitación de 206 edificios; de los 208 edificios analizados, se eliminaron dos que fueron demolidos. En la figura 9 es posible observar la frecuencia de empleo de las diversas técnicas de rehabilitación. En 99% de los edificios se empleó más de una técnica de rehabilitación, y únicamente en tres edificios fue empleada una técnica (reparación de grietas, renivelación, adición de muros de concreto). Las técnicas de rehabilitación se clasificaron en tres categorías: reparación, reforzamiento y reestructuración, dando como resultado que sólo 1% de los edificios se repararon, 7% fueron reforzados y 2% llevaron a cabo una reestructuración. El 90% restante respondió a una combinación de tres de las categorías anteriormente mencionadas.

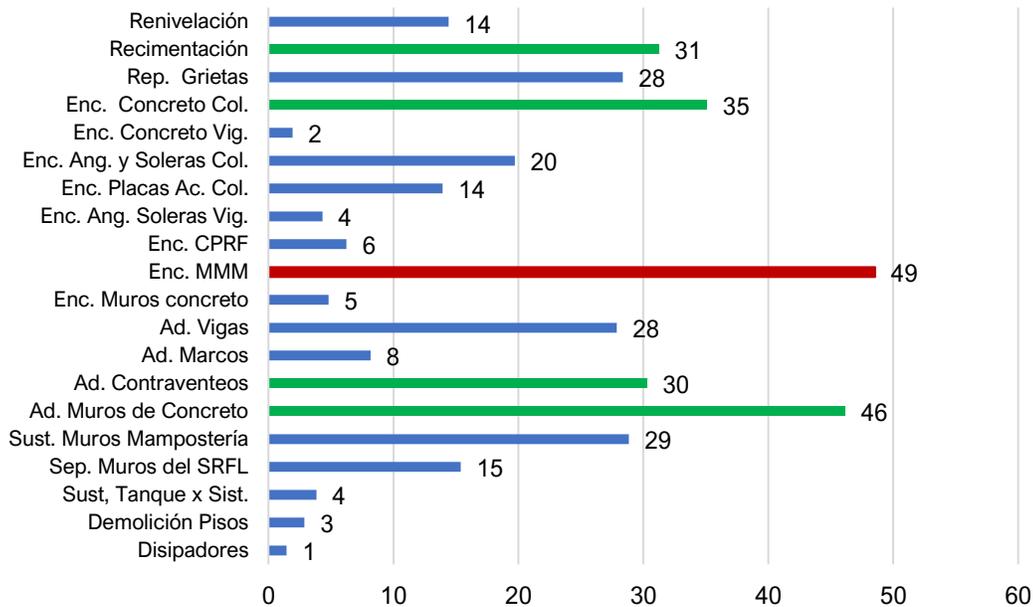


Figura 9. Uso de técnicas de rehabilitación en edificios de la CDMX después del sismo de 2017 (Proyecto colaborativo ConTex, 2020).

De la figura 9 puede observarse que la técnica más empleada para la rehabilitación de edificios resultó ser el encamisado de muros de mampostería con malla de alambre soldado (en 49% de los casos), lo cual concuerda con lo observado en la figura 7, donde se indica que los muros de mampostería fueron los elementos estructurales con mayor índice de daño estructural.

Con los expedientes de los edificios digitalizados, se revisaron las memorias de cálculo y los planos estructurales de rehabilitación con el interés de identificar las variables más relevantes en el diseño y aplicación de la técnica. En la tabla 2 se resumen las observaciones hechas del estudio de los edificios rehabilitados con encamisados de muros de mampostería.

Tabla 2. Frecuencia del uso de variables identificadas en la técnica de encamisado de muros de mampostería con malla de alambre soldado.

Reparación de grietas	%	Tipo de malla	%	Tipo de anclaje	%	Material de encamisado	%
Inyección	16	6x6- 4/4	15	Alambrón	24	Mortero	60
Mortero	5	6x6- 6/6	15	Barras de acero	10	Concreto	28
Rajuelo	3	6x6-8/8	10	Clavos	49	S/I	12
Mortero y rajuelado	7	6x6-10/10	45	S/I	17	-	-
Sin reparación	17	Otros	15	-	-	-	-
Sin información	52	-	-	-	-	-	-

Fuente: Proyecto colaborativo ConTex (2020)

En las primeras dos columnas se presentan datos sobre el porcentaje de edificios que sufrieron la reparación de grietas en los muros: del total de edificios, en 52% de ellos no se encontró información sobre la reparación de grietas; en 17% se conoce que los muros no fueron reparados, en 16% se inyectaron las grietas, en 15% se rellenaron las grietas con mortero o con mortero y rajuelas.

Respecto a las mallas utilizadas para el encamisado (ver columnas 3 y 4), la más empleada resultó ser la malla 6x6-10/10 con 45% de frecuencia; el resto se distribuyó de manera sensiblemente uniforme entre mallas de alambre con calibres distintos. Con respecto al tipo de anclaje usado para fijar la malla al muro, en 83% de los edificios rehabilitados con malla de alambre soldado se estableció el tipo de anclaje. El tipo de anclaje más usado (49%) fueron clavos.

Finalmente, en 12% de los proyectos no se especifica qué material se debió haber colocado para recubrir la malla de alambre soldado. Este porcentaje, así como el 17% de casos sin especificación del tipo de anclaje es preocupante ya que implica que se deja en manos del constructor una decisión de la cual depende el desempeño sísmico del edificio. Es claro que el recubrimiento más usado fue el mortero. En los edificios en los que se contó con información de detalle relativa al encamisado, se logró identificar que en los casos en los que el concreto es empleado para el recubrimiento de la malla, se consideraron resistencias a la compresión con variaciones entre 15 MPa (150 kg/cm²) y 25 MPa (250 kg/cm²). Por otra parte, para el caso de los edificios cuyo encamisado fue hecho a base de mortero de cemento, se observó que en todos los casos (con información) fue

utilizado mortero tipo I con dosificaciones entre 1:3 y 1:4 (cemento-arena) con resistencias a la compresión de entre 10 MPa (100 kg/cm²) y 15 MPa (15 kg/cm²).

Otros aspectos que exhibieron variaciones importantes fueron el espesor de las camisas, con variaciones entre 15 y 116 mm, y la separación de anclaje, con variación entre 200 mm y 1 m.

El estudio de la información obtenida a través del Proyecto colaborativo ConTex 2020 permitió, específicamente en estructuras de mampostería, identificar tendencias de daño y técnicas de rehabilitación empleadas para este tipo de estructuras. Se logró identificar que al encamisado de muros mediante malla de alambre soldado y mortero o concreto como la única técnica empleada para rehabilitar muros de mampostería; asociado a este punto, los datos relativos a las distintas variables consideradas para esta emplear esta técnica permitieron mostrar, en algunos casos, diferencias de lo establecido en las NTC-Mampostería en lo referente a la rehabilitación y reforzamiento de estructuras de este tipo.

Lo anterior motivó a realizar una investigación relativa al empleo de distintas alternativas de rehabilitación para muros de mampostería, la cual se plantea en este trabajo, con la finalidad de fortalecer la normatividad futura y brindar nuevas opciones que den pie a proyectos de rehabilitación que se adapten, en la medida de lo posible, a las necesidades de cada estructura.

CAPÍTULO 2

EVALUACIÓN POSTSÍSMICA Y ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES CON MUROS DE MAMPOSTERÍA

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las distintas etapas del proceso de evaluación estructural aplicado a las estructuras de mampostería. Se aborda el Método de Evaluación Rápida, y el Método de Evaluación Intermedia, y se discuten distintas técnicas para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de las estructuras de mampostería después de la ocurrencia de un evento sísmico.

También es abordado el Método de Evaluación Profunda, haciendo énfasis en la identificación de deficiencias en las estructuras y las distintas estrategias de rehabilitación.

2.2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN POSTSÍSMICA APLICADA A ESTRUCTURAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA

Para poder determinar la necesidad de rehabilitación de una estructura es necesario realizar una evaluación a distintos niveles de detalle que permita generar los criterios necesarios para reestablecer el funcionamiento óptimo de cualquier edificación.

La rehabilitación de una estructura, de acuerdo con SMIE (2019), contempla al conjunto de actividades, procesos, modificaciones e intervenciones necesarias para mejorar el comportamiento de una estructura ante acciones futuras y así satisfacer los niveles de desempeño sísmico establecidos.

El concepto de rehabilitación toma en cuenta la restitución de las condiciones iniciales de un elemento/estructura que sufrió daños (reparación), el incremento de la resistencia (reforzamiento), el incremento de rigidez (rigidización) y la capacidad de deformación, así como también la modificación del sistema resistente a cargas de un edificio (reestructuración).

La evaluación de una estructura en sus distintos niveles permite conocer las estrategias y acciones que deberán llevarse a cabo durante la rehabilitación a través de la identificación y cuantificación de sus debilidades y riesgos potenciales.

En comparación con el diseño de un edificio nuevo, el hecho de llevar a cabo la rehabilitación de un edificio contempla la posibilidad de enfrentarse a una estructura que fue diseñada considerando reglamentos y normatividades anteriores, estructuras que posiblemente no hayan llevado un plan de mantenimiento adecuado, e incluso estructuras que no hayan sido construidas bajo ninguna reglamentación o normatividad, tal como ocurre en el caso de la autoconstrucción. Es por esto que la evaluación representa una etapa crucial para la rehabilitación de cualquier estructura.

Posterior a la ocurrencia de los sismos del 7 y 19 de septiembre de 2017 en varios estados de la República Mexicana, se hizo evidente la falta de un esquema organizado

tanto de evaluación como de rehabilitación estructural. México, a pesar de ser un país altamente sísmico, no contaba con guías técnicas, manuales, reglamentos o normatividades que buscaran establecer un “control de calidad” en las prácticas de revisión post-sísmica y rehabilitación de estructuras a un nivel alto de detalle. Para resolver esta laguna, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en colaboración con el Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México (ISC-CDMX), el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) y el Banco Nacional de Obras (BANOBRAS) elaboró el documento *“Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa: Guía Técnica”*. Este documento es aplicable a cualquier tipo de estructuras, y establece, en uno de sus documentos complementarios (*“Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México: Volumen I Metodología”*), la metodología de evaluación postsísmica de la infraestructura, misma que se sigue en los siguientes puntos de este capítulo.

En el Apéndice C de este documento, se muestra un ejemplo de aplicación de rehabilitación a una estructura de mampostería simple con daños debido al sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. En este ejemplo se muestra la aplicación de cada uno de los puntos de la Metodología de Evaluación presentados a continuación.

2.2.1 Método de Evaluación Rápida (MER)

El Método de Evaluación Rápida (MER) tiene como objetivo inspeccionar y evaluar de manera rápida y con la menor cantidad de inspectores especializados el estado de un edificio después de un sismo. El resultado de la aplicación de esta metodología contempla la clasificación de las estructuras en función de su uso; existen tres distintos tipos de clasificación:

- Edificación segura (“Uso permitido”)
- Edificación potencialmente peligrosa (“Acceso y Uso Restringidos”)
- Edificación insegura (“Acceso Prohibido”)

Esta etapa de evaluación inicia con un recorrido e inspección exterior de la estructura, accediendo al edificio únicamente si no es posible revisar desde el exterior y si se conoce o sospecha de daños en elementos no estructurales que no comprometan la seguridad del equipo de trabajo.

Para llevar a cabo de manera eficiente la evaluación rápida de una estructura, la *Metodología de evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México (INIFED, 2021b)*, propone seguir los pasos que a continuación se presentan:

- *Paso 1: Revisión del edificio desde el exterior.*

Deberá hacerse la inspección alrededor de la estructura, buscando identificar daños, inclinaciones, golpeteo con edificios vecinos o elementos que puedan llegar a desprenderse o caer, de igual manera es importante identificar el posible sistema estructural que conforma a la estructura.

Habrà de identificarse la presencia de discontinuidades verticales, entrantes o salientes y examinar la configuración en planta (para descartar efectos de torsión), buscar signos de daño en muros de fachada, cancelerías o elementos que den un inicio de desplazamientos laterales en la estructura y revisar la condición de los elementos no estructurales. En la

medida de lo posible se debe examinar la condición de la cimentación, buscar posibles emersiones o asentamientos, e incluso medir las distorsiones o desplazamientos horizontales residuales de la estructura.

Cabe resaltar que este paso debe llevarse a cabo de manera rápida, sin abundar en detalles profundos.

- *Paso 2: Revisar el sitio ante fallas y peligros de origen geotécnico.*

No debe dejarse atrás la posible interacción y contribución de las condiciones del suelo al posible daño de la estructura. Debe hacerse un análisis en el suelo circundante con la finalidad de identificar grietas, deformaciones o movimientos en el suelo.

- *Paso 3: Inspección cercana del sistema estructural*

Si es posible entrar al edificio, sin correr riesgo, y tomando las precauciones pertinentes, deben identificarse los daños en los elementos y verificar la posible existencia de daño previo

Es importante identificar el tipo de sistema estructural, por ejemplo, identificar si la estructura cuenta con un sistema de marcos de concreto reforzado o de acero que den indicios a la presencia de muros diafragma, o buscar la presencia de elementos de confinamiento, para asegurar si la estructura es confinada, o en su defecto verificar si se trata de mampostería reforzada interiormente o mampostería simple o no reforzada. Es importante tomar en cuenta el factor de la autoconstrucción, que, al ser tan común en México, puede generar importantes variaciones en las estructuras que puedan llegar a inspeccionarse (por ejemplo, que se cuente con sistemas combinados).

- *Paso 4: Inspeccionar peligros por elementos no estructurales*

Una vez que se identifique el tipo de sistema estructural, deben identificarse daños en conexiones de fachadas, muros divisorios, techos, plafones, lámparas, tinacos y otros elementos que puedan ser de riesgo.

- *Paso 5: Identificación de otros peligros*

Además de los daños y fallas en elementos estructurales y no estructurales, deben conocerse las condiciones de los diversos sistemas que integran a la estructura (hidrosanitario, eléctrico, de gas, escaleras, elevadores, accesos, entre otros).

- *Paso 6: Emisión y llenado del Formato de Evaluación y el Aviso de Seguridad Estructural y Uso del Edificio*

Una vez que se realizó una inspección visual de las condiciones de la estructura, y se determinó el nivel de seguridad respecto a la ocupación de la estructura, deben llenarse los formatos correspondientes que indiquen si es necesario proceder con los siguientes niveles de evaluación o no.

Cabe destacar que el Método de Evaluación Rápida no pretende clasificar el nivel de daño de la estructura, ya que no se realiza una investigación detallada del posible daño en cada elemento o componente de la estructura. Es necesario aplicar los siguientes niveles de evaluación para poder clasificar el nivel de daño de la estructura.

2.2.2 Método de Evaluación Intermedia (MEI)

Posterior a la aplicación del Método de Evaluación Rápida (MER), debe aplicarse el Método de Evaluación intermedia (MEI) a través de una re-inspección, en caso de que el edificio haya obtenido una clasificación de “Acceso y Uso Restringidos” o “Acceso prohibido”, es decir, un aviso amarillo, o rojo, respectivamente. También, este nivel es aplicable para confirmar o en su defecto, modificar, el aviso emitido en el nivel anterior. Este nivel de evaluación buscará evaluar la seguridad estructural de manera aproximada. Esta metodología puede llevarse a cabo de manera simultánea con el Método de Evaluación Rápida (MER), en casos extraordinarios, según la disponibilidad de la brigada y la presencia de especialistas en estructuras.

2.2.2.1 Estimación de la seguridad estructural

La determinación de la seguridad estructural de un edificio que presente daño puede realizarse, primeramente, en función de la disponibilidad de información necesaria para poder hacer las estimaciones correspondientes. La información básica necesaria para llevar a cabo esta etapa de evaluación comprende los siguientes puntos:

- a) Año de construcción del edificio. Con este parámetro se pueden suponer, en caso de que no se cuente con planos y memorias de cálculo originales, los reglamentos y normatividades con las que el edificio fue diseñado, o en su defecto, las tendencias de construcción existentes en la época.
- b) Número de niveles sobre el nivel de banqueta.
- c) Altura libre de cada entrepiso.
- d) Superficie construida por cada entrepiso.
- e) Ubicación en planta, orientación, geometría y características de los elementos estructurales (vigas, columnas, castillos, dadas y muros, incluyendo a los muros diafragma).
- f) Características de los elementos estructurales: detalles del refuerzo longitudinal, del refuerzo transversal y de las conexiones.
- g) Propiedades mecánicas de los materiales.
- h) Medición del daño en elementos estructurales: anchos de grieta, extensión de desconchamiento, aplastamiento, desprendimiento de piezas, pandeos, entre otros.
- i) Hundimientos, colisiones y desplomos.

El procedimiento para la estimación de la seguridad estructural consiste, básicamente, en calcular el cociente entre la capacidad y la demanda de desplazamiento y/o fuerzas laterales de los elementos estructurales que se ubiquen en el entrepiso con mayor probabilidad de exhibir daño, o que controle el comportamiento de la estructura, para ambas direcciones ortogonales del edificio.

Para el cálculo de la capacidad de desplazamiento lateral (o de la resistencia a fuerza cortante), se habrá de determinar el mecanismo de falla que tenga mayor posibilidad de desarrollarse para cada entrepiso, por ejemplo, para una falla por tensión diagonal en estructuras a base de muros de carga de mampostería. Por otra parte, el cálculo de la demanda de desplazamiento lateral sobre los elementos estructurales es calculada mediante el peligro sísmico al que está expuesto el edificio. Para esto, se emplean registros sísmicos asociados a la ubicación del edificio en estudio, o bien, se usan espectros de diseño. Es importante mencionar que, para el cálculo de la capacidad de los

elementos estructurales, hay que considerar el efecto del daño y con base en esto estimar la rigidez, resistencia y capacidad de deformación remanentes.

La capacidad obtenida en cada elemento debe ser, al menos, igual a la demanda sobre dicho elemento. En caso de que esto sea así, se puede omitir una revisión más detallada. De lo contrario, es necesario proceder con el siguiente nivel de evaluación: Evaluación Profunda.

2.2.2.2 Técnicas de evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la mampostería

Como parte del proceso de Evaluación Intermedia, es necesario conocer, en la medida de lo posible, y sin comprometer la seguridad de la estructura y los usuarios, las propiedades de los materiales para tener un conocimiento más certero respecto al comportamiento de esta. En general, existen métodos de evaluación no destructivos y destructivos. La aplicación de cada uno de ellos dependerá de los parámetros que se necesiten obtener para estudiar los componentes de la estructura. A su vez, dependerá también de la posibilidad de realizar pruebas. En la tabla 3, se presenta la aplicabilidad de algunos métodos de evaluación de las propiedades de los materiales en las estructuras de mampostería.

Tabla 3. Aplicabilidad de los métodos de evaluación y ensayos en sitio (SMIE, 2019).

MÉTODOS DE PRUEBA EN ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA																		
Condición	Observación		No destructivos								Destructivos							
	Inspección visual	Endoscopia	Esclerómetro	Velocidad de pulso	Eco por impacto	Aparatos magnéticos	Radiografía	Potencial de corrosión	Termografía infrarroja	Microondas	Petrografía	Resistividad de la mampostería	Extracción de corazones	Gatos planos	Ensayes a corte	Adherencia mortero-pieza	Penetración	Pruebas de carga
Resistencia de las piezas																		
Resistencia en el plano																		
Uniformidad en el plano																		
Deformabilidad en el plano																		
Nivel de esfuerzos en el plano																		
Localización de grietas																		
Movimiento de grietas																		
Desempeño ante carga																		
Tamaño de barra, localización y recubrimiento																		
Localización de anclas																		
Vacíos en mortero fluido																		
Vacíos en la mampostería																		
Corrosión del acero fluido																		
Problemas de durabilidad																		

2.2.2.3 Análisis del daño

De acuerdo con la *Metodología de evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México (INIFED, 2021b)*, durante la evaluación intermedia deben revisarse los aspectos que se muestran en la tabla 4. Estos aspectos son aplicables a todas las modalidades de estructuración (mampostería simple, mampostería confinada y mampostería reforzada interiormente, muros diafragma). Con esta revisión podrá hacerse un análisis más detallado que en el MER respecto a los elementos que presentan algún nivel de daño, así como las deficiencias e irregularidades presentes en estructuras a base de muros de mampostería.

Tabla 4. Aspectos a revisar para evaluar el nivel de daño en estructuras de mampostería (INIFED,2021b).

Aspecto	Descripción
Daño general	Debe revisarse la estructura en busca de grietas, inclinación, o posibles golpeteos con edificios colindantes.
Unión de sistemas de piso y techo con muros	Se busca evidencia de daño o movimiento relativo entre los muros y el sistema de piso/techo.
Muros	Se deben identificar los modos de falla presentes en los muros y el sistema de piso/techo, revisar si existen muros desplomados, agrietamiento de ancho significativo. Hay que revisar la posible presencia de agrietamiento inclinado, aplastamiento y agrietamiento en la mampostería que sugiera falla fuera del plano y la posible extensión de grietas hacia los castillos. También es necesario verificar el correcto confinamiento de los muros y las aberturas.
Columnas / Castillos	Se revisan las condiciones en los elementos de carga verticales (columnas, castillos) y sus apoyos y respectivas conexiones con el resto de los elementos.
Diafragmas de piso y techo	Es necesario verificar que no existan deformaciones, roturas o daños en el diafragma, ni en los apoyos de estos. Debe revisarse la trayectoria de carga entre las losas y los muros estructurales, revisando la conexión entre ellos y así poder descartar un posible deslizamiento o falla por cortante, e identificar los posibles puntos donde se haya dado un cambio de rigidez.
Cimentaciones	En la medida de lo posible, hacer una revisión de las condiciones de la cimentación, buscando grietas de gran ancho (20 mm de flexión o 6 mm inclinadas), asentamientos diferenciales y otros peligros de riesgo geotécnico.
Otros peligros	Se deben revisar las condiciones de elementos como pretilas, cornisas, acabados de fachada, entre otros.

En las figuras 10, 11 y 12 se muestran, de manera esquemática, los principales aspectos a revisar y evaluar en una estructura de mampostería simple, mampostería confinada y mampostería reforzada interiormente, respectivamente. Los aspectos a revisar y evaluar responden a los modos de comportamiento y fallas comunes en este tipo de estructuras. En las figuras 10, 11 y 12 se incluye a todos los daños posibles en cada tipo de estructuración; es importante aclarar que la ocurrencia de uno o varios de estos daños depende de los modos de comportamiento dominantes en la estructura.

Es necesario contar con una brigada calificada que sepa identificar y diferenciar los daños de manera asertiva.

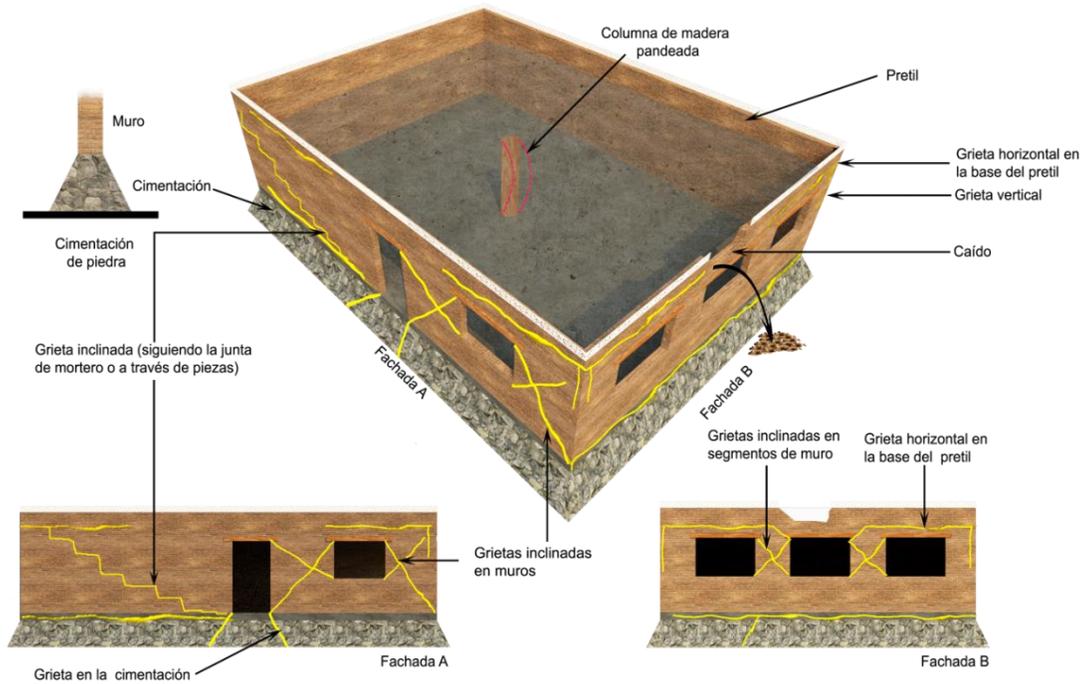


Figura 10. Principales aspectos a revisar y evaluar en una estructura de mampostería simple (INIFED, 2021b).

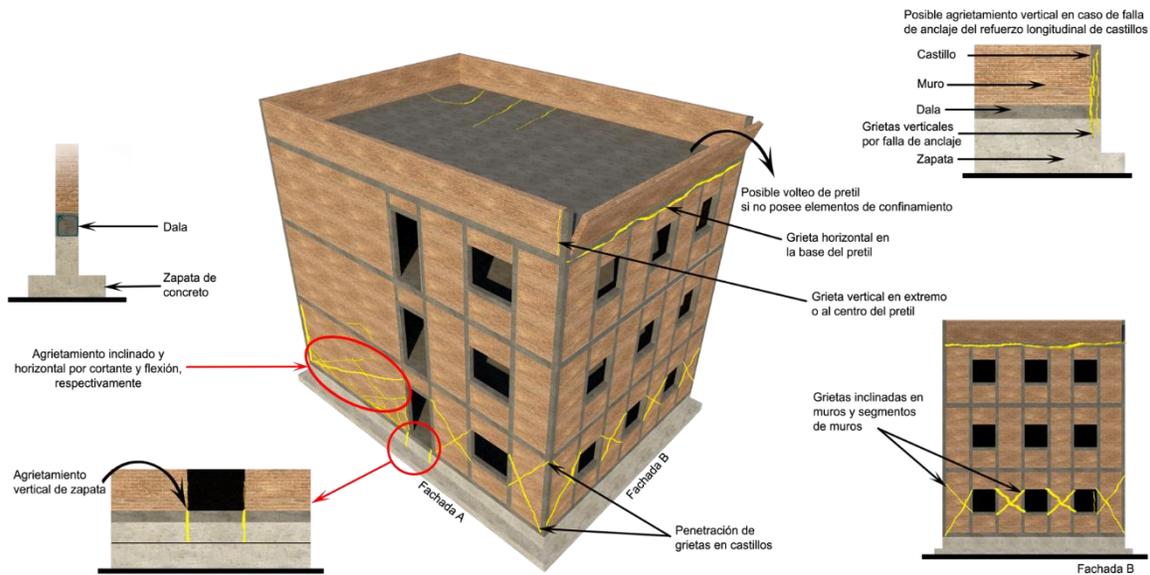


Figura 11. Principales aspectos a revisar y evaluar en una estructura de mampostería confinada (INIFED, 2021b).

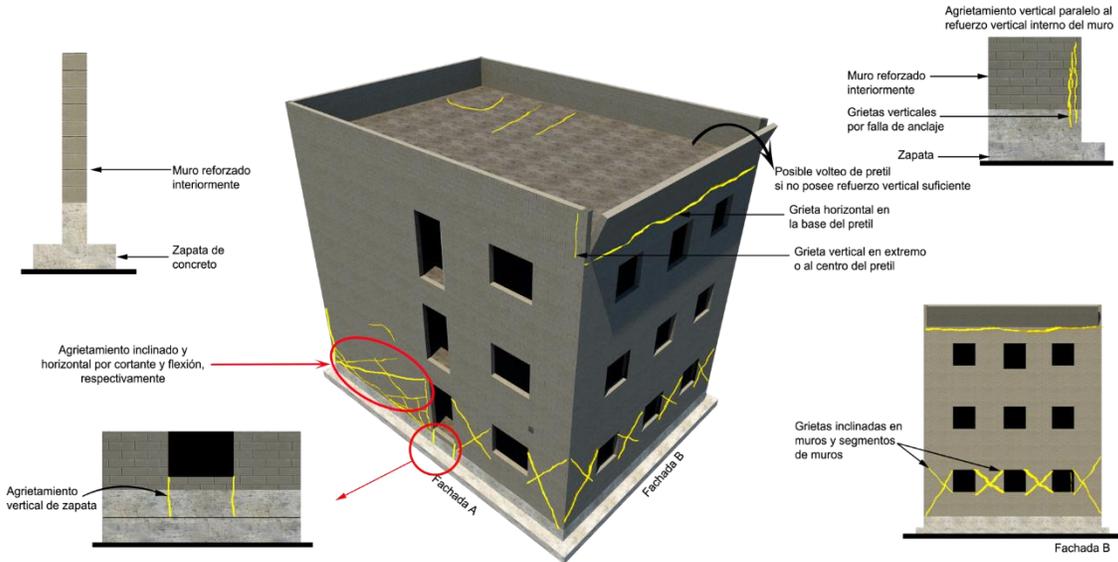


Figura 12. Principales aspectos a revisar y evaluar en una estructura de mampostería reforzada interiormente (INIFED,2021b).

2.2.3 Método de Evaluación Profunda (MEP)

Este nivel de evaluación contempla el análisis detallado del daño en elementos estructurales y no estructurales, haciendo un análisis cuantitativo de la capacidad de la estructura después de haber sufrido daño. A su vez, en este nivel se estudian las deficiencias de la estructura para poder determinar un plan de distintas estrategias y técnicas para rehabilitarla y recuperar su resistencia, rigidez, capacidad de deformación inelástica y/o su amortiguamiento.

2.2.3.1 Identificación de deficiencias

Una vez que fueron identificados los daños, se debe procurar la obtención la documentación e información necesaria para conocer las características de la estructura en estudio. De acuerdo con INIFED (2021a), una estructura puede presentar dos tipos de deficiencias, las cuales se muestran en el esquema de la figura 13. Estas deficiencias son aplicables a cualquier tipo de estructura. Para mitigar una o ambas deficiencias, es necesario contemplar las distintas estrategias de rehabilitación que vayan de acuerdo con las necesidades de la estructura, estas estrategias se presentan en el punto 2.2.3.2 de este documento.



Figura 13. Esquema de deficiencias estructurales (INIFED, 2021a).

A las deficiencias anteriormente mostradas es necesario sumar también las debidas a una mala estructuración (que puede llegar a ser muy común para el caso de estructuras de mampostería). Una mala estructuración puede generar problemas de torsión, o incluso de concentración de masa, haciendo a la estructura vulnerable.

2.2.3.2 Estrategias de rehabilitación

Una estrategia eficiente para llevar a cabo la realización del proyecto de rehabilitación de una estructura debe cumplir con los siguientes puntos (INIFED,2021a):

- a) Corregir las deficiencias de los componentes o elementos vulnerables y de todo el sistema en general.
- b) Ser estructural, funcional y estéticamente (en la medida de lo posible) compatible con el sistema estructural original.
- c) Alcanzar los objetivos del proyecto de rehabilitación, acordados entre el o los propietarios del edificio y el proyectista.
- d) Minimizar las afectaciones a los ocupantes del edificio.
- e) Ser costo-eficiente y utilizar materiales y equipos disponibles.

A continuación, en la tabla 5 se presentan las distintas estrategias de rehabilitación en función de las deficiencias a mitigar en una estructura. Una vez que se selecciona la o las estrategias adecuadas para llevar a cabo la rehabilitación es necesario conocer el efecto de estas estrategias en el comportamiento de la estructura rehabilitada, buscando cumplir con la condición de tener un coeficiente de capacidad entre demanda mayor que o igual a la unidad.

Tabla 5. Estrategias de rehabilitación para edificios en general (INIFED, 2021a).

Modificación de los componentes estructurales		
Deficiencia	Técnica /Estrategia	Alcances de la técnica
Inadecuada resistencia y/o capacidad de deformación de los componentes	Encamisado de elementos de marcos con concreto, acero, o compuestos poliméricos reforzados con fibras.	Incremento en la resistencia y/o capacidad de deformación, sin alterar la respuesta global de la estructura.
	Reducción de la sección transversal de ciertos componentes.	Aumentar la flexibilidad de los componentes y brindar mayor capacidad de deformación lateral.
Eliminación o mitigación de irregularidades o discontinuidades		
Deficiencia	Técnica /Estrategia	Alcances de la técnica
Irregularidades de rigidez, resistencia y masa que causan desempeño sísmico inadecuado	Eliminación de entrepisos débiles o suaves y adición de marcos, muros o contraventeos	Eliminar la irregularidad sin generar concentraciones de desplazamientos y equilibrar la distribución de rigidez y masa en el entrepiso
	Demolición de porciones de la estructura que causen irregularidad	
	Elaboración de juntas constructivas para dividir el edificio irregular en varios cuerpos regulares separados entre sí.	Mitigar la irregularidad y evitar el golpeteo entre estructuras
Rigidización global de la estructura		
Deficiencia	Técnica /Estrategia	Alcances de la técnica
Desplazamientos calculados superiores a los límites máximos establecidos por la normatividad. Elementos y componentes sin capacidad de deformación inelástica ante demanda sísmica	Construcción de nuevos muros o contraventeos. Encamisado de columnas.	Aumento en la capacidad de deformación inelástica.
Reforzamiento global de la estructura		
Deficiencia	Técnica /Estrategia	Alcances de la técnica
Resistencia baja y comportamiento lateral inelástico ante movimientos pequeños en el edificio existente	Adición de muros o contraventeos, refuerzo de marcos resistentes a momento.	Aumento en la resistencia del edificio.
Eliminación o corrección de problemas causados por la interacción de edificios		
Deficiencia	Técnica /Estrategia	Alcances de la técnica
Golpeteo entre estructuras contiguas	Unión de edificios cuya separación entre ellos sea pequeña.	Evitar el impacto entre edificios vecinos que pueda llegar a afectar a los elementos estructurales.
	Diseño y construcción de elementos capaces de resistir y transmitir el impacto del edificio vecino sin afectar elementos resistentes a cargas verticales.	
	Empleo de elementos de neopreno y reforzamiento local de ambas estructuras.	

Reducción de la masa reactiva		
Deficiencia	Técnica /Estrategia	Alcances de la técnica
Comportamiento inadecuado de la estructura ante sismo, debido al exceso de masa en la estructura	Retiro de tanques de agua, equipo o bodegas, demolición de apéndices, reemplazo de fachadas y muros divisorios pesados.	Reducción de la demanda de fuerza y deformación producida por el sismo.

Adición de elementos de control de la respuesta		
Deficiencia	Técnica /Estrategia	Alcances de la técnica
Control de los desplazamientos de la estructura ante eventos sísmicos	Aislamiento de base. Elementos disipadores de energía (de tipo histerético, viscoelástico, de fricción).	Aumento del amortiguamiento de la estructura. Mayor control sobre la respuesta estructural del inmueble.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN DE MUROS DE MAMPOSTERÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se abordan distintas técnicas de rehabilitación para muros de mampostería. Inicialmente se mencionan procedimientos constructivos tales como la reparación de grietas o la adición de elementos de confinamiento, que resultan relevantes, y en su mayoría indispensables para poder ejecutar de manera adecuada las distintas técnicas de rehabilitación.

Entre las técnicas que se abordan en este capítulo se encuentra el encamisado con malla de alambre soldado recubierta con mortero o concreto, la cual ha sido la técnica más empleada en México, hasta la actualidad. También se incluyen técnicas basadas en el encamisado con bandas y placas; bajo esta clasificación se estudian las bandas y placas de acero, las bandas de polipropileno, los polímeros reforzados con fibras (PRF) y los textiles estructurales. Adicionalmente, se aborda de manera breve el encamisado de muros con morteros especiales con fibras. De cada técnica se hace una descripción y revisión de la metodología de implantación; asimismo, se incluye la revisión de la literatura asociada a cada técnica.

Al finalizar el capítulo se realiza un análisis comparativo de costos de implantación de las técnicas anteriormente mencionadas.

3.2 REPARACIÓN DE GRIETAS

La presencia de fisuras y grietas en la mampostería es la muestra más evidente de la existencia de daño. Es importante llevar a cabo una adecuada reparación de grietas, para evitar que ante un futuro evento sísmico las grietas vuelvan a formarse, generando daño más severo en los muros y degradando la resistencia y rigidez de la estructura.

De manera general, la reparación de grietas consta de cerrar o rellenar las grietas presentes en la mampostería (e incluso en los elementos de confinamiento) con materiales similares a los originales. Existen dos tipos de reparación de grietas: inyección y rajuelo. La aplicación de cada tipo dependerá, entre otros factores, del tamaño de la grieta.

3.2.1 Inyección

Este tipo de reparación consiste en el relleno de grietas con materiales como resina epoxi, morteros epóxicos o morteros fluidos de cemento sin contracción (con consistencia de lechada). Esto es aplicable a muros hechos a base de piezas sólidas, con bajo número de grietas, que además se encuentren bien definidas.

De acuerdo con las NTC-Mampostería (2017), no se permite la inyección por el método de vacío. Los fluidos empleados para la inyección deben fluir correctamente a través de las grietas y vacíos, sin aumentar la segregación, sangrado y contracción plástica.

Como parte del proceso general para llevar a cabo una inyección de grietas es necesario tomar en cuenta los siguientes puntos:

1. Limpiar las grietas. Es necesario retirar fragmentos, residuos de polvo, partículas y material suelto. El interior de las grietas puede limpiarse a través de un chorro de agua limpia. Es necesario retirar el acabo del muro cuando menos en 30 cm adyacentes a la grieta.
2. Sellar las grietas y colocar las boquillas para la inyección. Es recomendable que la separación entre boquillas sea equivalente al espesor del muro; sin embargo, esto está en función del material (resina o lechada) que se utilice para la inyección.

Una vez que los puntos anteriormente mencionados se hayan llevado a cabo, el resto del proceso dependerá del tipo de material a inyectar.

De acuerdo con la tabla 6.3.1 de INIFED (2021a), la cual se muestra como tabla 6, los muros de mampostería reparados pueden recuperar parte de sus propiedades estructurales (resistencia, rigidez y ductilidad) según el material empleado para la inyección.

Tabla 6. Niveles de recuperación de la capacidad de elementos reparados (INIFED,2021).

Material	Ancho de grieta (mm)	Nivel de recuperación %		
		Resistencia	Rigidez	Ductilidad
Resina epoxi	0.05 – 1.0	70 – 90	30 – 80	75 – 90
Lechada	1.0 – 5.0	70 – 90	50 – 80	70 – 90
Mortero epóxico	>0.5	70 – 90	30 – 80	75 – 90
Mortero de cemento		80 – 120	50 – 100	80 – 90

Inyección con morteros de cemento

Los morteros de cemento inyectables deben tener una consistencia de lechada o bien, de mortero fluido para que puedan ser fácilmente inyectables y brinden una adecuada estabilidad a la zona que debe repararse. Con este tipo de material pueden ser inyectadas grietas desde 1 hasta 12 mm de ancho. En la figura 14 pueden observarse imágenes relativas a la inyección de grietas mediante morteros de cemento.

Una vez que se llevó a cabo el proceso de limpieza de grietas, deben hacerse barrenos a lo largo de las grietas, para posteriormente colocar ahí las boquillas. La separación entre boquillas debe ser entre 70 y 300 mm; la separación dependerá del ancho y la rugosidad de la grieta. Después de que las boquillas son colocadas, es necesario limpiar nuevamente la superficie y retirar el polvo y material suelto. Posteriormente se sellan las grietas con algún material de fraguado rápido que resista la presión de inyección.

Se recomienda que la inyección se realice a presiones de 0.5 a 1 kg/cm² (0.05 a 0.1 MPa); sin embargo, esto dependerá del nivel de daño en el muro y la calidad de las piezas.



Figura 14. Preparación del muro para inyección de grietas (izq.) e inyección de grietas con mortero de cemento (der.) (Archivo fotográfico proyecto ConTex, 2018).

Inyección con resinas y morteros epóxicos

Para lograr una inyección de resinas o mortero epóxicos exitosa es esencial contar con una viscosidad adecuada del producto. La viscosidad debe adaptarse al tamaño del ancho de las grietas y la absorción de las piezas. Este tipo de materiales poseen altas resistencias a tensión (300 a 500 kg/cm²). El ancho mínimo para inyectar grietas a presión con estos materiales es de 0.05 mm; por gravedad el ancho mínimo es de 0.3 mm.

Al realizar la inyección a presión, ésta deberá llevarse a cabo de abajo hacia arriba a lo largo de la grieta. Una vez que la resina salga por la boquilla inmediata superior se supondrá que el proceso de inyección fue exitoso, y podrá continuarse el proceso con las superiores siguientes, de manera consecutiva.

3.2.2 Rajueleo

Esta técnica es aplicable a estructuras con daño considerado como severo y muy grave, para grietas con un ancho mayor que 5 mm. La técnica consiste en sustituir los materiales dañados por materiales nuevos (piezas, concreto, mortero), con características lo más similares posibles a los materiales originales.

Durante el desarrollo de esta técnica debe vigilarse que exista una buena adherencia entre los materiales existentes y los nuevos. Las rajuelas deben acuñarse y pegarse con mortero tipo I. Es necesario humedecer las superficies que estarán en contacto con el mortero antes de colocarlo. Es recomendable utilizar fibra de vidrio, de polipropileno o algún aditivo estabilizador de volumen en el mortero de pega para controlar los cambios volumétricos y la contracción por secado que pueda sufrir.

Es necesario emplear materiales del mismo tipo y con una resistencia mayor o igual a la del material original, de lo contrario, al emplear materiales con propiedades muy distintas podrían presentarse concentraciones de esfuerzos que dañen la estructura (SMIE, 2019). La calidad en la ejecución de esta técnica será determinante para conocer su eficiencia.

En la figura 15 se muestra, a la izquierda, un muro reparado de manera adecuada mediante rajuelas, mientras que en la figura de la derecha se observa una ejecución incorrecta de la técnica, pues se observa que no fueron utilizadas piezas similares a las

originales para el rajueleo, la grieta fue rellanada con una mezcla de mortero y pedacería de concreto y mampostería.



Figura 15. Muro reparado mediante rajuelas, de manera adecuada (izq.) y de manera inadecuada (der.) (Archivo fotográfico proyecto ConTex, 2018).

3.3 REPARACIÓN Y/O ADICIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO

Reparación y/o sustitución

Los castillos son considerados como elementos de confinamiento vertical en los muros de mampostería, mientras que a las dalas se les consideran como elementos de confinamiento horizontal. Es común que estos elementos lleguen a presentar daños en conjunto con la mampostería, ya que, estos también aportan resistencia a la estructura ante las distintas fuerzas incidentes en ella.

Es esencial, que, para la reparación de elementos dañados, se utilicen materiales del mismo tipo y características, y con la misma o mayor resistencia que los materiales originales. La sustitución con materiales de propiedades diferentes puede llegar a generar concentraciones de esfuerzos que dañen la estructura, generando así un efecto contraproducente con la rehabilitación.

De acuerdo con INIFED (2021a), el desempeño de la reparación de los elementos dañados dependerá, principalmente, de la magnitud del daño y la calidad de la ejecución. En la evaluación y en el análisis estructural de la reparación debe considerarse el nivel de restitución de la capacidad estructural que sea factible alcanzar para cubrir la deficiencia que se esté presentando. En la figura 16 se muestran daños observados en elementos de confinamiento de estructuras de mampostería.



Figura 16. Daños en elementos de confinamiento (Archivo fotográfico proyecto ConTex, 2018).

Para llevar a cabo la reparación de elementos como castillos y/o dalas, INIFED (2021a) sugiere llevar a cabo el siguiente procedimiento constructivo:

1. Apuntalar la estructura, en caso de ser necesario, para poder maniobrar de manera segura.
2. Retirar manualmente las partes flojas o mal adheridas, sin dañar el acero de refuerzo.
3. Preparar y limpiar la superficie de concreto endurecido, así como la del acero de refuerzo, para posteriormente permitir la unión entre el concreto nuevo y el endurecido. El acero de refuerzo debe ser limpiado con cerdas metálicas, y en caso de que se genere desprendimiento de las corrugaciones debido a oxidación, será necesario sustituir el acero.
4. Si el acero de refuerzo presenta fractura o pandeo, es necesario unir la barra existente con una nueva mediante soldadura o traslape.
5. Limpiar y humedecer la superficie del concreto endurecido un día antes de hacer la reparación con concreto nuevo o con mortero cemento-arena 1:3 o tipo I. Al añadir el concreto o el mortero deberá darse un acabado parejo.
6. Curado. Tres horas después del resane deberá iniciarse el curado. Para esto debe humedecerse la superficie reparada con agua limpia, esto cada hora durante un periodo de tres días como mínimo.



Figura 17. Reparación de elementos de confinamiento (Archivo fotográfico proyecto ConTex, 2018)

Adición de elementos

En caso de que se busque rehabilitar una estructura que no cuente con elementos de confinamiento (castillos y dalas), como es el caso de la mampostería simple, o bien, porque los elementos que posee no cuentan con las características apropiadas (diseño, detallado, dimensiones, ubicación) para brindar un adecuado comportamiento a la estructura, es necesario considerar la adición de estos elementos dentro del proyecto de rehabilitación.

Los elementos de confinamiento, y en específico, los castillos no sólo contribuyen al incremento en la capacidad de desplazamiento lateral y a la estabilidad de las estructuras, sino que aportan también a la capacidad de resistencia de carga vertical de modo notable (Alcocer, 1997). Por esto es relevante el tomar en cuenta la adición de estos elementos en los proyectos de rehabilitación que así lo requieran.

Para la adición de dalas y castillos deben tomarse en cuenta los requisitos de diseño, análisis y construcción establecidos en las NTC-Concreto (2017) y NTC-Mampostería (2017).

Para la construcción de nuevos castillos deberá seguirse el siguiente procedimiento:

1. Abrir un espacio vertical en toda la altura del muro, tomando en cuenta las dimensiones calculadas del castillo.
2. Preparar el borde vertical del muro que estará en contacto con el concreto nuevo del castillo. Deberá además hacerse un dentado en la mampostería que tenga una amplitud entre valle y cresta de al menos 50 mm.
3. Colocar el nuevo refuerzo longitudinal del castillo de manera que quede anclado a la cimentación (en caso de que aplique) y a la dala (si existe) o a la losa de entrepiso. El anclaje con la cimentación se puede realizar mediante resina epóxica o mediante traslape de barras. Para anclar el refuerzo longitudinal de los castillos con las losas de entrepiso se puede a) atravesar la losa para darle continuidad al refuerzo en la altura o b) mediante un gancho a 90 grados.
4. Habilitar la cimbra para el colado.
5. Colocar el concreto por capas. Se recomienda construir el castillo por mitades, para asegurar una buena compactación del concreto, y así, evitar oquedades.
6. Proseguir con los procedimientos de fraguado.

Para la construcción de nuevas dalas el proceso sugerido es el siguiente:

1. Apuntalar el sistema de piso.
2. Retirar el número de hiladas para lograr un peralte de la dala de al menos 140 mm.
3. Preparar la cara inferior de la losa de entrepiso que estará en contacto con el nuevo concreto de la dala.
4. Colocar el acero de refuerzo longitudinal de la dala y anclarlo con el acero de refuerzo longitudinal del castillo.
5. Colocar el concreto a través de ranuras (también llamadas “ventanas de colado”) en la losa, utilizando una cimbra con resbaladilla.

La construcción de dalas es compleja y laboriosa; se recomienda aprovechar la losa como elemento de confinamiento. En la figura 18 se observa la adición de elementos de confinamiento en un muro de mampostería.



Figura 18. Adición de elementos de confinamiento en muros de mampostería. (Archivo fotográfico proyecto ConTex, 2018).

3.4 ENCAMISADO CON MALLA DE ALAMBRE SOLDADO

Debido al desempeño y comportamiento observado en las estructuras, ya sea a base de mampostería confinada, reforzada o simple, durante la ocurrencia de sismos, ha surgido desde hace algunos años la necesidad de estudiar experimentalmente técnicas que logren mejorar el comportamiento de la estructura original. Lo anterior a través del análisis de variables que permitan conocer los cambios en la rigidez, resistencia, capacidad de deformación inelástica y de disipación de energía de la estructura rehabilitada. En el caso particular de las estructuras de mampostería, la técnica de encamisado con malla de alambre soldado ha sido una de las más empleadas y estudiadas en México, puesto que diversos ensayos en laboratorio han demostrado su eficiencia, además de ser una técnica económica y asequible en términos de materiales y mano de obra.

Los edificios que pueden ser rehabilitados mediante encamisado con malla de alambre soldado para mejorar su desempeño sísmico son:

- a) Edificios de marcos resistentes a momento, de concreto o acero, con muros diafragma, con o sin daño, cuya falla puede afectar el desempeño sísmico de todo el edificio.
- b) Edificios a base de muros de carpa de mampostería, con o sin daño.

3.4.1 Descripción de la técnica

Consiste en el aumento de la sección transversal de un muro estructural de mampostería mediante la colocación de mallas de alambre soldado cubiertas con varios centímetros de mortero de cemento o de concreto, colocados de manera manual o mediante lanzado. El encamisado puede ser completo, si rodea a todo el muro, o parcial, si sólo cubre una cara. Es usual que el encamisado se aplique solamente en una cara del muro, como en aquellos de colindancia en los cuales no se tenga acceso por el exterior. Esta técnica puede ser utilizada en muros con cualquier nivel de daño, como reparación o en muros sin daño previo, a manera de reforzamiento.

Esta técnica tiene como objetivo mejorar el comportamiento de los muros ante cargas sísmicas a través de:

- Incrementar la resistencia a fuerza cortante.
- Aumentar la capacidad de deformación inelástica.
- Aumentar la rigidez.
- Incrementar la capacidad a flexocompresión del muro cuando se añaden castillos en los extremos para anclar la malla.

3.4.2 Revisión de la literatura

A continuación, se describen, en orden cronológico, los programas experimentales de los cuales se obtuvo la información de la base de datos relativa a la técnica de encamisado con malla de alambre soldado y mortero o concreto.

J. Ruiz, T. Sánchez y S. Alcocer (1995): Como continuación de un programa de investigación sobre la seguridad estructural de la vivienda económica en México, se llevó a cabo el ensaye destructivo de una estructura tridimensional de dos niveles a escala real que fue construida a base de mampostería confinada con piezas macizas de barro recocido. El modelo original (Sánchez y Alcocer, 1993) fue ensayado hasta presentar un agrietamiento por cortante considerable. El modelo fue rehabilitado con malla de alambre soldado y mortero hasta llevarse a la falla. Variables como la cuantía y densidad del acero de refuerzo fueron consideradas para demostrar el incremento en la capacidad ante cargas laterales. Se concluyó que la técnica de rehabilitación permitió recuperar 2/3 de la rigidez inicial. Tanto en el espécimen original (3D) como en el rehabilitado (3D-R), la resistencia ante cargas laterales calculada en ese momento con la normatividad vigente (DDF,1993) y considerando un factor de resistencia unitario, fue superada por la obtenida de los ensayes de laboratorio en 1.36 y 2.32 veces, respectivamente. En términos de la capacidad de desplazamiento, se observó que la participación de los alambres horizontales de la malla permitió al modelo 3D-R incrementar la capacidad de desplazamiento. El modelo 3D-R alcanzó su resistencia a una distorsión del primer nivel de 0.94%, mientras que en el modelo 3D alcanzó su resistencia a una distorsión de 0.36%. En la figura 19 se muestran las curvas de comportamiento asociadas a cada modelo ensayado.

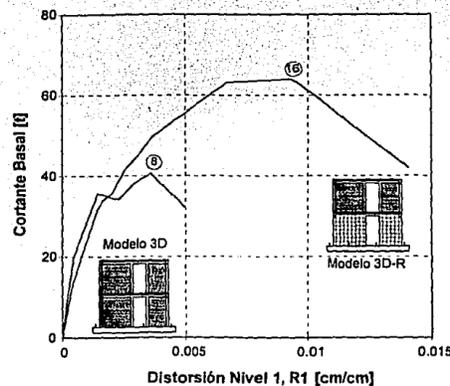


Figura 19. Curvas de comportamiento de los modelos 3D y 3D-R (Ruiz, et al., 1995).

J. Pineda, J. Zepeda y S. Alcocer (1996): Se ensayaron tres muros de mampostería confinada a base de piezas macizas de barro recocido considerando como variable principal las cuantías de acero proporcionadas por el calibre de la malla de alambre soldado; los modelos fueron reforzados por ambas caras con mallas con cuantías de 0.072%, 0.147% y 0.211%. Del ensaye se logró determinar que el incremento en la resistencia no fue proporcional a la cuantía utilizada. Se propuso usar un factor de eficiencia que modifica la contribución nominal de la malla a la resistencia a cortante. Este concepto se introdujo en la versión 2004 de las NTC-Mampostería y sigue vigente a la fecha con algunas modificaciones. Se observó que el mortero del encamisado contribuyó de manera importante a la resistencia a cortante y a la rigidez de los muros, su contribución se pudo estimar cercana a 50% de la correspondiente a la mampostería. En la figura 20 se muestra el patrón de agrietamiento y la curva de histéresis de cada espécimen ensayado.

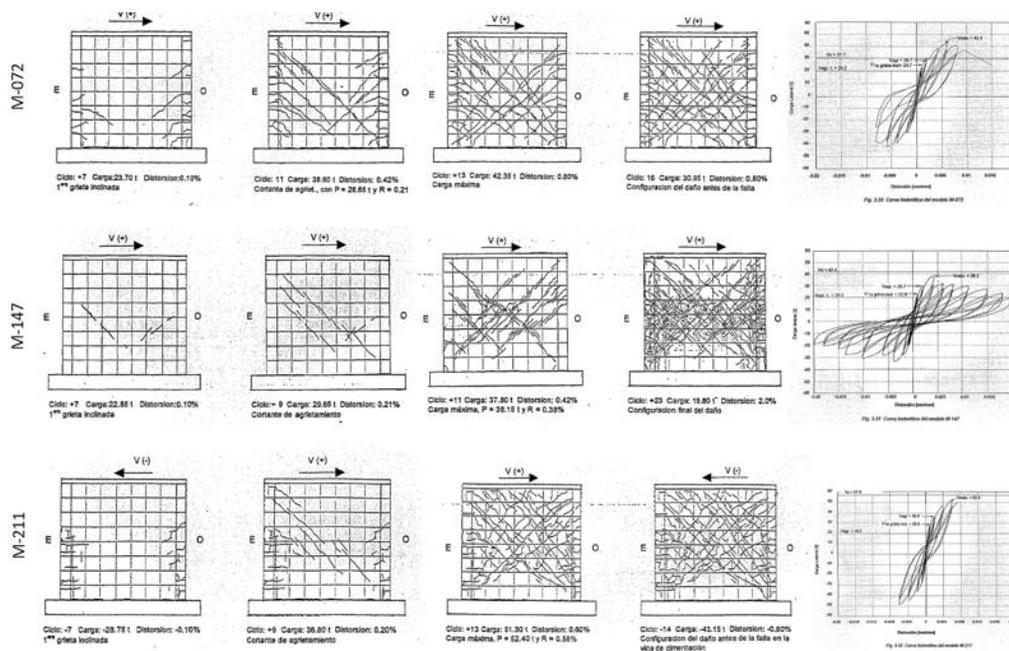


Figura 20. Patrón de agrietamiento y curvas de histéresis de cada espécimen ensayado (Pineda, et al., 1996).

L. Flores, J. Marcelino, G. Lazalde y S. Alcocer (1999): El proyecto se dividió en dos partes. En la primera se construyeron y ensayaron 15 muretes de 80 cm por lado a los que se les ancló una malla de alambre soldado. El ensaye consistió en la aplicación de fuerza cortante en el plano de la malla sobre los anclajes que la sujetaban a la mampostería. Las variables fueron el tipo de anclaje utilizado, y la presencia o ausencia de recubrimiento de concreto. Con la información obtenida, se diseñó el ensaye de cuatro modelos marco-muro diafragma a escala real a base de block de concreto hueco que fueron sometidos a fuerzas horizontales cíclicas alternadas. El primer modelo fue de control, y representó una estructura original marco-muro diafragma sin rehabilitación; los tres restantes fueron reforzados con una malla de alambre soldado en una cara y un recubrimiento de concreto de 9 cm de espesor. Las variables de estudio fueron el tipo y distribución de los anclajes. Se concluyó que, debido a la alta adherencia entre recubrimiento y el muro diafragma de mampostería, no era necesario colocar conectores

en la mampostería. Sin embargo, es fundamental el diseño cuidadoso del anclaje ubicado en los elementos del marco de concreto. La falla inició al aplastarse el muro diafragma de mampostería, lo que provocó una redistribución de esfuerzos cortantes entre el recubrimiento y la estructura original. Esto a su vez, incrementó las demandas de corte sobre los conectores colocados en la viga y columnas del marco de concreto hasta alcanzar su capacidad de carga. Finalmente, la conexión falló, dando lugar a una brusca caída de la capacidad resistente de los especímenes. En la figura 21 se muestran distintas etapas del programa experimental, así como las envolventes de respuesta de los muros ensayados. El modelo TO se refiere al original (sin recubrimiento), que fue usado como modelo de control. TP y TD fueron los modelos con recubrimiento de concreto con conectores distribuidos en el perímetro (sobre el marco de concreto) y distribuidos uniformemente en el marco-muro. Para estos modelos los conectores constaron de barras corrugadas de acero colocadas mediante la inyección de resina epóxica en barrenos previamente realizados. Para el modelo TH se emplearon conectores Hilti (clavos) instalados mediante un dispositivo de potencia controlada, distribuidos sobre el marco-muro.

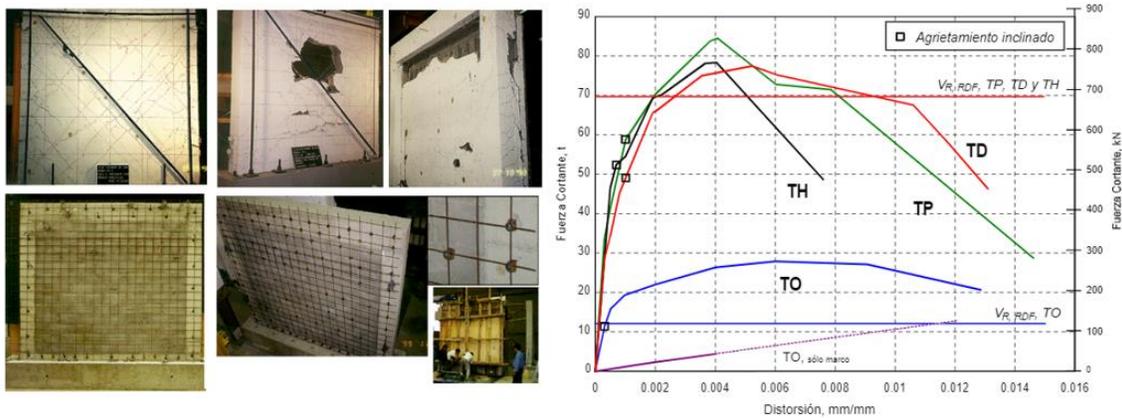


Figura 21. Ensayo experimental de muros TO, TH, TP y TD (Flores, et al., 1999).

A. San Bartolomé y A. Morán (2003): Se rehabilitó un muro de mampostería confinada hecho con mampostería multiperforada, fallado previamente por fuerza cortante, cuyas grietas de mayor tamaño (mayores que 5 mm) fueron reparadas mediante inyección de mortero. El muro se encamisó por ambas caras con malla de alambre soldado de calibre 6x6-6/6, la cual fue anclada mediante conectores que atravesaron todo el espesor del muro. El muro contó con un recubrimiento a base de mortero de cemento con espesor de 2.5 cm en cada cara. La resistencia lateral del muro rehabilitado fue 40% mayor que la medida en el muro original, en términos de rigidez, la rigidez lateral elástica del muro rehabilitado alcanzó 85% de la rigidez lateral elástica del muro original. Se consideró que la recuperación no fue completa debido a que las pequeñas fisuras en el muro no fueron reparadas, únicamente se repararon las grietas mayores que 5 mm. La falla del muro original se dio por fuerza cortante, mientras que el muro rehabilitado falló por flexión, generando un deslizamiento aunado al pandeo del refuerzo vertical en la base de las columnas, presentando un desplazamiento final de 18 mm. En la figura 22 se observan distintas etapas de la construcción de la rehabilitación, así como las envolventes de respuesta.

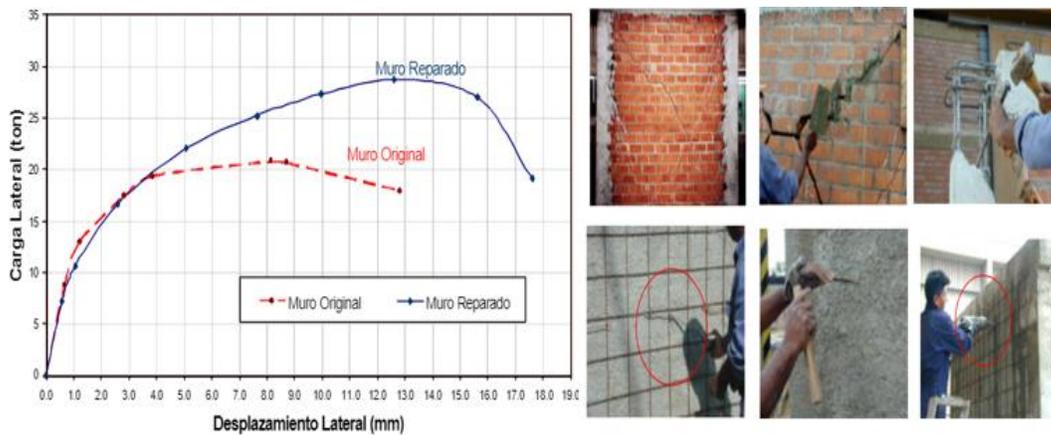


Figura 22. Ensayo experimental del muro M1 (San Bartolomé, et al.,2003).

L. Flores, M. Ríos y C. Reyes (2004): Dos muros de mampostería confinada a base de piezas macizas de barro recocido, con una abertura en forma de ventana fueron ensayados ante fuerzas horizontales cíclicas hasta llevarse a un nivel de daño severo, con grietas de más de 10 mm en la mampostería y daño en los castillos. El objetivo principal del estudio fue incursionar con mayor profundidad en la aplicación de la técnica verificando, en particular, el comportamiento de muros con aberturas, y el detallado necesario para rodear los extremos de las aberturas con la malla. El primer espécimen (MV-1R) no contó con confinamiento alrededor de la abertura, mientras que el segundo espécimen (MV-2R) sí. Como parte de la rehabilitación se repararon los castillos y las grietas de más de 3 mm de ancho de la mampostería, se repararon mediante relleno con mortero de cemento. Posteriormente se colocó malla de calibre 6x6-10/10 en el muro, y se rodearon los bordes de este, así como los bordes de la abertura. Este refuerzo se colocó en ambas caras del muro. La malla se cubrió con una capa de mortero con espesor de 2.5 cm. Dado el daño en los muros, en el estudio se supuso una recuperación de al menos 50% de la resistencia original con la reparación de grietas y castillos. Después del ensayo se observó que la presencia del refuerzo en la abertura evitó la aparición de grietas que para el caso de MV-1R generaron la falla súbita.

La técnica de rehabilitación permitió aumentar de manera considerable la rigidez, resistencia (3.9 veces en MV-1R y 2.6 veces para MV-2R) y la capacidad de deformación de los muros, a pesar de que al llegar a la distorsión de fractura de los alambres la capacidad cayó súbitamente. En la figura 23 se muestran el patrón final de agrietamiento en los muros, así como la curva de comportamiento de los mismos respecto a los muros originales (sin rehabilitación). Se concluyó que la técnica de encamisado con malla de alambre soldado y mortero puede ser aplicable a muros con aberturas que carecen de refuerzo (castillos y dalas), no obstante, estas aberturas deben ser rodeadas por la malla de alambre soldado.

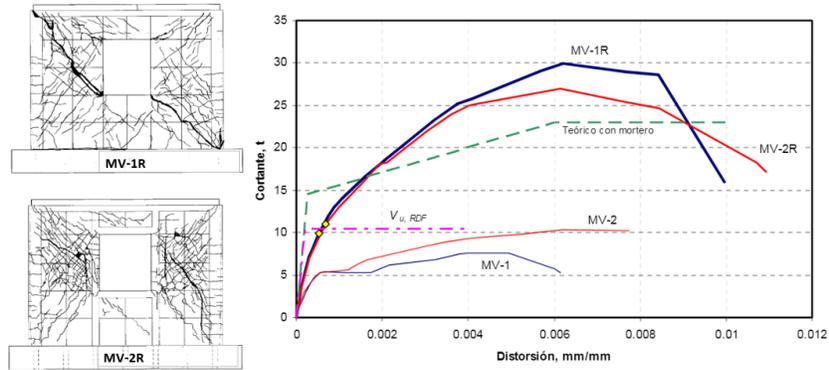


Figura 23. Patrón final de agrietamiento y envoltorio de respuesta de MV-1R y MV-2R (Flores, 2004).

J. Marcelino y S. Alcocer (2004): El objetivo principal de este estudio fue determinar la efectividad de la aplicación del encamisado con malla de alambre soldado para la rehabilitación de viviendas de mampostería confinada a base de tabiques de concreto. Dos muros de mampostería fueron ensayados hasta su falla, para posteriormente ser ensayados considerando su rehabilitación mediante malla de alambre soldado y mortero. Una de las principales variables de estudio fue la influencia de la limpieza del muro ya que, en uno de ellos, se realizó la limpieza correspondiente previa al encamisado, mientras que en el muro restante se dejó la capa de yeso original. Al finalizar el ensaye se midieron incrementos muy significativos de la resistencia a la carga lateral, siendo estos de 5.4 y 3, en los especímenes MRA-1R (muro con limpieza previa) y MRA-2R (muro sin limpieza previa), respectivamente. Los autores comentan que estos aumentos pueden ser atribuibles a las propiedades mecánicas de los materiales (considerando mampostería de baja calidad) utilizados en la construcción de modelos y al cambio de modo de falla de los modelos. Si bien, estaba prevista que la falla ocurriera por tensión diagonal, involucrando la plastificación e incluso fractura de los alambres de la malla de refuerzo, sin embargo, la falla ocurrió por deslizamiento en ambos muros.

En la figura 24 se muestran los patrones de agrietamiento y las curvas de comportamiento de cada espécimen ensayado.

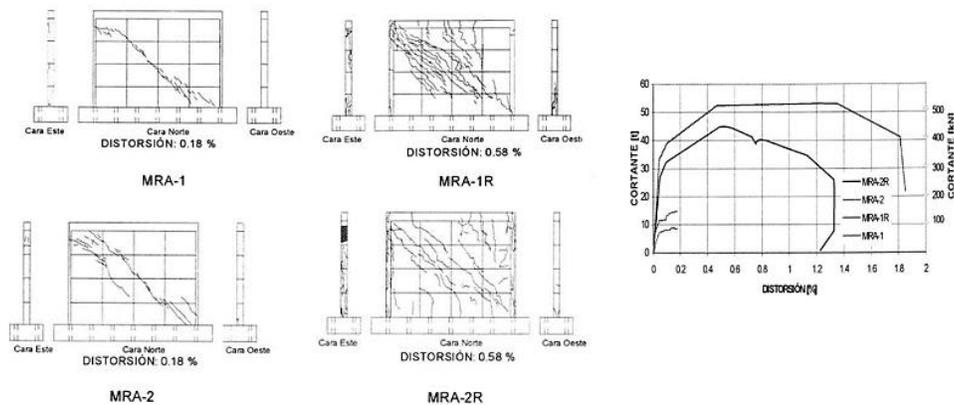


Figura 24. Patrón de agrietamiento y curvas de comportamiento de los especímenes ensayados (Marcelino, 2004).

J. Solano y R. Acuña (2009): Cuatro especímenes hechos a base de un sistema de mampostería reforzada interiormente con block de concreto hueco, (propia de los sistemas más empleados en Costa Rica) se ensayaron con el fin de determinar experimentalmente la resistencia a cortante en muros de mampostería de bloques huecos de concreto reforzados con malla de alambre soldado y recubrimiento de mortero para comprobar la efectividad del refuerzo en restituir la capacidad original de los muros y añadir resistencia extra a cortante en los mismos. Las variables en estudio fueron la distribución del acero de refuerzo interno, el número de caras reforzadas con malla y mortero, la cantidad y distribución del anclaje sobre la malla, y la influencia del daño previo, ya que algunos muros se ensayaron para obtener daño previo y ser reparadas posteriormente, mientras que otros modelos se ensayaron sin daño previo. Los especímenes no fueron sometidos a carga axial, con excepción de las que produjo su peso propio; el ensaye se basó en la aplicación de carga cíclica lateral. Un factor importante a considerar fue la ocurrencia de un fuerte evento sísmico real durante el programa experimental, por lo que se estima que uno de los especímenes que se encontraba anclado al marco de reacción pudo resultar afectado. En la figura 25 se muestran los patrones de agrietamiento y las curvas de comportamiento histerético década espécimen.

Los resultados obtenidos para los muros reforzados con malla de alambre soldado y mortero no fueron concluyentes para estimar el aporte total del encamisado a la resistencia a cortante, debido a que se presentó la falla por flexión mucho antes del valor de falla por cortante esperado.

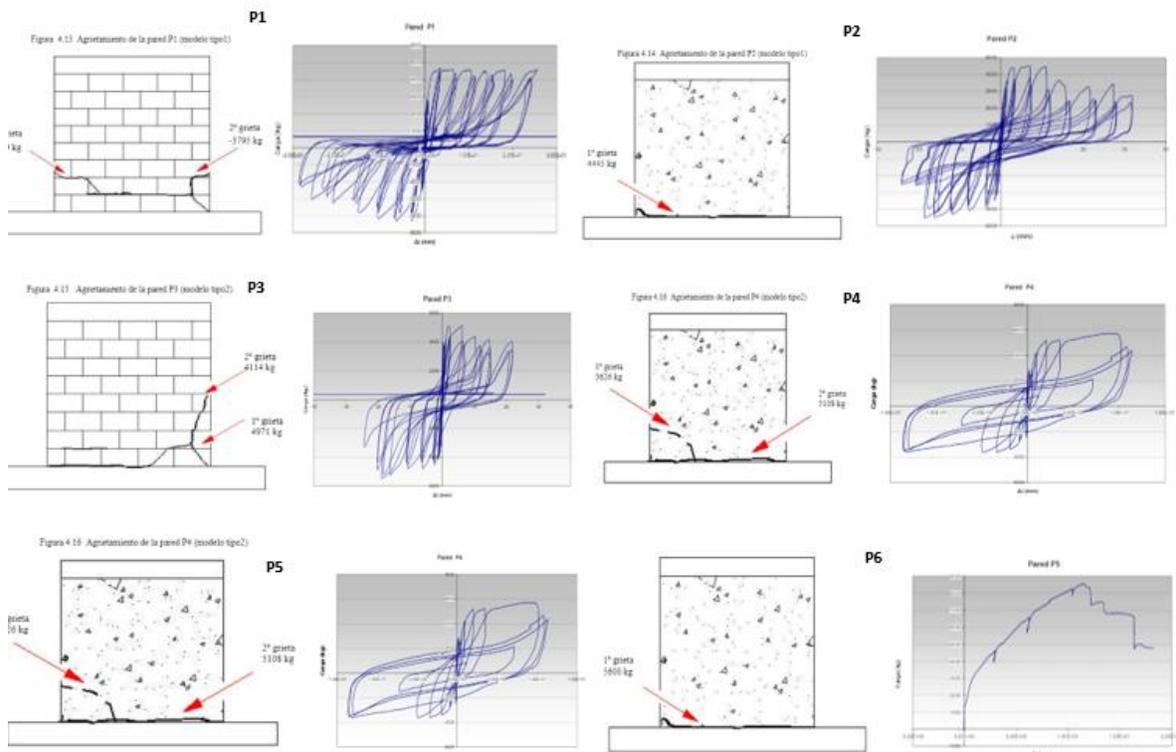


Figura 25. Patrones de agrietamiento y curvas de comportamiento histerético de los especímenes analizados (Solano, 2009).

A. San Bartolomé, K. Barr y C. Pineda (2011): El estudio realizado formó parte de la continuación de un ensaye con el objetivo de controlar parcialmente la trituración de ladrillos huecos mediante la adición de refuerzo horizontal, sin embargo, durante el ensaye se observó que el problema de trituración persistió, por lo que se optó a evaluar el comportamiento considerando la colocación de malla de alambre soldado. Para el estudio se ensayaron dos muros de mampostería confinada, construidos a escala natural, ambos con los mismos materiales, mano de obra y especificaciones, pero con la única diferencia de que en uno de ellos se colocó una malla de alambre soldado y una capa de mortero por ambas caras. Ambos muros se ensayaron bajo carga lateral cíclica controlado por desplazamiento lateral. Para la construcción de los muros se emplearon piezas industriales de arcilla con 46% de huecos. Para el encamisado se empleó malla de calibre 6x6-6/6 y para conectarla a la mampostería se empleó alambre de 3.2 mm colocado a cada 45 cm. La malla no fue anclada a los elementos de confinamiento. El modo de falla esperado en el muro fue por cortante en el muro M1, mientras que en el M2 no se definió un modo de falla esperado dado que se desconoció la aportación del encamisado al muro. Finalmente, el muro de control (M1) tuvo una falla por corte y aplastamiento en las piezas, mientras que el M2 (rehabilitado) presentó una falla por flexión y agrietamiento vertical que separó un castillo del muro, lo anterior puede observarse en la figura 26. El encamisado con malla logró que la rigidez lateral inicial, la carga asociada al agrietamiento por flexión, la resistencia al agrietamiento diagonal y la resistencia máxima fueran 65%, 77%, 50% y 48% mayores respecto al muro de control (M1), respectivamente.

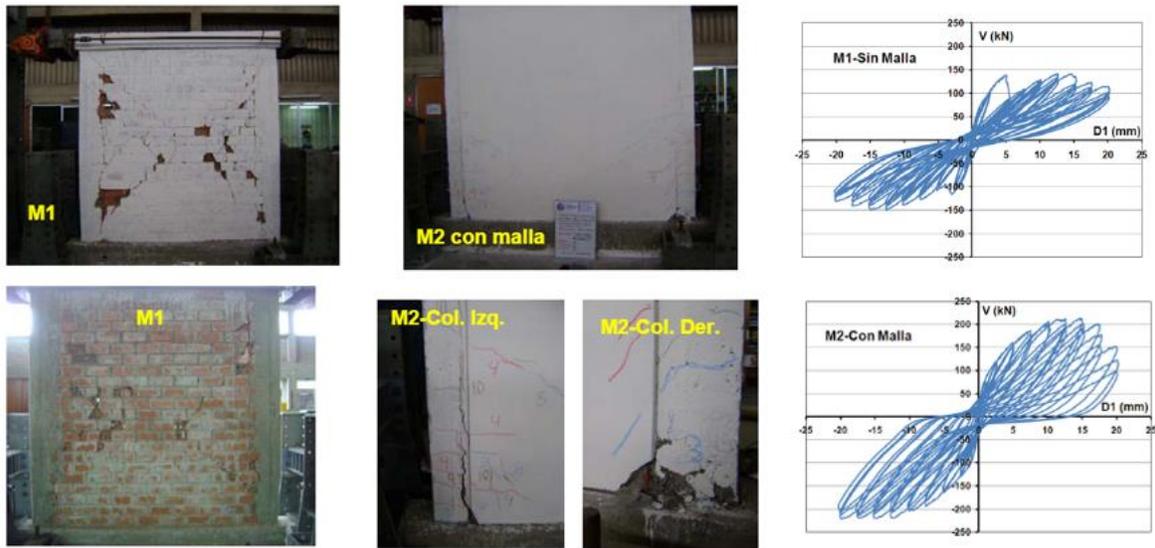


Figura 26. Estado final y curvas de histéresis de los muros ensayados (San Bartolomé, 2011).

T. Araoz, J. Velezmore, D. Quiun y A. San Bartolomé (2012). El estudio buscó analizar experimentalmente el desempeño de muros de mampostería confinada construidos con ladrillos tipo “pandereta” reforzados con malla de alambre soldado y recubiertos con mortero. Los ladrillos tipo “pandereta” se caracterizan por ser piezas industrializadas de arcilla con perforaciones (generalmente rectangulares) múltiples paralelas al sentido horizontal (largo) de la pieza. Este tipo de piezas es de uso común en la construcción de muros divisorios. Se uso es también común en viviendas debido a su bajo costo, sin

embargo, el empleo de este tipo de piezas para muros de carga se encuentra prohibido, debido a la fragilidad que tienen estas piezas ante los sismos. En la figura 27 se muestra la geometría de las piezas tipo “pandereta”. Se construyeron dos muros, a escala natural, denominados como M1 y M2, donde el segundo fue reforzado externamente con malla de alambre soldado durante su construcción. El ensaye al cual se sometieron los dos especímenes se dividió en dos partes. En la primera parte se aplicó cíclicamente un desplazamiento lateral previamente definido (20 mm). En la segunda parte se aplicaron desplazamientos laterales armónicos, con una amplitud de 15 mm y frecuencia de 2 Hz. Para añadir el refuerzo en el muro M2, se hicieron perforaciones con cincel en las piezas de mampostería para permitir el paso de los conectores (alambre de 8 mm de diámetro), colocados a cada 45 cm. Estos conectores fueron doblados a 90° y amarrados a las dos mallas con alambres de 16 mm (1/16 pulg). Respecto a la resistencia de los especímenes, no se logró llegar a una conclusión, ya que las cargas máximas en las ramas positivas y negativas fueron muy distintas entre sí, debido a la asimetría en el modo de falla entre ambos muros. En el espécimen M2 se presentaron deficiencias en el colado de los castillos, lo cual se supuso, tuvo gran influencia en el comportamiento final del espécimen. Finalmente, la rigidez lateral, la carga de agrietamiento por flexión, la carga de agrietamiento diagonal y la resistencia en M2 fueron 41%, 13%, 34% y 42% mayores que los valores obtenidos para M1, respectivamente.

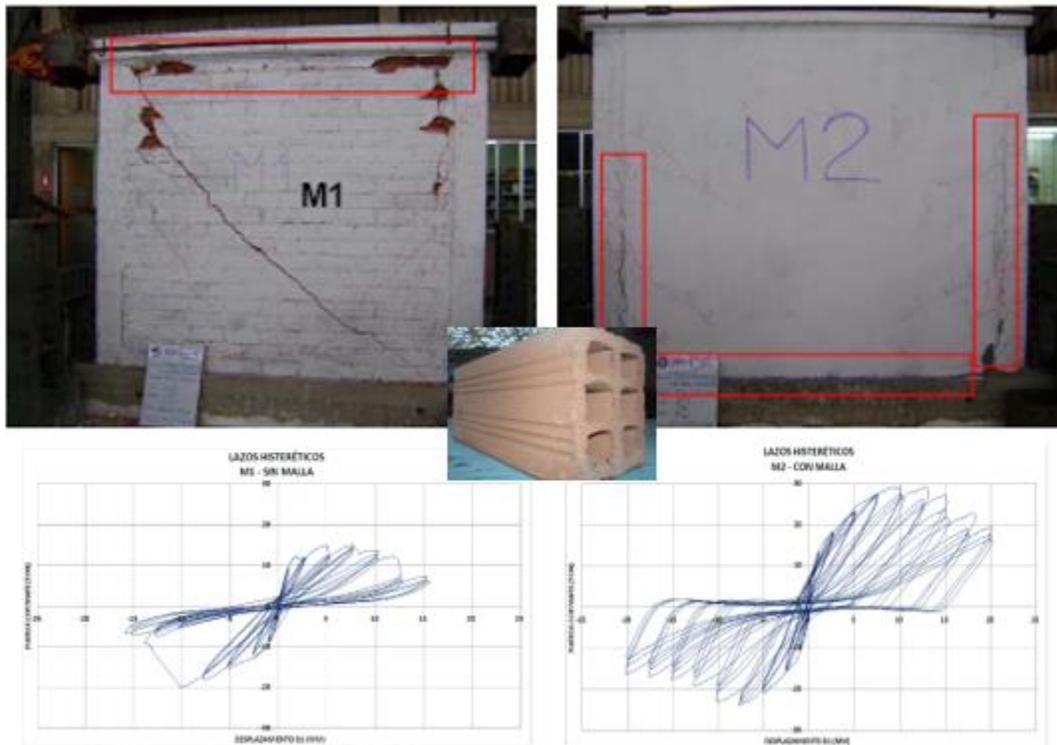


Figura 27. Estado final de los muros ensayados, curvas de comportamiento histerético y pieza de mampostería tipo “pandereta” (Araoz, et al., 2012)

S. Churilov y E. Dumova (2013): La investigación se dividió en dos etapas; la primera constó del ensaye de cuatro muros de mampostería simple, con distinta relación de aspecto, ante carga lateral cíclica, que posteriormente fueron rehabilitados empleando malla de alambre soldado y concreto, por ambas caras. La segunda etapa consistió en la evaluación analítica de distintos modelos de predicción del comportamiento de los muros rehabilitados. El objetivo de la investigación fue evaluar el comportamiento a fuerza cortante de los muros, así como estudiar el efecto de la rehabilitación en términos de resistencia, rigidez y disipación de energía. A su vez, se buscó estudiar el modelo de comportamiento que más se ajustara a los resultados experimentales. Durante el procedimiento constructivo de la rehabilitación se emplearon anclas hechas a base de barras de acero de 6 mm de diámetro. Adicionalmente, se soldaron sobre las anclas barras de acero de refuerzo para asegurar una distancia de separación de 15 mm entre la malla y la mampostería. Debido a la poca existencia de modelos que ayuden a analizar el comportamiento de un muro de mampostería encamisado con malla de alambre soldado y concreto, los autores exploraron el uso de diversos códigos de diseño para buscar el modelo que más se adaptara al comportamiento experimental observado; entre los códigos estudiados se encuentran el Eurocódigo-6, el código canadiense CSA S304.1-04, el código local en Macedonia PIOVSP'8, los modelos propuestos por Tomažević y los modelos de análisis empleados por el software FEDRA.

Al final del ensaye todos los muros de control fallaron por fuerza cortante, con la formación de grietas inclinadas a través de las juntas de mampostería, como se previó durante el análisis. Los muros rehabilitados exhibieron un modo de falla gobernado por flexión, en combinación con desprendimiento del encamisado (de 3-5 cm de separación). Los resultados obtenidos indicaron un incremento entre el doble y el triple de capacidad en los muros reforzados, respecto a los no reforzados. Se observó una influencia en la capacidad de los muros dada por el nivel de carga vertical aplicada en los especímenes. Los valores más altos de resistencia se obtuvieron para muros sometidos a un mayor nivel de carga vertical; a su vez, los muros con relación de aspecto más a cercana a la unidad mostraron también la mayor resistencia.

Con base en los modelos analíticos investigados y la comparación con los resultados experimentales, se concluyó que todos los modelos analíticos lograron predecir con éxito la resistencia de los muros rehabilitados, sin embargo, el modelo propuesto por Tomažević arrojó resultados más precisos respecto a lo obtenido experimentalmente.

En la figura 28 se muestran los especímenes rehabilitados, así como las envolventes de respuesta de los especímenes originales (a) y los especímenes rehabilitados (b).

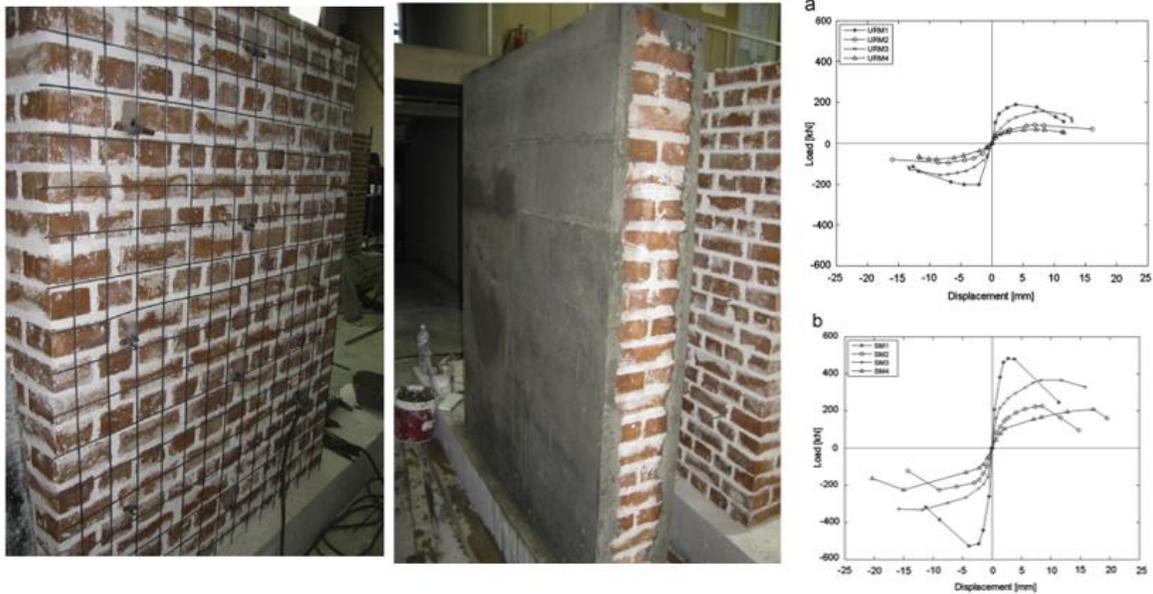


Figura 28. Empleo de la técnica de rehabilitación y curvas de comportamiento de los especímenes (Churilov y Dumova, 2013).

M. Díaz, C. Zavala, J. Gallardo y L. Lavado (2017). Dos muros, cuya variable principal de estudio fue el tipo de pieza de mampostería empleada (pieza de barro sólida y pieza de barro multiperforada) fueron ensayados y posteriormente rehabilitados con malla de alambre soldado con la finalidad de observar la efectividad de la técnica en correspondencia al tipo de pieza empleado. En la figura 29 se muestra el procedimiento constructivo de la técnica de rehabilitación en los muros de este estudio. Como parte de los resultados de este proyecto, se encontró que el aumento en la resistencia promedio a fuerza cortante debido al encamisado con malla de alambre es similar para piezas sólidas y piezas multiperforadas, debido, principalmente, a que se mantuvo el mismo espesor de la capa colocada para el encamisado. La resistencia alcanzada se incrementó en 53% y 84% en los muros hechos con piezas macizas y piezas multiperforadas, respectivamente. Por otra parte, la distorsión obtenida durante el cortante máximo se incrementó en 88% y 136% en los muros hechos con piezas multiperforadas y piezas macizas, respectivamente.



Figura 29. Aplicación de la técnica de rehabilitación en los muros MTUB y MART y curvas de comportamiento histerético (Díaz, et al., 2017).

D. Quiun y P. Mamani (2017). Este estudio es consecuencia de la investigación previamente realizada por Araoz, et al. (2012), con la finalidad de conocer el desempeño de muros de mampostería confinada con piezas huecas horizontalmente, reforzados con malla de alambre soldado, buscando mejorar su desempeño sísmico y evitar su falla frágil. Se estudió el efecto de la carga vertical y la carga lateral cíclica sobre dos muros de mampostería hueca (tipo “pandereta”). Para esto se construyeron dos muros, denominados como WV-1 y WV-2, reforzados con malla de alambre soldado y recubiertos con mortero. La carga vertical se aplicó antes de aplicar las cargas cíclicas y se mantuvo constante durante todo el programa experimental. Para el espécimen WV-1 se simuló la carga de un edificio de dos niveles, mientras que para el edificio WV-2 se simuló la carga de uno de tres niveles. Para el espécimen WV-1 se aplicaron 11 t (108 kN) de carga vertical, mientras que para el espécimen WV-2 se aplicaron 16 t (157 kN). El modo de falla esperado fue por tensión diagonal, los cálculos realizados indicaron una tendencia a mostrar grietas por flexión en ambos muros. Al terminar el ensayo, en ambos muros, el modo de falla dominó en tensión diagonal, acompañado de deslizamiento en la base de ambos muros y aplastamiento del concreto de los castillos en su parte inferior. Los valores de rigidez obtenidos en WV-1 y WV-2, fueron mayores que el valor de comparación (W2 de Araoz, et al., 2012). Este incremento se atribuyó al efecto de la carga vertical, mostrando un incremento de 14% y 40% más respecto al muro de control. En cuanto a la carga lateral máxima resistida, en los muros WV-1 y WV-2, la carga fue mayor que la obtenida para los muros previamente ensayados (Araoz, et al., 2012). En comparación con el muro previamente ensayado (W1) sin malla y sin carga vertical, el aumento de la capacidad de carga fue del 86%, para WV-1 y del 110% para WV-2. En la figura 30 se muestra el patrón de agrietamiento final de los muros rehabilitados y las curvas de comportamiento de cada espécimen contra el modelo de control.

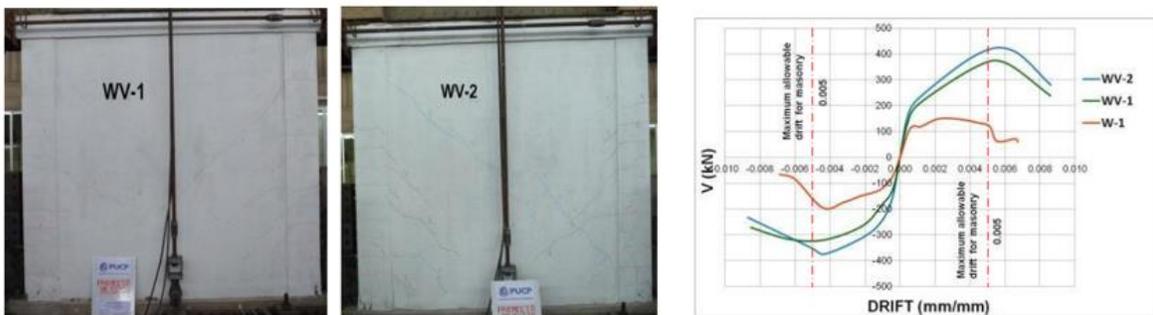


Figura 30. Patrón de agrietamiento y curvas de comportamiento de los especímenes WV-1 y WV-2 (Quiun y Mamani, 2017).

S. Chellappa y R. Dubey (2018): Dos modelos tridimensionales de mampostería fueron sometidos a carga dinámica, a través de una mesa vibradora, en su componente horizontal. El primer modelo consistió en mampostería simple, mientras que el segundo constó de mampostería confinada de una manera poco usual. Para el confinamiento se empleó malla de alambre soldado y mortero con la finalidad de crear el efecto de elementos confinantes. En la figura 31 se puede observar la configuración de ambos modelos. Una particularidad de los modelos fue que, tanto en su cara norte como en su cara sur, contaron con una abertura propia de una puerta de 1.50 x 0.75 m, a su vez, la cara este de ambos modelos contó con una abertura de tipo ventana de 0.75 x 0.75 m. Durante la construcción del modelo reforzado se colocó una capa de mortero de 10 mm

sobre la superficie de la mampostería antes de colocar la malla de alambre soldado. El tipo de anclaje empelado para conectar la malla al mortero y la mampostería fue alambre de acero de 4 mm de diámetro. Se buscó que el alambre cumpliera con la función de transmitir la fuerza cortante a través de un mecanismo de acción de dovela. Un total de dos pruebas en la mesa vibradora se realizaron en el modelo sin refuerzo; no se procedió con una tercera prueba para evitar el colapso de éste, dado que al final de la segunda prueba se observó un agrietamiento severo. Las fuerzas transferidas del sistema de piso a los muros generaron en los muros norte y sur un agrietamiento que se originó en las aberturas de la puerta y ventana. Al finalizar las pruebas, se observó que el refuerzo aplicado al modelo mediante la malla de alambre logró mejorar su comportamiento respecto al muro de mampostería simple. Los elementos dotaron de la rigidez y ductilidad suficiente para disipar energía sin causar daño en la estructura. Se presentó un aumento de casi 125% en la resistencia del modelo reforzado, además de un comportamiento dúctil, en comparación con el modelo de mampostería simple.



Figura 31. Modelo de mampostería simple (izq.) y modelo reforzado y confinado con malla de alambre soldado (der.) (Chellappa, 2018).

F. Escalante y T. Azahuata (2018): Se analizaron tres modelos distintos de una estructura tipo vivienda, con un sistema estructural a base de mampostería confinada con ladrillo tipo “pandereta” (multiperforado en el sentido horizontal de la pieza). El primer análisis no consideró la rehabilitación de los muros, el segundo consideró que todos los muros de la vivienda fueron rehabilitados, y en el tercero se tomó en cuenta que el 50% de los muros de la vivienda se rehabilitaron. La rehabilitación constó de la colocación de malla de alambre soldado por ambas caras de los muros separada a 0.5 cm de la mampostería y anclada al muro con alambre de 8 mm de diámetro. El recubrimiento fue a base de mortero, con un espesor de 2.5 cm. Con base en los resultados obtenidos, la estructura rehabilitada soportó una carga de 310 kN, y un desplazamiento de 5.9 mm, mientras que la estructura original, sólo soportó una fuerza de 136 kN y un desplazamiento de 4.4 mm. En la figura 32 se muestra la comparación de las envolventes positivas de respuesta de los especímenes (izquierda) y a su vez las distorsiones de entrepiso asociadas a cada modelo (derecha). Se concluyó que es necesario implementar este tipo de refuerzo en viviendas cuyos muros están hechos a base de piezas tipo “pandereta” pues estas no poseen las características necesarias para resistir acciones sísmicas.

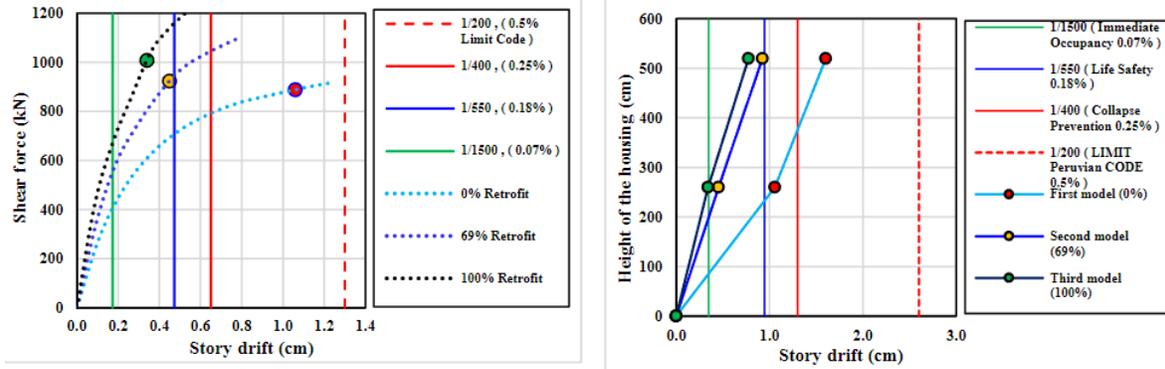


Figura 32. Comparativa de la respuesta de los modelos en términos de fuerza cortante (izq.) y distorsiones de entrepiso (der.) (Escalante, 2018).

H. Guerrero, C. Lubin (2021): Se llevó a cabo el ensaye de 13 especímenes a base de mampostería confinada de piezas sólidas. De los 13 especímenes, ocho fueron rehabilitados empleando un encamisado a base de malla de alambre soldado (M-1R, M-2R, M-3R, M-4R, M-6R, M-11R, M-12R y M-13R). En dos especímenes no se indujo daño inicial (M-3R y M-4R), mientras que en los demás sí. Cuatro especímenes fueron encamisados colocando la malla por ambas caras de los muros (M-1R, M-2R, M-3R y M-4R), mientras que los cuatro restantes fueron rehabilitados por una sola de sus caras (M-6R, M-11R, M-13R y M-13R). Para la rehabilitación se empleó malla de alambre soldado con calibres 8 y 10 con separación de alambres de 150 mm (6 pulg), con la finalidad de observar el efecto en el comportamiento de los muros al emplear distintos calibres de malla. En todos los muros el sistema de anclaje se basó en clavos y alambrocón. Los especímenes fueron sometidos a carga cíclica reversible en tres etapas. En la primera etapa se aplicaron dos ciclos con carga equivalente al 20% de la capacidad de carga teórica de cada espécimen, seguidos por otra etapa al 40% de la capacidad de carga teórica, y finalmente, en la última etapa, el ensaye fue controlado por distorsión lateral. Al finalizar el ensaye se observó que aquellos muros en los que se rehabilitaron ambas caras, la resistencia a cortante se incrementó en gran medida, originando un cambio en el modo de falla, obteniendo un modo de falla dominado por deslizamiento en la base, y falla en flexo-compresión en los castillos. En la figura 33 se muestra el incremento de resistencia en los especímenes anteriormente mencionados, así como la forma en que se dispuso la malla sobre la mampostería y en los extremos del muro.

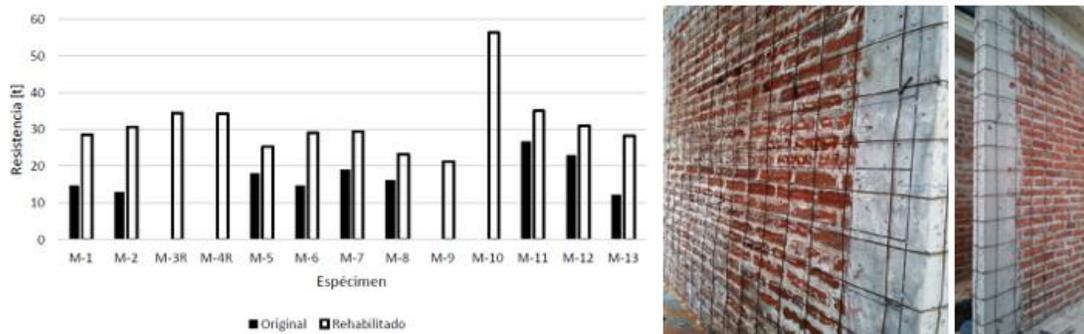


Figura 33. Efecto de la rehabilitación en la resistencia de los especímenes (izq.), disposición de la malla sobre la mampostería (der.) (Lubin, 2021).

3.4.3 Metodología de implantación

Dado que el encamisado con malla de alambre soldado y mortero o concreto es la técnica de rehabilitación más empleada en muros de mampostería en México, la normatividad actual (NTC-Mampostería 2017) ya incluye algunos aspectos y consideraciones para el diseño, análisis y construcción de esta técnica. Con base en esos aspectos y consideraciones, la Guía Técnica para la Rehabilitación Sísmica de la Infraestructura Física Educativa de México (INIFED, 2021) incluye, y complementa dentro de sus capítulos a esta técnica en una descripción más a detalle, la cual se incluye a continuación.

Requisitos de análisis

- a) Factor de comportamiento sísmico. Se analizará la estructura suponiendo un factor de comportamiento sísmico consistente con el tipo de pieza del muro, ya sea sólida o hueca, según la definición de las NTC-Mampostería. Para el primer caso, se usará $Q=2$; para el segundo, $Q=1.5$.
- b) Comportamiento monolítico. Para fines de análisis, se supondrá comportamiento monolítico entre la mampostería existente y el encamisado. Esto implica que el encamisado, y más específicamente, la malla se conecte al muro de conformidad con las NTC- Mampostería de la Ciudad de México.
- c) Carga axial. Si el muro es de carga, se supondrá que el muro existente resiste la carga axial. Si se requiere, se deberá reforzar el muro por medio de inserción de castillos o adosando un muro al existente para resistir un incremento de la carga axial. Si el muro es diafragma o de relleno, se deberá considerar que no contribuye a resistir cargas verticales.
- d) Factor de rigidez efectiva para análisis lineal: Se usará un factor de rigidez efectiva para el muro encamisado igual a 0.5, el cual afectará el módulo de rigidez a cortante del muro. En el cálculo de la rigidez lateral del muro, se aceptará incluir la aportación del mortero o concreto del encamisado.
- e) Continuidad. El encamisado de los muros de mampostería se debe extender a los muros transversales de manera continua, ya sea doblando la malla o bien traslapando un tramo de malla. Igualmente, el encamisado debe rodear las aberturas en el muro.

Requisitos de diseño

Materiales

- a) Si se emplean mallas de alambre soldado, éstas deberán cumplir con la NMX-B-290.
- b) Si el encamisado es a base de mortero de cemento, éste deberá ser de tipo I, con una resistencia mínima especificada a la compresión de 12.5 MPa (125 kg/cm²). Se aceptará el uso de fibras de vidrio para el repellido de mortero de acuerdo con la dosificación del fabricante.
- c) Si se emplea concreto para el encamisado, se usará concreto clase 1 con una resistencia mínima especificada a la compresión de 25 MPa (250 kg/cm²).
- d) Si se emplean clavos para conectar la malla de alambre soldado a la mampostería, éstos deberán tener una longitud mínima de 50 mm.
- e) Si se emplean conectores instalados a través de carga explosiva de potencia controlada, el tipo de carga (o de potencia) se determinará a partir de las

recomendaciones del fabricante y mediante ensayos en sitio para verificar que la potencia sea la adecuada.

- f) Se acepta el uso de alcatayas o grapas de barra de refuerzo o alambón para fijar la malla a la mampostería. Estas barras se anclarán en barrenos practicados al muro con resina o mortero epóxico.
- g) Si se emplean morteros o concretos con fibras metálicas o plásticas, se deberán dosificar las fibras de modo que su contribución a resistir fuerza cortante sea equivalente a la contribución de barras de acero de refuerzo convencional. Si se emplean fibras de acero, el contenido de fibras deberá ser de 40 kg/m³ y la relación de aspecto de la fibra (longitud/diámetro) mayor que 50.

Geometría

- a) El espesor mínimo del mortero del encamisado debe ser de 15 mm.
- b) El espesor mínimo del concreto del encamisado debe ser de 35 mm.

Resistencia al cortante de encamisados de malla de alambre recubierta con mortero

Tipo de refuerzo y cuantías de acero

Para el diseño de la malla de alambre soldado, así como del mortero a emplear en el encamisado, se debe contemplar lo siguiente:

- a) Las mallas que se utilizarán para el encamisado deberán tener en ambas direcciones, la misma área de refuerzo por unidad de longitud.
- b) El esfuerzo de fluencia para diseño no deberá ser mayor que 500 MPa (5,000 kg/cm²).
- c) Las mallas deberán anclarse a los elementos de confinamiento (castillos, dalas), en caso de que éstos existan, con la finalidad de alcanzar su esfuerzo especificado de fluencia. A su vez, las mallas deben rodear los bordes de las aberturas. En caso de que la malla se coloque únicamente por una cara del muro, la malla deberá extenderse al menos dos veces la separación entre alambres transversales.
- d) Las mallas deberán ser continuas a lo largo del muro. No se permitirá traslapar las mallas en ninguna sección vertical del muro.
- e) Las mallas deberán ser continuas en muros transversales. Se aceptará doblar la malla; si no es posible, se podrá traslapar un tramo de malla en forma de letra L.
- f) En caso de que se necesite traslapar los alambres verticales de la malla, el traslape entre los alambres transversales extremos no será menor que dos veces la separación entre alambres transversales más 50 mm.
- g) Las cuantías mínimas y máximas del refuerzo deberán cumplir con lo establecido en las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la estructura a rehabilitar).

Diseño de la malla de alambre soldado

Se sugiere que para el diseño de la malla para resistir fuerza cortante no se considera la contribución a la resistencia por parte del mortero. Únicamente se considerará la aportación de los alambres horizontales de la malla. La fuerza cortante resistida por la malla se calculará de conformidad con las siguientes ecuaciones (que también pueden encontrarse en las NTC-Mampostería 2017):

$$V_{SR} = F_R \eta \rho_h f_{yh} A_T$$

- a) Si el muro se encuentra sujeto a una carga axial de compresión (P):

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R \rho_h f_{yh} A_T} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s$$

$$\rho_h = \frac{A_{sh}}{s_h t}$$

$$k_0 = \begin{cases} 1.3 & \text{si } H/L \leq 1.0 \\ 1.0 & \text{si } H/L \leq 1.5 \end{cases}$$

$$k_1 = 1 - \alpha \rho_h f_{yh} \quad , \quad k_1 < (1 - 0.1 f_{an} f'_m \alpha)$$

$$\eta_s = \begin{cases} 0.75 & \text{si } f'_m \geq 9 \text{ MPa} \left(90 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \\ 0.55 & \text{si } f'_m \leq 6 \text{ MPa} \left(60 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \end{cases}$$

$$\alpha = 0.45 \text{ MPa}^{-1} (0.045 \text{ (kg/cm}^2\text{)}^{-1})$$

- b) Si el muro se encuentra sujeto a una carga axial de tensión (P):

$$\eta = k_1 \eta_s$$

Requisitos de construcción

Preparación del muro y reparación de grietas

- a) Se debe tratar la superficie del muro antes de colocar el refuerzo y aplicar el mortero o el concreto para lograr un comportamiento monolítico de la mampostería con el encamisado. Se deben retirar los acabados y revestimientos del muro (yeso, morteros, azulejos, etc.). Se deberá preparar la superficie de mampostería mediante un martelinado suave, con el fin de lograr una rugosidad de 3 mm (del orden de 1/8 pulg). Las superficies de los castillos y dalas se deberán preparar hasta una rugosidad de 6 mm (1/4 pulg). Previamente a la colocación del refuerzo del encamisado, la superficie de la mampostería deberá estar limpia.
- b) Si los muros presentan daños, se deberán retirar los fragmentos y piezas sueltas de la superficie de la mampostería y se limpiará el polvo y las partículas en el interior de las grietas mediante un chorro de agua limpia.
- c) Si el muro presenta agrietamiento moderado o severo, se deben reparar las grietas. Para la reparación de grietas se pueden emplear dos técnicas:
 - i. Inyección. En este caso, las grietas se rellenarán con resinas epóxicas, morteros epóxicos o morteros fluidos de cemento sin contracción (con consistencia de lechada). Esta técnica se aplicará para los casos de muros de piezas sólidas con bajo número de grietas, las cuales deben estar bien definidas. De acuerdo con las NTC-Mampostería 2017 no se permiten inyecciones por el método de vacío. Los fluidos que sean inyectados deberán de fluir correctamente a través de las grietas y vacíos, pero sin aumentar la segregación, sangrado y contracción plástica.
 - ii. Rajuleo. Consiste en la colocación de pedazos de piezas en las grietas; se aplica cuando las grietas tienen espesores superiores a 5 mm. Las rajuelas deben acuñarse y pegarse con mortero tipo I. Es necesario limpiar y humedecer las superficies que estarán en contacto con el mortero antes de

colocarlo. Se sugiere utilizar fibra de vidrio o algún aditivo estabilizador de volumen en el mortero de pega, para controlar los cambios volumétricos y la contracción por secado que pueda sufrir.

- d) Si la mampostería está aplastada, será necesario sustituir las piezas por otras con características mecánicas y dimensiones similares. Análogamente, si los extremos del castillo, en el caso de mampostería confinada, está dañado por el agrietamiento inclinado del muro, se recomienda demoler y reconstruir con concreto. Este concreto deberá tener, al menos, la misma resistencia que el original. Se recomienda dejar una separación de 10 mm entre el concreto nuevo y el existente para ser rellenada después con mortero seco con estabilizador de volumen.
- e) Si la estructura es de mampostería simple, o bien de mampostería mal confinada, y se opta por añadir nuevos castillos y/o dalas, se deberá proceder como sigue:
 - i. Para nuevos castillos: Durante la construcción, se debe colocar el concreto del nuevo castillo por capas. Se recomienda construir el castillo por mitades para asegurar una buena compactación del concreto y, así, evitar oquedades. Si no se construye una dala, se deberá anclar el refuerzo longitudinal del castillo en la losa, ya sea atravesándola para darle continuidad en la altura, o mediante un gancho a 90 grados.
 - ii. Para nuevas dalas: apuntalar el sistema de piso. Retirar el número de hiladas para lograr un peralte de la dala de 140 mm. Preparar la cara inferior de la losa que estará en contacto con el nuevo concreto de la dala. Colocar el acero de refuerzo longitudinal de la dala que se anclará en la unión con el castillo. Colocar el concreto a través de ranuras en la losa, usando una cimbra con resbaladilla.

Colocación del refuerzo del encamisado

La correcta colocación de la malla representa uno proceso fundamental para el adecuado comportamiento del muro rehabilitado. Para esto se habrán de seguir los siguientes puntos:

- a) Se podrá encamisar el muro por una o dos caras.
- b) Las mallas de alambre soldado deben ser fijadas a los castillos -extremos e intermedios- y a las dalas (en caso de que estos elementos existan o se inserten) mediante anclajes. Se podrán usar clavos, anclas, grapas, estribos abiertos o cualquier otro conector que permita fijar la malla y transmitir la fuerza cortante. Se acepta que las anclas tengan forma de letra L. Si se usan grapas o estribos abiertos, sus dobleces a 135 grados deberán abrazar las barras longitudinales del castillo existente. La separación máxima entre conectores, a lo largo de castillos y dalas, será de 450 mm. En las figuras 34 y 35 se muestran ejemplos del uso de anclas y de estribos abiertos para conectar el refuerzo del encamisado con elementos de confinamiento, respectivamente.

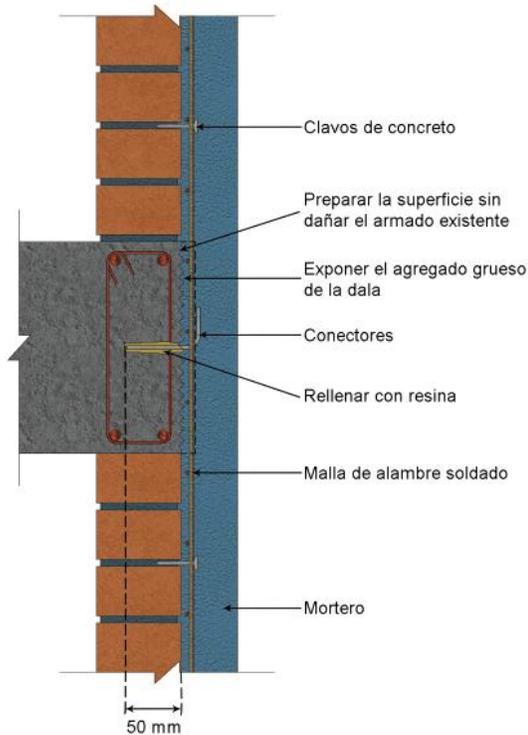


Figura 34. Detalle de la conexión del refuerzo del encamisado a dadas usando anclas a 90° . (INIFED,2021a).

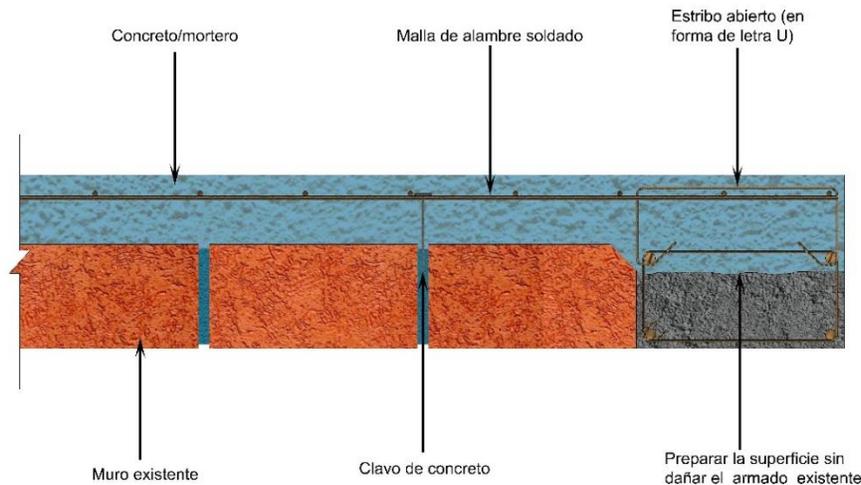


Figura 35. Detalle de conexión de refuerzo del encamisado en castillos mediante estribos abiertos con dobleces a 135°. (INIFED,2021a).

- c) Con la intención de distribuir el agrietamiento en forma uniforme y obtener un comportamiento estable y con amplia disipación de energía, se usará una densidad mínima de 9 anclajes/m² en el muro de mampostería. Las mallas de calibre pequeño (8 y 10) pueden fijarse con clavos de 50 mm de longitud, colocados manualmente con martillo.
- d) La separación máxima de conectores, en sentidos horizontal y vertical, será de 450 mm. Si se considera que las piezas son de mala calidad, la separación se puede reducir hasta a 250 mm cuando se esté utilizando malla de calibre pequeño (8 o

10); cuando se utilice un calibre mayor (calibre 4 o diámetros de 6.4 mm) se recomienda utilizar clavos de 51 mm (2 pulg) de longitud con arandela, instalados mediante cargas explosivas de potencia controlada, en la figura 36 se muestra, de manera esquemática, el proceso de instalación de anclajes mediante un dispositivo de carga explosiva de potencia controlada.

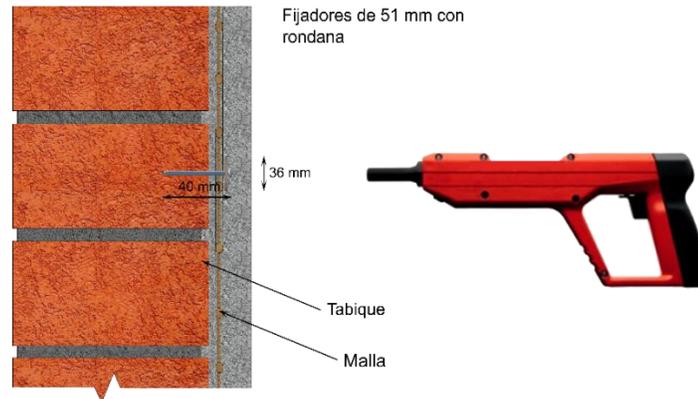


Figura 36. Anclaje de malla con conectores mediante cargas explosivas de potencia controlada. (INIFED,2021a).

- e) La malla debe rodear ambos bordes verticales del muro (o castillos, en caso de que estos elementos existan), así como los bordes de las ventanas o aberturas que éste tenga.
- f) Si la malla sólo se coloca en una cara del muro, la malla deberá rodear los extremos del muro, así como extenderse al menos dos veces la separación entre alambres transversales y anclarse a la mampostería, como se muestra en la figura 37.

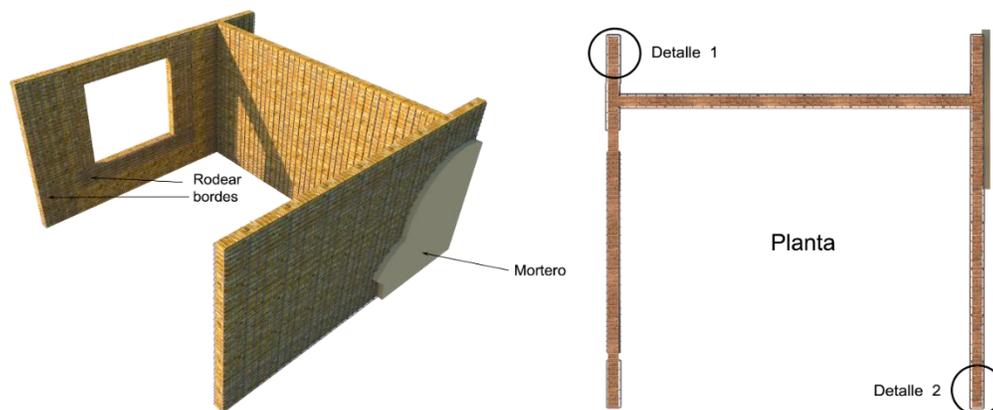


Figura 37. Colocación de malla de alambre soldado en la superficie de los muros de mampostería (INIFED,2021a).

- g) En caso de que la malla no pueda ser doblada y anclada alrededor de los bordes laterales del muro, de las aberturas o las ventanas, se deberá colocar un refuerzo en forma de letra “U” hecho con malla de calibre no inferior a 10 (3.43 mm de diámetro) que sea traslapado con la malla principal en una zona donde los

esfuerzos en los alambres de la malla sean bajos. En términos de los traslapes de la malla, se considerará que la unión de los extremos de las hojas de malla no será menor que dos veces la separación entre alambres más 50 mm. Esto se puede observar de manera esquemática en la figura 38.

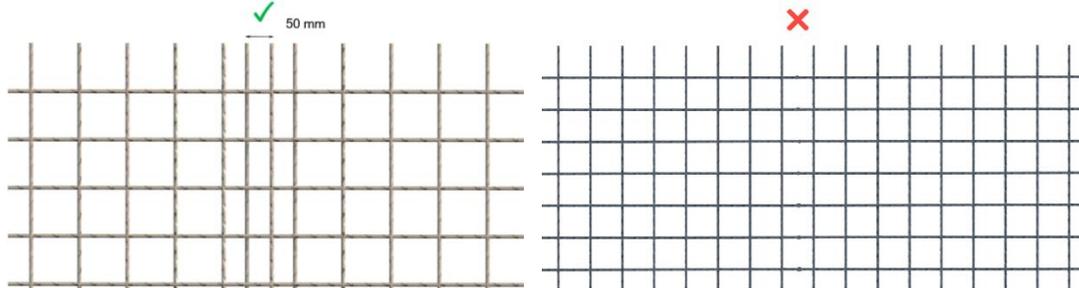
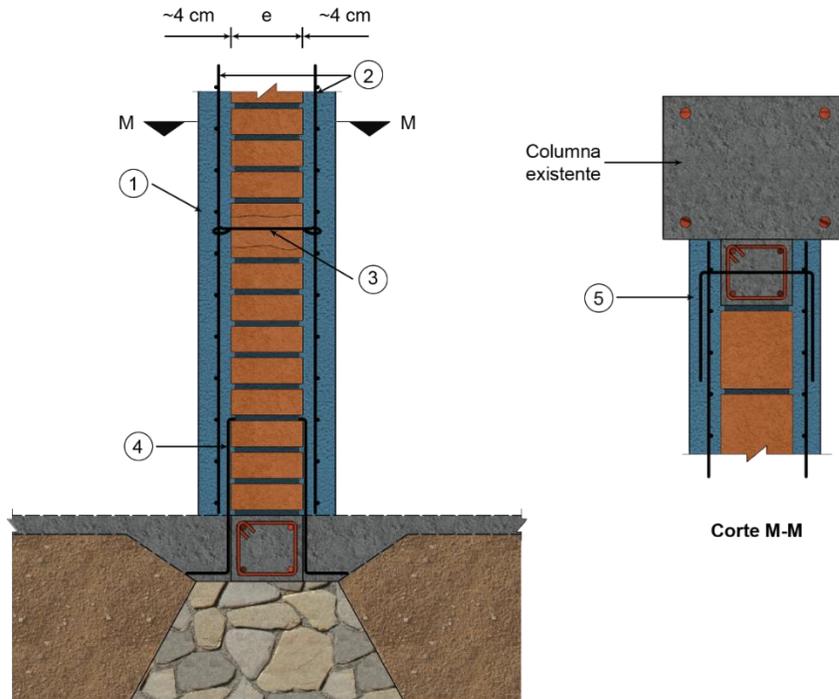


Figura 38. Traslape de malla de alambre soldado. A la izquierda se muestra un traslape realizado de manera adecuada; en el dibujo de la derecha se muestra un traslape incorrecto (INIFED, con base en Flores et al. 2004)

- h) Si se encamisa el muro por ambas caras, se pueden fijar las mallas con clavos o alcayatas. Es aceptable usar conectores, en forma de grapas o estribos de alambroón, que atraviesen el espesor del muro para poder fijar las mallas en ambos lados. Para esto, es necesario perforar el muro, colocar el elemento de acero y rellenar el espacio libre del agujero con resina o mortero epóxico.
- i) El refuerzo del encamisado del muro se deberá continuar en los muros transversales (figura 37), en al menos una distancia igual a cuatro veces la separación entre alambres verticales. Si no se puede doblar la malla, se deberá colocar un refuerzo en forma de letra “L” hecho con malla de calibre no inferior a 10 (3.43 mm de diámetro) que sea traslapado con la malla principal o con la capa de barras de acero de refuerzo.
- j) Cuando en el proyecto de rehabilitación se contemple la necesidad de extender el refuerzo hasta la cimentación, deberá hacerse una ranura en las zapatas, como se muestra en la figura 39. Las dimensiones de las ranuras serán suficientes para poder colocar el armado del encamisado y el mortero o concreto. Las ranuras se deben limpiar de cualquier material que impida la adhesión del mortero o concreto de la camisa con el cimiento. Se recomienda que la ranura tenga distintas profundidades a lo largo del muro, de modo de formar una llave de corte para incrementar la resistencia al cortante por deslizamiento. Finalmente, se debe impermeabilizar el encamisado.



Recubrimiento armado (encamisado) para reforzamiento de muros de mampostería

1. Capa de mortero colocada sobre el muro de mampostería.
2. Malla de alambre soldado o barras para armado de los aplanados.
3. Grapa para sujetar las dos mallas, colocadas a través de "cajas" o perforaciones hechas en el propio muro que a la vez servirán como conectores (separada @ 80 cm máx).
4. Barras ancladas al elemento estructural existente para traslaparse con la malla.
5. Dos capas de mortero, Tipo I, mínimo.

Figura 39. Ejemplo de fijación de mallas de alambre soldado o de capas de barras de acero de refuerzo en dos caras del muro (INIFED,2021, con base en De la Torre, 1995).

Colocación de mortero o concreto

Para la última etapa del procedimiento constructivo deberán llevarse a cabo los siguientes puntos:

- a) Antes de colocar el mortero sobre la malla o el concreto del encamisado, se deberá saturar la superficie del muro con agua.
- b) El mortero se podrá colocar con medios manuales o con dispositivos neumáticos (lanzado). En caso de utilizar la técnica de lanzado, se debe tomar en cuenta la posibilidad de formación de huecos debido al rebote de la mezcla en la superficie de la estructura.
- c) El concreto se podrá colocar por gravedad, preparando la cimbra para facilitar la salida del aire atrapado en el concreto. Se acepta el uso de concreto lanzado.
- d) En la fabricación del mortero se usará arena bien graduada de conformidad con la norma NMX-C-111-ONNCCE.
- e) El mortero y concreto se curará de acuerdo con los requisitos del inciso 15.3.9 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se localice la estructura a rehabilitar).

- f) Para evitar agrietamiento por contracción en mortero o concreto lanzado, se deberán emplear aditivos, como humo de sílice, los cuales permiten incrementar el espesor de la capa a aplicar, aumentan la densidad de la mezcla, incrementan la resistencia a los agentes químicos, a factores térmicos, a la adherencia, a flexión y compresión, y disminuyen el rebote del material lanzado. También se pueden emplear fibras de polipropileno que reducen el agrietamiento por contracción plástica. Se aceptará colocar una capa adicional de malla de gallinero y así también poder controlar el agrietamiento prematuro.
- g) El espesor del recubrimiento de mortero debe ser al menos de 15 mm en cada lado del muro.
- h) El mortero será tipo I. Se deberán revisar las relaciones volumétricas recomendadas para morteros tipo I en la tabla 2.5.1 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la estructura a rehabilitar).

Requisitos de supervisión y aseguramiento de calidad

El éxito de la rehabilitación dependerá, en gran medida, de la calidad en la ejecución de la técnica, por lo que se sugiere tomar en cuenta los siguientes puntos:

- a) Se deberá constatar que los materiales a utilizar en el encamisado cumplan con las especificaciones establecidas en los planos de construcción y en las memorias de cálculo del proyecto ejecutivo de rehabilitación.
- b) El mortero no deberá fabricarse en contacto con el suelo.
- c) La dosificación del mortero o concreto deberá controlarse para obtener la resistencia de diseño.
- d) Se debe verificar que los conectores estén firmemente instalados en la mampostería y concreto, con la cuantía y separación especificada en los planos.
- e) El refuerzo del encamisado deberá continuarse en muros transversales, ya sea doblándolo o bien traslapando un refuerzo hecho con malla con calibre mínimo del número 10 (3.43 mm de diámetro).
- f) Saturar con agua limpia la superficie del muro y de sus elementos confinantes, si existen, antes de colocar el mortero o concreto.
- g) El mortero debe ser colocado en un tiempo menor o igual a dos horas posteriores a su fabricación. de lo contrario, éste debe ser desechado.
- h) Se recomienda curar el mortero o concreto, manteniendo un ambiente húmedo, durante siete días.

3.5 ENCAMISADO CON BANDAS Y PLACAS

3.5.1 Bandas y placas de acero

3.5.1.1 Descripción de la técnica

La técnica consiste en la colocación de bandas diagonales, verticales u horizontales de acero, e incluso la colocación de placas completas o flejes por una o ambas caras de los muros de mampostería. Éstas han sido técnicas muy poco estudiadas, ya que los estudios se han enfocado más hacia el refuerzo con métodos más “tradicionales”, como la adición de malla de alambre soldado, o el encamisado con compuestos poliméricos (PRF, por ejemplo). Los estudios con bandas de acero han sido mayormente enfocados en el reforzamiento de elementos de concreto reforzado como columnas y vigas, no así para estructuras de mampostería.

Para el encamisado con bandas de acero, al colocar las bandas diagonales, éstas se extienden desde cada esquina del muro buscando aumentar la resistencia a tensión diagonal y de aplastamiento por compresión debido a fuerzas de corte. Por su parte, las bandas verticales aportan al muro un comportamiento estable a flexión, y los ángulos y anclajes colocados para unir las bandas con las losas ayudan a evitar la falla por deslizamiento en muros. También, las bandas horizontales intervienen como refuerzo horizontal.

En el caso de la colocación de placas de acero cubriendo la totalidad de la mampostería, al estudiar esta técnica en muros diafragma, se encontró que es una técnica de fácil aplicación, y que puede emplearse sin generar demasiadas molestias a los usuarios de los edificios a reforzar. Esta técnica consiste básicamente en la instalación de placas de acero (que pueden ser placas multiperforadas, o bien, placas lisas) en una o ambas caras de los muros diafragma, anclándolas a la mampostería y a los elementos de confinamiento mediante conectores.

De los estudios experimentales que se han realizado, se observó que es una técnica que ha logrado proporcionar una adecuada ductilidad a las estructuras a base de muros diafragma, además de que es una técnica económica y de fácil construcción a comparación con otras técnicas. Las placas de acero multiperforadas son, en general, un material asequible, en términos de disponibilidad y economía. Esta técnica brinda la posibilidad de ser aplicada sin dañar elementos estructurales y no estructurales, además de que puede ser desmontable (puede cambiarse con el tiempo, en caso de ser necesario), e incluso las placas pueden cubrirse con otros materiales para brindar un mejor acabado.

Estudios previos (Özbek, et al. 2019), han indicado que el uso de otros materiales para encamisados, como puede ser la fibra de carbono (CFRP), han presentado rupturas, desgarre o desprendimiento ante la ocurrencia de fallas frágiles al alcanzar distorsiones de 2%, mientras que al emplear placas de acero se ha logrado alcanzar distorsiones de hasta 7.5% sin presentar pérdidas significativas de resistencia.

3.5.1.2 Revisión de la literatura

M. Taghdi, M. Bruneau y M. Saatcioglu (2000): Se diseñaron cuatro muros de mampostería hechos con block macizo de concreto para simular muros no dúctiles de poca altura construidos antes de la publicación de las normas de diseño sismo-resistente en Canadá. De los muros ensayados, dos fueron de mampostería simple y los dos restantes fueron reforzados interiormente; un muro de cada par se rehabilitó empleando un sistema de encamisado con bandas diagonales y verticales de acero unidas al muro mediante pernos. A la vez, se emplearon ángulos de acero y pernos para conectar las bandas a la losa de cimentación y la losa de entrepiso. Todos los muros fueron ensayados para una carga gravitacional constante y carga lateral cíclica. Para la rehabilitación se emplearon dos bandas diagonales de 220 mm de ancho y 3.81 mm de espesor. Estas bandas se colocaron en ambos lados del muro para evitar concentraciones excéntricas de esfuerzos que pudiesen generar torsión y con esto evitar fallas fuera de plano. Adicionalmente, dos bandas de 80 mm de ancho y 3.81 mm de espesor se colocaron verticalmente, en los extremos de los muros, para brindar confinamiento adicional al muro. Para conectar las bandas verticales y diagonales a la mampostería se emplearon pernos de acero A325 de 3/8 pulg (9.5 mm) y 5/8 pulg (15.9 mm) de diámetro, respectivamente. Para anclar las bandas con las losas (de cimentación y entrepiso) se colocaron ángulos de acero de 150x150x16 mm anclados con pernos de alta resistencia de 400 mm de largo. Las bandas fueron unidas en su intersección, al centro del muro, y también a los ángulos colocados en los extremos del muro, mediante soldadura de penetración completa. Al concluir el ensaye se observó que los muros rehabilitados mostraron un mejor comportamiento en comparación con los muros sin rehabilitar, en la figura 40 se muestran los daños presentados en los especímenes 9R y 10R al finalizar el ensaye. En el muro 9R (rehabilitado de mampostería simple) se observó un agrietamiento uniforme en la mampostería, a la par de que el acero de las bandas fluyó para posteriormente, pandearse; este muro presentó una resistencia a carga lateral 4.5 veces mayor que el muro 9 (sin rehabilitar). Para el muro 10R (rehabilitado de mampostería reforzada interiormente) se observó que la presencia de refuerzo interior ayudó a mejorar la resistencia a carga lateral, rigidez, ductilidad y disipación de energía respecto al muro 9R. El encamisado también contribuyó a retrasar el pandeo de las bandas de acero. En la figura 41 se observan las diferencias en el comportamiento histerético de los muros no rehabilitados respecto de los rehabilitados.

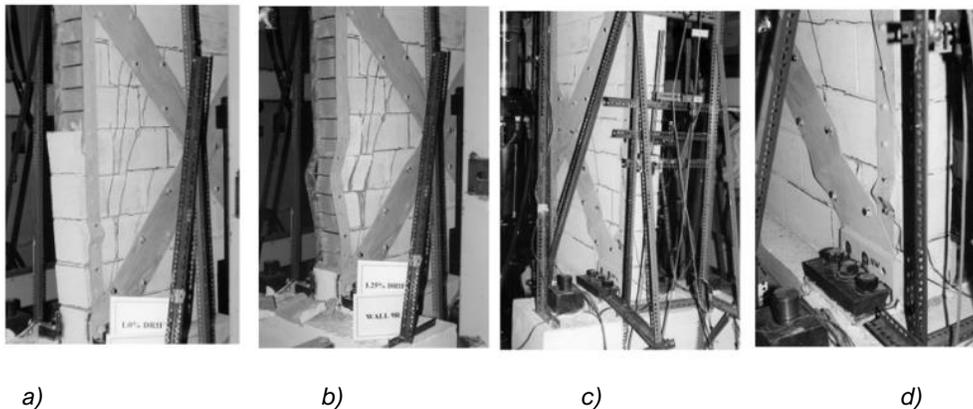


Figura 40. Daños presentados en los modelos 9R (a, b) y 10R (c, d) (Taghdi, et al., 2000).

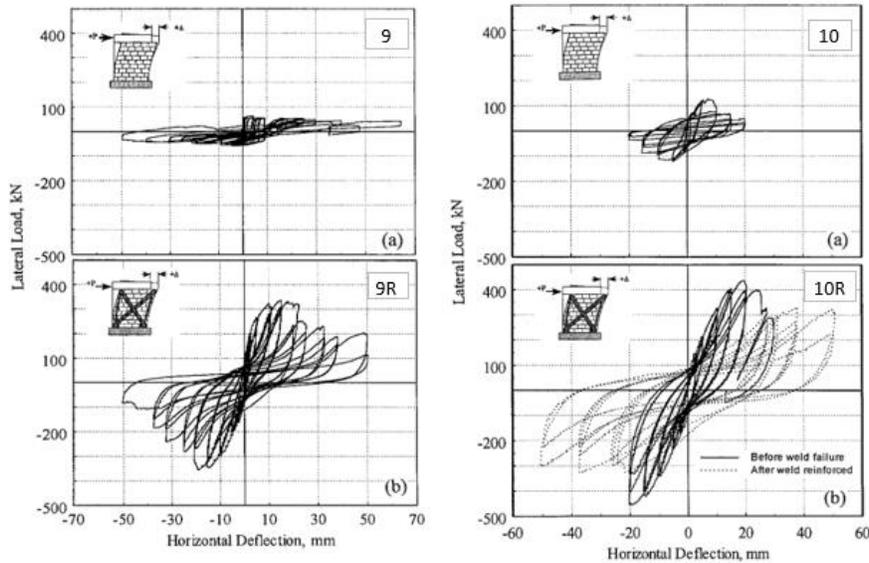


Figura 41. Curvas de comportamiento histerético de los modelos 9, 9R, 10 y 10R (Taghdi, et al., 2000).

B. Aykaç, E. Özbek, R. Babayani, M. Baran y S. Aykaç (2017): Se ensayaron 13 muros hechos con tabique de arcilla hueco (“pandereta”); uno de referencia con una capa de yeso y 12 reforzados con una placa de acero multiperforada. El estudio se llevó a cabo en dos etapas. En la primera etapa se observó el cambio en el comportamiento de los muros en función de la variación del espesor de las placas empleadas para la rehabilitación (0.5 y 1.0 mm) y también en función de la distancia de separación entre conectores (100, 150 y 200 mm); durante esta etapa, siete muros fueron ensayados cambiando sólo un parámetro. La segunda etapa consistió en buscar mejorar el comportamiento con base en lo observado durante la primera etapa. Las variables de estudio en la segunda etapa fueron el espesor de las placas de acero (0.3 y 0.5 mm), la presencia de refuerzo adicional en las esquinas del muro (densificación de pernos y colocación de soleras de acero en forma de letra L) y la colocación directa de la placa a la mampostería o con recubrimiento intermedio. Al término del ensaye se observó un aumento en la resistencia de 1.3 a 2.3 veces en los especímenes reforzados con respecto a los valores obtenidos en el muro de control. En la figura 42 se presentan las curvas de comportamiento histerético de cada espécimen. La disipación de energía fue 5.2 veces mayor respecto al muro de control. En general, los especímenes reforzados mostraron una falla caracterizada por aplastamiento en las esquinas, deslizamiento en la base del muro y agrietamiento por tensión diagonal, así como aplastamiento (“arrugas”) en las placas de acero. Los muros con separación entre conectores de 100 mm mostraron la mayor resistencia, en comparación con los que tuvieron separación de 150 y 200 mm (entre 2 y 2.3 veces mayor). Las soleras colocadas en forma de letra L, colocadas en las esquinas de los muros, sobre las placas de acero, ayudaron a disminuir la concentración de esfuerzos sobre el muro, y generaron un agrietamiento más uniforme. La técnica se consideró adecuada para implementarse en muros diafragma de mampostería en marcos de acero, debido a su comportamiento favorable en términos de resistencia, ductilidad y disipación de energía.

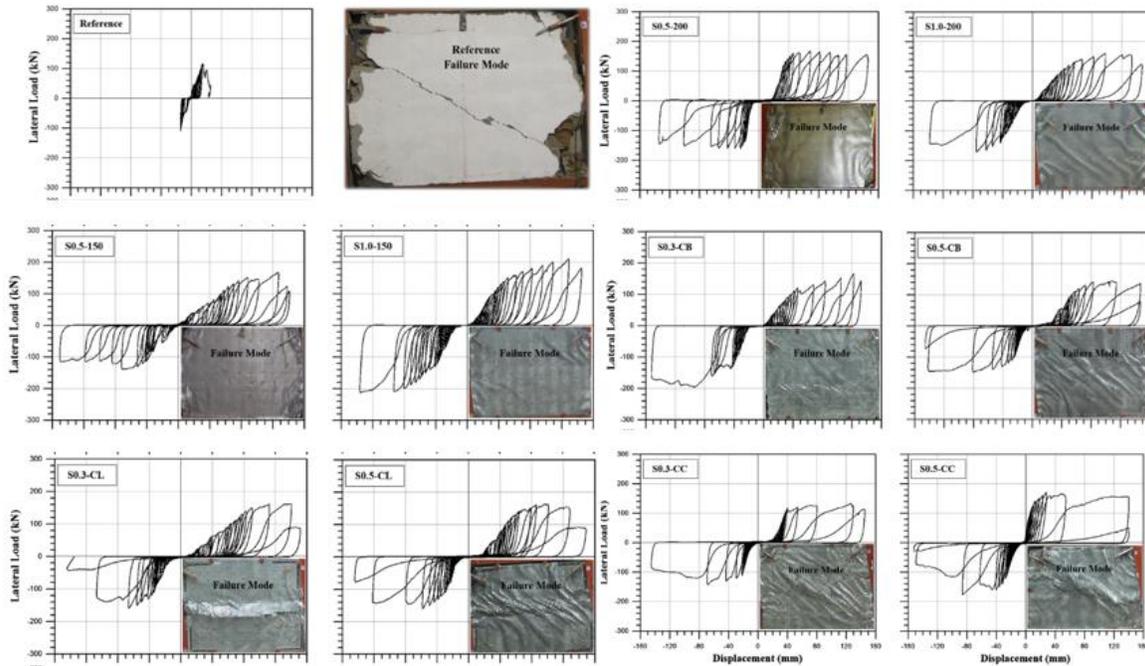


Figura 42. Curvas de histéresis y modos de falla en algunos especímenes ensayados (Aykaç, 2017).

Özbek, B. Aykaç y S. Aykaç (2019): Con el objetivo de mejorar el comportamiento sísmico de estructuras a base de marcos de concreto con muros diafragma de mampostería a base de piezas de arcilla huecas (“pandereta”); se ensayaron, bajo carga lateral cíclica reversible, 12 muros reforzados con placas de acero multiperforadas cubriendo la totalidad de la mampostería. Las placas empleadas para la rehabilitación tuvieron espesores de 1.0, 1.5 y 2.0 mm. Las principales variables de estudio fueron el espesor de las placas, la distancia de separación entre pernos para la conexión de la placa con la mampostería (150, 200 mm) y la presencia o ausencia de conexión de las placas perforadas a las columnas; se buscó modificar cada parámetro en cada espécimen para observar cambios en su respuesta. Cabe resaltar que el estudio no contempló la aplicación de carga axial sobre las columnas. Durante el ensaye del primer espécimen rehabilitado, las columnas mostraron una falla por fuerza cortante, por lo que para los especímenes restantes se decidió reforzar las columnas mediante ángulos y soleras, para evitar ese tipo de falla. Para el reforzamiento de las columnas, se emplearon ángulos de acero de 30 mm de ancho y 3 mm de espesor en toda la altura de las columnas y soleras de 25 mm de ancho y 3 mm de espesor, colocadas a cada 75 mm. Para conectar las placas de acero con la mampostería se realizaron perforaciones de 7 mm en la mampostería donde se instalaron pernos de 160 mm de largo con tuercas y arandelas. Con la finalidad de evitar el aplastamiento de la mampostería en las esquinas, se añadieron soleras de acero de 25 mm de ancho, 320 mm de longitud y 3 mm de espesor en forma de letra L en las esquinas del muro sobre la placa; cabe resaltar que en las esquinas se optó por disminuir la distancia entre conectores a 100 mm, buscando proteger estas zonas de las altas concentraciones de esfuerzos. Al concluir el programa experimental se observó que la presencia de las placas sobre la mampostería favoreció a evitar la aparición de grietas por tensión diagonal. Las placas de acero contribuyeron a un incremento de entre 1.5 y 2 veces la resistencia de los especímenes, alcanzando valores

de distorsión de hasta 7.5% sin mostrar degradación en la resistencia lateral. Además, la capacidad de disipación de energía se incrementó entre 4 y 5 veces. Se observó, en general, un mejor comportamiento en los especímenes reforzados con placas de 1.5 mm de espesor, ya que en los especímenes con placas de 2.0 mm de espesor se presentaron agrietamientos por corte generados en la base de las columnas, lo que llevó a una degradación del comportamiento de los muros. Los especímenes que tuvieron conexión marco-muro (a través de los ángulos y soleras) mostraron una capacidad de carga ligeramente mayor y un comportamiento más estable en comparación de los muros sin conexión marco-muro. Respecto al aumento de la separación entre conectores de 150 mm a 200 mm en la región central del muro la diferencia en el comportamiento fue mínima. Se asumió que los conectores podrían ser colocados preferentemente a cada 200 mm, ya que, respecto a otros especímenes, los conectores instalados en las esquinas del muro mostraron una adecuada contribución a resistir la concentración de esfuerzos. En la figura 43 se muestran los modos de falla presentados en cada espécimen.,

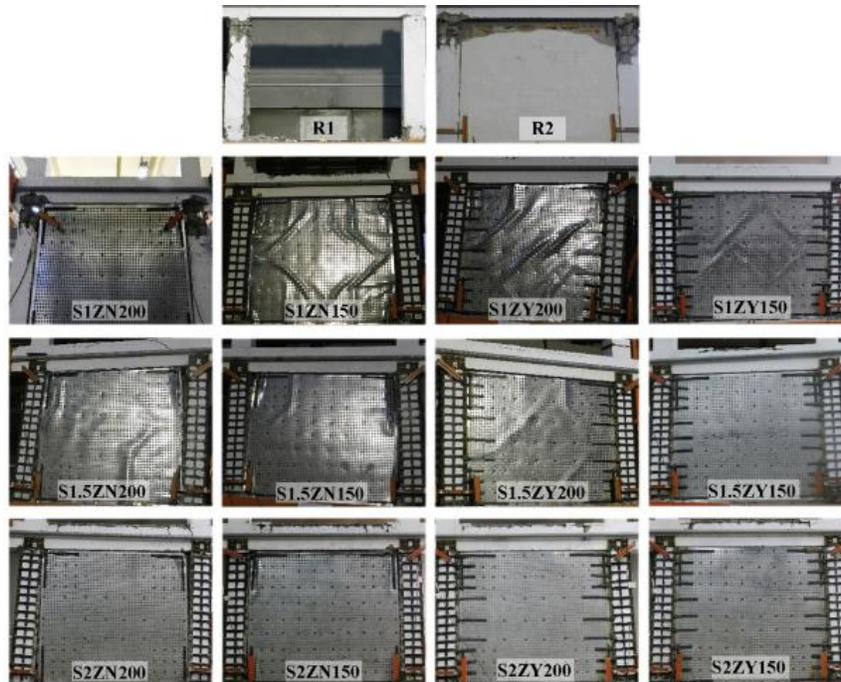


Figura 43. Modos de falla de los especímenes ensayados (Özbek, et al., 2019).

3.5.1.3 Metodología de implantación

Requisitos de análisis y diseño

Al emplear bandas de acero, el ancho y espesor de éstas deben seleccionarse en función de la resistencia contra el pandeo lateral; el ancho de las bandas debe estar en función del aseguramiento de la fluencia de la sección bruta, antes de la fractura en la sección neta donde se ubiquen los conectores. Debe considerarse evitar generar una excentricidad o una distribución inadecuada que pueda conducir a generar torsión en los muros e incluso fallas fuera de plano. La separación entre conectores colocados para anclar las bandas a la mampostería debe ser propuesta en función de que logre evitarse el pandeo de las

bandas. Con base en lo observado experimentalmente, se sugiere tomar una separación mínima entre conectores de 150 mm y una separación máxima de 200 mm.

La técnica de encamisado con placas de acero sólo ha sido probada sobre muros diafragma. Dado lo anterior, para asegurar en el análisis la completa contribución de la placa de acero es necesario prevenir la falla por fuerza cortante en las columnas. En INIFED (2021a) se establece que los análisis basados en los modos de falla constituyen un enfoque más preciso para determinar el aporte de resistencia del muro diafragma.

Requisitos de construcción

Para llevar a cabo la técnica de encamisado mediante bandas de acero o mediante encamisado completo con placa de acero, es necesario, inicialmente, reparar las grietas existentes, así como, en caso de ser necesario, reparar y/o añadir elementos de confinamiento a los muros. Si el encamisado se hará mediante bandas de acero, se sugiere tomar en consideración los siguientes puntos:

- a) Las bandas deben ser colocadas sobre la diagonal principal de la mampostería. Es conveniente también colocar bandas verticales a los costados del muro, esto con la finalidad de brindar confinamiento adicional.
- b) Para anclar las bandas sobre la mampostería es necesaria la colocación de conectores, para esto es recomendable el empleo de pernos ahogados en epoxi. Las perforaciones realizadas en la mampostería deberán llevarse a cabo de manera cuidadosa, buscando no dañar la mampostería existente o las reparaciones hechas al muro.
- c) Una vez que las bandas hayan sido ancladas a la mampostería, es necesario soldar los puntos en que ambas bandas se intersecan, es decir, al centro y extremos del muro.
- d) Para conectar las bandas de acero entre sí, así como para unir las con el sistema de piso (losas) deben colocarse ángulos de acero anclados a las losas mediante pernos de alta resistencia que eviten la fluencia del acero de los ángulos ante la incidencia de fuerzas laterales constantes. Se sugiere que la unión entre los ángulos y las bandas de acero sea soldada.

En la figura 44 se muestra, de manera esquemática, la técnica de rehabilitación anteriormente mencionada.

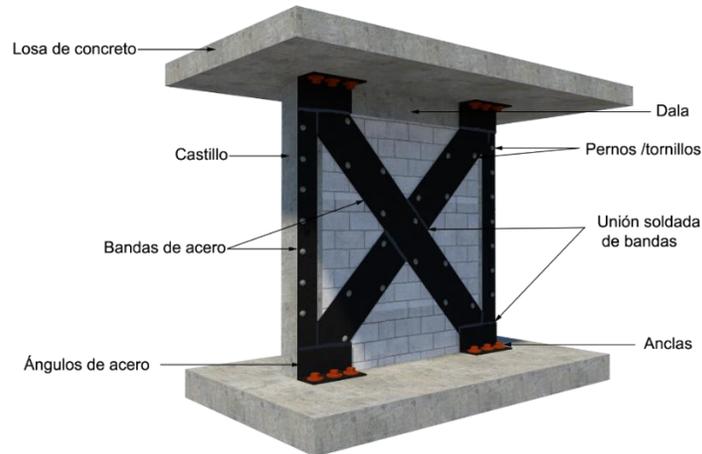


Figura 44. Esquema de rehabilitación de muros de mampostería mediante el empleo de bandas de acero (Elaboración propia).

Para realizar el encamisado con placas de acero cubriendo la totalidad de la mampostería (ya sean multiperforadas, o completamente lisas) se recomienda considerar los siguientes puntos:

- a) Una vez que la superficie de la mampostería se encuentre limpia y reparada es necesario añadir un recubrimiento a base de mortero de cemento. Se recomienda que el espesor del recubrimiento no exceda de 15 mm, para que permita la adecuada conexión de la placa con la mampostería.
- b) Posteriormente se ubican y perforan los orificios para la colocación de conectores. El tamaño y la densidad de los orificios, así como el tipo de conectores instalados, estará en función de los requisitos de cada proyecto de rehabilitación (incluyendo el espesor de la placa a colocar, la distribución que tendrán los conectores tanto en el muro como en el marco, del tipo de pieza que, conforme al muro, por mencionar algunas variables). Se propone el empleo de pernos, ajustados con tuercas y arandelas. Es recomendable, ajustar las tuercas (en caso de que se opte por los pernos) mediante la aplicación de un momento torsionante máximo de 3.5 N·m, ya que este valor representa un valor óptimo para no generar daño en la mampostería.
- c) Una vez que se realizaron las perforaciones en el muro debe colocarse la placa. Es recomendable el empleo de placas con espesores de entre 1 a 1.5 mm de espesor. Se ha observado, a través de la experimentación, que un espesor mayor resulta innecesario, pues el incremento de resistencia y rigidez es insignificante, dado que falla la mampostería.
- d) Después de hacer las perforaciones. En caso de que las placas de acero adquiridas no alcancen a cubrir en su totalidad a la mampostería, debe realizarse un traslape de placas. La distancia mínima de traslape entre placas es de 125 mm (de acuerdo con lo observado experimentalmente).
- e) Con la finalidad de evitar el aplastamiento de la mampostería en las esquinas se sugiere aumentar la cantidad de conectores instalados en los extremos del muro, la separación entre estos puede tomarse de mínimo 100 mm.
- f) En caso de ser necesario, y si el proyecto de rehabilitación así lo contempla, pueden encamisarse las columnas adyacentes mediante ángulos, soleras o placas.

Esto con la finalidad de proteger a estos elementos y evitar que fallen por fuerza cortante.

En la figura 45 se ilustra la rehabilitación de un muro de mampostería mediante esta técnica.

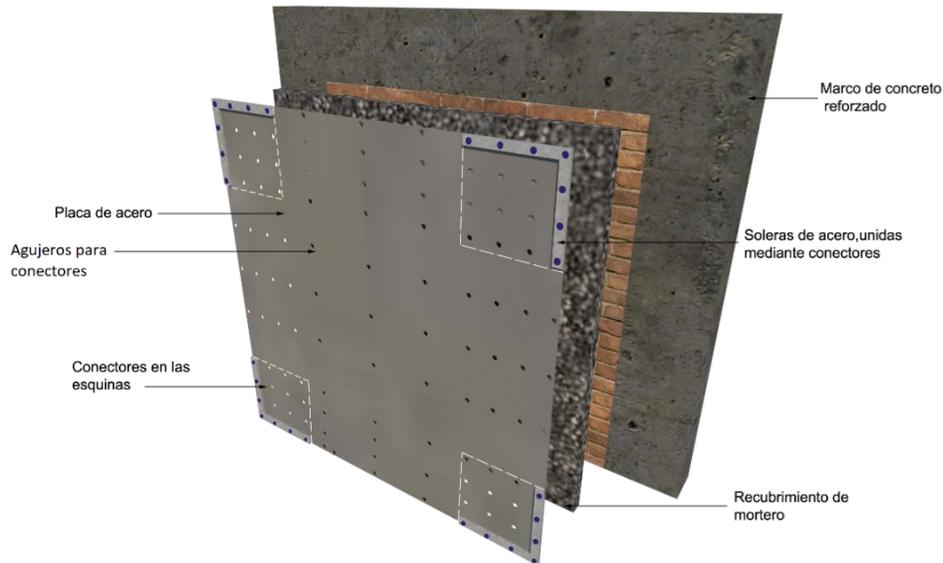


Figura 45. Esquema de rehabilitación de muros diafragma de mampostería mediante el empleo de placas de acero (Elaboración propia).

3.5.2 Bandas de polipropileno

El polipropileno es un polímero termoplástico utilizado en una gran variedad de aplicaciones. Su presentación en forma de bandas es comúnmente empleada en el empaquetado, protección y transportación de artículos diversos, no obstante que en la actualidad su uso está siendo orientado también dentro de la industria de la construcción.

El polipropileno es considerado un material tenaz y flexible, a su vez, es considerando un material razonablemente económico, por lo que se perfila como un material apto para ser empleado en la rehabilitación de estructuras a un costo considerablemente bajo.

3.5.2.1 Descripción de la técnica

La técnica consiste en colocar, sobre la superficie de la mampostería, una malla conformada por bandas de polipropileno y un recubrimiento a base de mortero de cemento o concreto, buscando confinar la totalidad de los muros, incluyendo sus aberturas. Hasta la fecha, aún no se ha desarrollado un proceso de manufactura automatizado para generar las mallas de bandas de polipropileno, por lo que las mallas tienen que fabricarse manualmente en obra, mediante un soldador de plástico, para generar las uniones entre bandas y así formar la malla. En la figura 46 se muestra la aplicación de esta técnica en una vivienda hecha a base de mampostería en Pakistán (JBIC, et al., 2007).

Esta técnica tiene como objetivos los siguientes puntos:

- Incrementar la resistencia a fuerza cortante y la ductilidad de los muros.
- Controlar los modos de falla locales.
- Mejorar el comportamiento sísmico global de la estructura, en caso de que la técnica se aplique en todos los muros de ésta.

Esta técnica busca resolver las deficiencias estructurales que puedan conducir a un mal comportamiento de estructuras a base de mampostería, principalmente en aquellas con una capacidad limitada a resistir fuerza cortante y flexión debido a materiales de mala calidad. En la actualidad esta técnica ha sido estudiada e implantada únicamente en estructuras a base de mampostería simple. Hasta la fecha, no han existido estudios en México, o proyectos de rehabilitación en donde se haya empleado esta técnica, por lo que representa un área de estudio y aplicación para el campo de la rehabilitación sísmica en muros de mampostería.



Figura 46. Rehabilitación estructural con bandas de polipropileno en Pakistán (JBIC, et al., 2007).

3.5.2.2 Revisión de la literatura

Ha sido en general poca la investigación realizada en torno a esta técnica de rehabilitación. A continuación, se presentan los programas experimentales que han considerado esta técnica. Los experimentos realizados han sido limitados, y con poca información que permita realizar análisis numéricos para comparar esta técnica con otras existentes.

P. Mayorca y K. Meguro (2003): Ocho muros, a base de piezas macizas de arcilla, fueron ensayados; cinco de ellos se reforzaron con una malla hecha a base de bandas de polipropileno, el resto fueron utilizados como muros de control. Las bandas fueron dispuestas en forma diagonal (inclinación de 50 grados) sobre la mampostería, como se muestra en la figura 47 y éstas fueron colocadas por ambas caras de cada muro. Las cuadrículas de la malla conformadas por las bandas fueron de 45 x 45 mm. El ensaye se llevó a cabo en cuatro etapas; en la primera, los muros se probaron hasta llegar al agrietamiento diagonal, la segunda y tercera etapa consistieron en aplicar un desplazamiento lateral de 10 mm (carga reversible), en la cuarta etapa se impuso un último desplazamiento de 10 mm. Con la finalidad de degradar las propiedades de la mampostería y así resaltar el efecto de la rehabilitación, se realizaron perforaciones en algunos muros; estas perforaciones se hicieron con distribución uniforme en algunos

muros y distribución diagonal en otros. Aunque el refuerzo con bandas de polipropileno no proporcionó un aumento en la resistencia de los especímenes, contribuyó a mejorar su capacidad de deformación después del inicio del agrietamiento. Los muros reforzados fueron capaces de sostener su resistencia incluso ante grandes deformaciones.

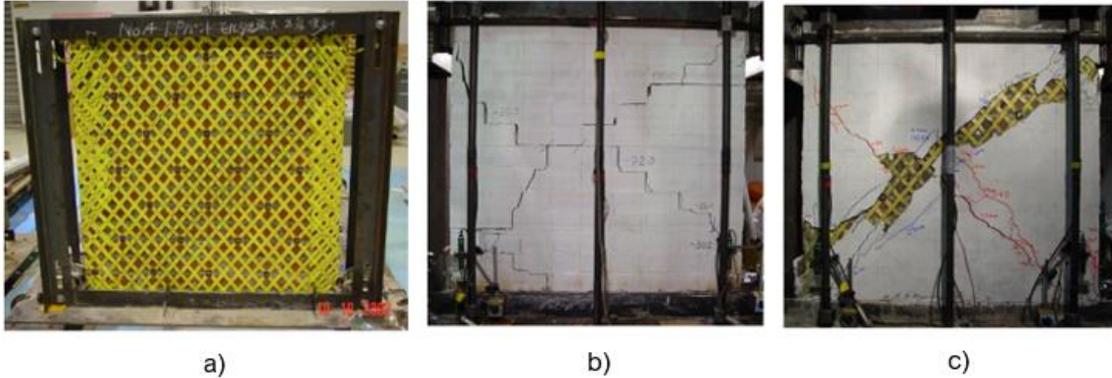


Figura 47. a) Colocación del refuerzo en los muros b) Patrón de agrietamiento en un muro sin refuerzo c) Patrón de agrietamiento en un muro reforzado (Mayorca, 2003).

N. Sathiparan, P. Mayorca y K. Meguro (2012): Con la finalidad de conocer la respuesta dinámica de una estructura tridimensional de mampostería simple de piezas macizas de arcilla, rehabilitada con una malla hecha a base de bandas de polipropileno, se ensayaron cuatro modelos a escala (1:4), sin daño previo, estos modelos se presentan en la figura 48. A través de esto se buscó estudiar la efectividad de la técnica de rehabilitación, así como los modos de falla, los patrones de agrietamiento en los muros y también los costos de construcción. De los cuatro modelos ensayados, dos fueron modelos de control, donde no se aplicó ningún tipo de refuerzo; los dos modelos restantes fueron rehabilitados mediante una malla conformada por bandas de polipropileno. Adicionalmente, en dos modelos (uno de control y otro rehabilitado) se añadió un recubrimiento a base de mortero, con el objetivo de estudiar el efecto del recubrimiento sobre la respuesta de los modelos.

Después de los ensayos se observó que la malla con bandas de polipropileno favoreció una distribución uniforme del agrietamiento y evitó el colapso de la estructura, como ocurrió en los modelos que no fueron rehabilitados. Los modelos no rehabilitados colapsaron ante distorsiones de 0.4%, mientras que para los modelos rehabilitados sin y con recubrimiento la resistencia máxima se alcanzó a distorsiones de 4% y 6.9%, respectivamente. Los resultados experimentales mostraron que esta técnica puede mejorar la seguridad estructural de estructuras hechas a base de muros de mampostería tanto nuevos como existentes, y brindar una resistencia adecuada ante cargas laterales.



Figura 48. Modelo rehabilitado antes del ensayo (izq.) y después del ensayo (der.) (Sathiparan, et al., 2012).

3.5.2.3 Metodología de implantación

Requisitos de análisis y diseño

Es necesario considerar, tanto para el análisis como para el diseño que las bandas de polipropileno poseen una resistencia relativamente baja, en comparación con la resistencia de un material como la mampostería. Debido a esto, se debe considerar que, al utilizar esta técnica, el aumento de resistencia en los muros puede considerarse menor en comparación con otras técnicas. Las diferencias en el comportamiento de los muros que sean rehabilitados con esta técnica pueden variar en función de los siguientes puntos:

- La presencia del recubrimiento ya sea de mortero de cemento o concreto.
- La correcta adherencia entre el recubrimiento y la mampostería.
- La variabilidad de las propiedades de los muros y la rehabilitación en sí, debido al efecto de la mano de obra.
- El empleo de conectores para unir las bandas de polipropileno a la mampostería.

Requisitos de construcción

La disposición de las bandas para la conformación de la malla ha sido estudiada con la finalidad de encontrar la orientación que brinde una mayor eficiencia para la rehabilitación. Se han estudiado dos distintas maneras de orientar las bandas: a) en forma paralela a las juntas de mortero y b) a 50° respecto a las juntas de mortero. De los estudios se observó que, al disponerlo de manera paralela a las juntas de mampostería, el comportamiento del muro fue mejor, en comparación con la disposición a 50°, además, la primera forma de disponer las bandas resulta ser más sencilla de instalar.

El proceso constructivo de esta técnica se basa en los siguientes puntos:

- a) Inicialmente, es conveniente reparar el muro sobre el cual se colocará la malla de polipropileno, en caso de ser necesario. Además del muro, los elementos de confinamiento también deberán repararse. La superficie del muro deberá encontrarse libre de polvo y partículas.
- b) Posteriormente, las bandas de polipropileno deben disponerse de manera que se forme una malla. Para unir las bandas entre sí y formar las intersecciones de la

mallas es conveniente utilizar un soldador de plástico, como se muestra en la figura 49.

- c) Los muros deben encontrarse cubiertos en su totalidad por las mallas, esto incluye las aberturas de puertas y/o ventanas.
- d) Para conectar la malla a la mampostería se deben realizar perforaciones sobre el muro, donde puedan ser colocados los conectores. La selección y colocación de conectores debe ser cuidadosa, puesto que estos podrían llegar a rasgar o cortar las bandas. Para esto se sugiere la colocación de separadores (piezas de plástico, o cualquier otro elemento rígido) entre las bandas y los conectores. Es recomendable aumentar la densidad de los conectores cerca de las intersecciones entre muros y/o las esquinas de estos. Se recomienda que la distancia máxima de separación entre conectores sea equivalente a cuatro veces la dimensión de la cuadrícula de la malla conformada por las bandas.
- e) Después de anclar la malla a la mampostería, habrá de cubrirse la superficie del muro con un recubrimiento, el cual puede ser a base de mortero de cemento o concreto.



Figura 49. Proceso de pegado de bandas para la formación de la malla de polipropileno (Sathiparan, 2012).

En la figura 50, pueden observarse, de manera esquemática las distintas disposiciones de las bandas de polipropileno que pueden ser adoptadas para llevar a cabo la rehabilitación. Cabe resaltar que las disposiciones de bandas mostradas corresponden a las ya ensayadas por Mayorca (2003) y Sathiparan (2012).

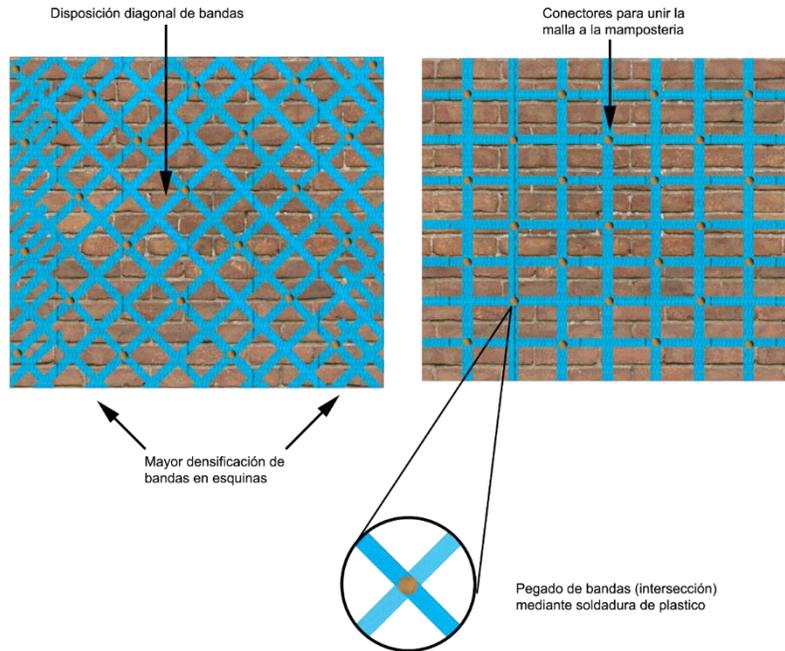


Figura 50. Esquema de disposición de bandas de polipropileno para el encamisado de muros de mampostería (Elaboración propia).

La efectividad de la técnica depende, en gran medida, de que tan ajustadas se encuentren las bandas a la mampostería. Cuanto más ajustada se encuentre la malla, mejor será el comportamiento de la estructura. Es importante mencionar que la bibliografía asociada al desarrollo de esta técnica no menciona la complejidad ni el tiempo promedio invertido en la ejecución de esta técnica (sobre todo en la conformación de la malla y su anclaje al muro), por lo que esto representa un área de oportunidad para el desarrollo de nuevos programas experimentales que se enfoquen en la eficiencia constructiva de esta técnica.

También, es importante colocar un recubrimiento sobre la superficie del muro con la malla, ya que así se buscará rellenar los espacios que existan entre la malla y la mampostería, y así asegurar el buen desempeño de la rehabilitación, a su vez que el recubrimiento brindará protección ultravioleta a las bandas y permitirá brindar un mejor acabado a los muros.

3.5.3 Polímeros reforzados con fibras (PRF)

Se define a los compuestos de polímeros reforzados con fibras (PRF) como una matriz de polímeros, termofija o termoplástica, la cual es reforzada con fibras de refuerzo con una relación de aspecto longitud-diámetro suficiente para brindar un refuerzo adecuado en una o más direcciones. Estos compuestos son considerados anisotrópicos, es decir, que sus propiedades se hacen presentes en la dirección donde se aplica la carga, por lo que se puede afirmar que las propiedades de los compuestos de PRF son direccionales, y por esto, las propiedades mecánicas se encuentran en la dirección longitudinal de las fibras (Gaytán, 2002).

Para lograr una adecuada adhesión entre las fibras y la superficie donde serán colocadas (en este caso, mampostería) es necesaria la aplicación de resina. Las resinas tendrán la función de transferir la carga entre las fibras que conformen el refuerzo, actuando como pegamento para mantener las fibras unidas, y a su vez, protegerlas de daños ambientales y/o mecánicos. Las resinas se dividen en dos grupos: termoplásticas y termofijas. Las resinas termoplásticas pueden ser moldeadas al estar en contacto con calor, y se vuelven rígidas al enfriarse; por otra parte, las resinas termofijas se presentan generalmente de manera líquida o sólida con bajo punto de ebullición, y son curadas con el uso de catalizadores, calor, o la combinación de ambos. Estas últimas son mayormente utilizadas en la industria de la construcción y se presentan como resinas poliéster, epoxi, viniléster y fenólicas.

La selección de fibras para un proyecto de rehabilitación debe ser cuidadosa, ya que si bien, los polímeros reforzados con fibras tienen grandes beneficios, también existen factores como la humedad, el fuego, la temperatura, los rayos ultravioleta y la corrosión, que pueden afectar las propiedades mecánicas de estos compuestos, por lo que el desarrollar adecuadamente el procedimiento constructivo de colocación, y a su vez brindar un mantenimiento periódico, asegurarán, en gran medida, la adecuada calidad de la rehabilitación con estos compuestos.

Fibras de vidrio

Estas están conformadas por una composición de sílice - alúmina - cal. Las fibras de vidrio para los compuestos reforzados son producidas, generalmente, en diámetros que van de los 0.009 a los 0.023 mm. El vidrio es considerado una fibra de buena resistencia al impacto, sin embargo, posee un peso mayor que el carbono y la aramida. Estas fibras tienen excelentes propiedades de resistencia, que incluso podrían ser comparables con el acero. A su vez, los compuestos hechos con este material exhiben propiedades aislantes tanto térmicas como eléctricas muy buenas.

Fibras de carbono

Para la elaboración de fibras de carbono es empleada una combinación de poliacrilonitrilo, precursores de brea y fibras de rayón. En general, el costo de este tipo de fibras es elevado, resultando más costosas que las fibras de vidrio; sin embargo, las fibras de carbono ofrecen una buena combinación de resistencia, ligereza y alto módulo. En términos de la resistencia a tensión, no existe diferencia entre las fibras de carbono y las fibras de vidrio, mientras que el módulo de elasticidad de las fibras de carbono es aproximadamente la tercera parte más que para las fibras de vidrio.

Las fibras de carbono pueden presentarse a manera de filamentos continuos de hilos jalados, como fibras cortadas o incluso como colchonetas. Los compuestos de fibra de carbono suelen ser más frágiles que el vidrio y la aramida. El uso de fibras de carbono debe ser cuidadoso, pues estas fibras pueden causar corrosión galvánica cuando son usadas cerca de algún metal, para evitar este problema pueden utilizarse materiales de protección, tales como el vidrio o la resina.

Fibras de aramida

Las fibras de aramida son consideradas como fibras orgánicas artificiales. Estas fibras ofrecen buenas propiedades mecánicas con una baja densidad y con una alta resistencia

al impacto. Las fibras de aramida se caracterizan por tener una alta resistencia a tensión (mayor que las fibras de vidrio), un módulo de elasticidad mediano (50% mayor que el vidrio) y una densidad muy baja, comparada con las fibras de vidrio o carbono. Las fibras de aramida también poseen propiedades de aislamiento, tanto eléctrico, como térmico, y a su vez, son resistentes a solventes orgánicos, combustibles y lubricantes.

3.5.3.1 Descripción de la técnica

La técnica consiste en adherir, mediante el empleo de resinas (comúnmente resina epoxi), bandas o láminas de polímeros reforzados con fibras (PRF) a la superficie de la mampostería.

Esta técnica considera dentro de sus objetivos los siguientes puntos:

- Restaurar la capacidad original de los elementos que hayan sufrido deterioro.
- Incrementar la capacidad de carga, la ductilidad y la capacidad a flexión (resulta algo complejo) y fuerza cortante de los muros.

Es una técnica de sencilla y rápida aplicación. Además, el peso de la estructura no se ve significativamente modificado debido a la ligereza del material y al bajo volumen que es empleado. Sin embargo, es una técnica que requiere de mano de obra especializada y capacitada, por lo que los costos puedan discrepar en cierta medida de los costos de técnicas más comúnmente usadas en México.

3.5.3.2 Revisión de la literatura

En la actualidad, el estudio de los polímeros reforzados con fibras como material para rehabilitar muros de mampostería ha ido gradualmente en aumento, pues este material ha mostrado no sólo tener buenas propiedades mecánicas, sino que los tiempos de construcción son considerablemente bajos. A continuación, se mencionan algunos de los programas experimentales que han estudiado el comportamiento sísmico de muros rehabilitados mediante esta técnica.

D. Weng, X. Lu, C. Zhou, T. Kubo y K. Li (2004): Un total de 13 muros a base de mampostería simple, hechos con piezas macizas de barro recocido, fueron reforzados bajo distintas configuraciones con fibra de vidrio (GPRF) y con malla de alambre soldado y mortero. Estos especímenes fueron sometidos a un ensaye bajo carga lateral cíclica y carga vertical constante. Una de las variables de estudio fue la influencia en la excentricidad debida a la presencia de la fibra de vidrio en una o ambas caras de los muros. Para la rehabilitación se emplearon dos tipos distintos de fibra de vidrio: fibra de baja resistencia, bidireccional y fibra de alta resistencia, unidireccional. Analíticamente, el muro reforzado con malla de alambre soldado y mortero por ambas caras mostró ligeramente una mayor efectividad que los muros rehabilitados con GPRF de alta resistencia; por otra parte, la efectividad de un muro rehabilitado por ambas caras con GPRF de alta resistencia fue aproximadamente igual a la de un muro rehabilitado por ambas caras con GPRF de baja resistencia. En general, el comportamiento de los muros fue adecuado, sin embargo, se presentó ruptura en las fibras de vidrio debido desprendimiento de la capa (“piel”) superficial de la mampostería, como se muestra en la figura 51, en esta misma figura se muestran algunas curvas de comportamiento histerético

de los especímenes analizados. El empleo de GPRF logró mejorar notablemente el mecanismo de falla frágil que es característica en los muros de mampostería simple, ya que esta técnica permitió una mejor distribución del agrietamiento sobre la mampostería y evitó la falla súbita de los muros. Los resultados experimentales mostraron también un aumento en la capacidad de disipación de energía, con un incremento de 175% a 286.5% en promedio.

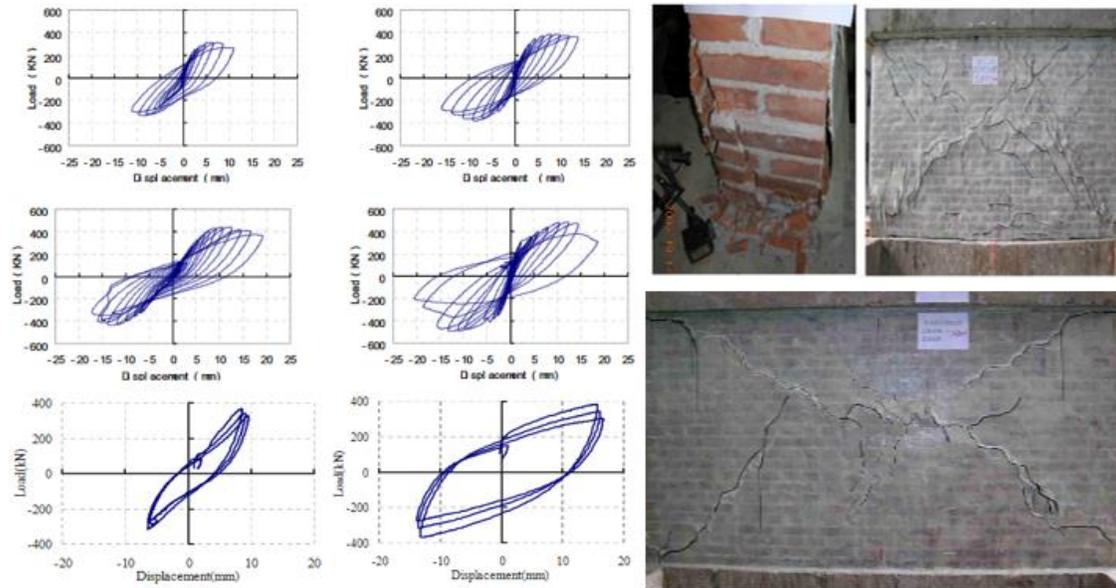


Figura 51. Falla en los muros rehabilitados con GFRP (Weng, 2003)

S. Arifuzzaman y M. Saatcioglu (2012): Un muro de mampostería reforzada interiormente, hecho a base de tabique de arcilla hueco se rehabilitó, en una de sus caras, mediante el empleo de láminas y anclajes de fibra de carbono (CPRF) con la finalidad de mejorar su capacidad de carga lateral. Los anclajes, elaborados de CPRF, se utilizaron principalmente para evitar una separación prematura de las láminas de CPRF de la mampostería. Los anclajes se fabricaron cortando piezas de 200 x 250 mm de lámina de CPRF. Estas piezas se enrollaron manualmente para formar un ancla de 250 mm de longitud, de los cuales 100 mm se colocaron dentro de la mampostería y los 150 mm restantes se mantuvieron externos, en forma de abanico. Las anclas fueron colocadas a lo largo de la diagonal principal del muro, con una inclinación de 15 grados para garantizar la unión de las fibras cuando las fuerzas de tensión diagonal actuaran. Al final del ensayo, el muro rehabilitado con CPRF mostró un mejor comportamiento en comparación con el muro de control. La resistencia a carga lateral aumentó significativamente, alcanzando 1.5 veces la capacidad del muro sin rehabilitar. Adicionalmente, el encamisado controló de manera eficaz el agrietamiento por tensión diagonal en el muro. El anclaje colocado sobre la superficie del muro falló gradualmente ante una distorsión de 0.75%, generando una caída en la resistencia de 37% respecto a la máxima alcanzada; aún después de la falla, esta resistencia se mantuvo hasta llegar a una distorsión de 4.5%. El anclaje colocado en la base del muro permaneció intacto hasta el final del ensayo, por lo que no se presentó falla por deslizamiento. En su lugar, se presentó una falla por aplastamiento de la mampostería en la base del muro. En la figura 52 puede observarse una comparación entre el comportamiento histerético en el muro no rehabilitado (izquierda), y el muro rehabilitado

en una de sus caras con CPRF, también, se muestran las anclas que se emplearon para el encamisado.

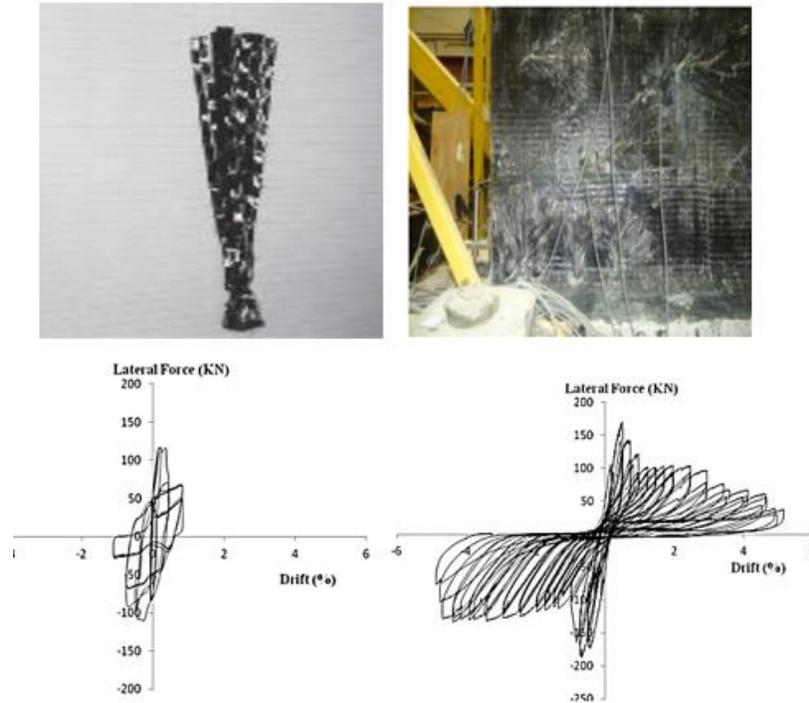


Figura 52. Anclas de CPRF empleadas para el encamisado (arriba) y comportamiento histerético del muro sin rehabilitar (izq.) y del muro rehabilitado con láminas de CPRF (der.) (Arifuzzaman, 2012).

E. Akin, E. Canbay, B. Binici y G. Özcebe (2015): Se realizó un ensayo en marcos de concreto reforzado con muros diafragma de tabique de arcilla multiperforado que fueron construidos a escala 1:2. Los especímenes se agruparon en dos series de muros (serie L y serie N) con relaciones de aspecto distintas. En cada serie se ensayaron dos muros, uno sin rehabilitar y el otro con una rehabilitación a base de bandas diagonales de fibra de carbono. Para conectar las bandas al muro se fabricaron taquetes mediante el enrollado y unión de tiras de CPRF, éstos pasaron a través de orificios de 10 mm de diámetro y tuvieron 70 mm de longitud. Durante la construcción de los especímenes se buscó, de manera intencional, crear un sistema de columna débil – viga fuerte, con la finalidad de ejemplificar una deficiencia común en edificios de concreto reforzado en Turquía. En la figura 53 se muestra la configuración de las fibras y los conectores en los modelos a rehabilitar. Al finalizar el ensayo se observó un incremento de 2.23 y 1.42 veces en la resistencia, así como un aumento en la disipación de energía de 3 y 4.10 veces en los especímenes rehabilitados de las series L y N, respectivamente, en comparación con cada muro de referencia. En los muros rehabilitados se presentó desprendimiento de los anclajes y ruptura de las bandas de CPRF.

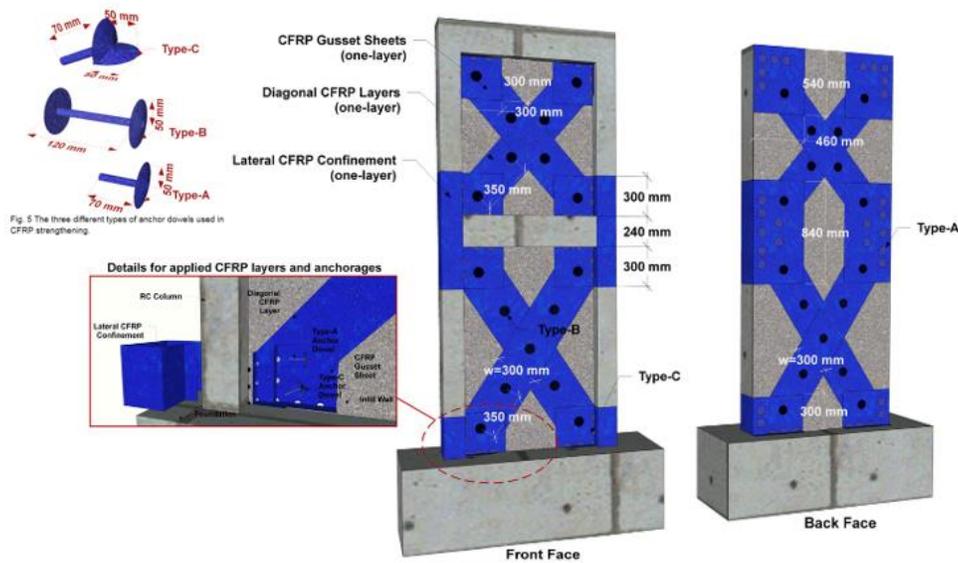


Figura 53. Configuración de la rehabilitación con CPRF (Akin, 2015).

Z. Zheng, X. Pan y X. Bao (2018): En este estudio se llevó a cabo un análisis estático no lineal (pushover) de un marco de concreto reforzado de tres crujeías y cinco niveles, con la finalidad de comparar la efectividad de distintos esquemas de rehabilitación en muros diafragma de mampostería de piezas macizas de barro recocido, mediante el encamisado con bandas de fibra de carbono. Se estudiaron un total de 12 esquemas de rehabilitación, de los cuales se comparó su curva de comportamiento no lineal, su resistencia, distorsiones máximas, plastificación en marcos y la máxima energía disipada. Los 12 esquemas se estudiaron bajo cuatro variantes distintas de rehabilitación: a) encamisado únicamente de las columnas con fibra de carbono, b) encamisado únicamente de vigas con fibra de carbono, c) colocación diagonal de bandas de fibra de carbono sobre la superficie de la mampostería únicamente y d) el encamisado de columnas y de muros (diagonalmente).

Del análisis realizado se concluyó que, entre todos los esquemas de rehabilitación considerados, el esquema en el cual se rehabilitaron los muros en conjunto con las columnas mostró el mayor aumento de resistencia y disipación de energía. En la figura 54 se muestra, además de la configuración de bandas para el encamisado, las curvas de comportamiento resultantes para cada modelo. También se observó que la rigidez global de los muros rehabilitados con fibra de carbono no se modificó considerablemente en comparación con los muros sin rehabilitar.

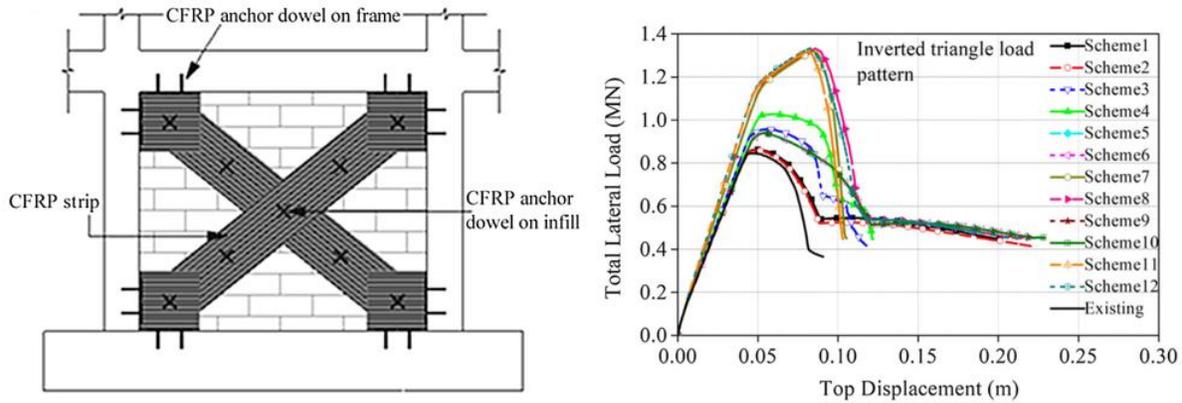


Figura 54. Configuración de bandas de CPRF en los modelos a rehabilitar (izq.) y curvas de comportamiento de cada modelo ensayado (der.) (Zheng, et al., 2018).

3.5.3.3 Metodología de implantación

Requisitos de análisis y diseño

Respecto al análisis, se sugiere suponer un comportamiento monolítico de sección compuesta del muro de mampostería con el encamisado de PRF, implicando que existe contacto completo entre ambos elementos. También, dado que el incremento de rigidez en la estructura al colocar PRF es bajo, se recomienda que sólo se considere el momento de inercia y el área de corte del muro sin rehabilitar.

El diseño y la disposición de las bandas o láminas de PRF debe considerar las zonas del muro donde existe la mayor concentración de esfuerzos, así como las posibles regiones donde se pueden aplastar y/o desprender las piezas debido a carga lateral. Debe tomarse en cuenta que el agrietamiento por fuerza cortante en los muros estará controlado por la disposición de las bandas o láminas de PRF adheridas a la superficie de la mampostería, ya que éstas trabajan de forma unidireccional, por lo que su orientación depende de la característica estructural que se busque mejorar.

Es recomendable, de acuerdo con la literatura (Zheng, 2018), modelar las bandas de PRF como puntales sometidos a tensión uniaxial. Así mismo, el ancho de las bandas que sean colocadas puede asimilarse al ancho calculado de los puntales, de esta manera, los puntales pueden mantenerse “íntactos” y soportar grandes deformaciones antes de que fallen las bandas de PRF.

En ACI440.7R-10, se sugiere hacer un análisis previo de las condiciones de configuración estructural existentes para determinar si es práctico o no, implantar esta técnica en los muros de mampostería. Estas sugerencias se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Limitaciones del uso de bandas de PRF en la rehabilitación de muros de mampostería (ACI440.7R-10).

Tipo de pieza	Características del muro	Condiciones del encamisado con PRF
Piezas huecas	$t_{\text{muro}} \leq 20$ cm Celdas rellenas o parcialmente rellenas de mortero separadas entre sí a más de 1.20 m	Es aceptable encamisar una cara del muro
	$t_{\text{muro}} \leq 20$ cm Celdas rellenas o parcialmente rellenas de mortero separadas entre a una distancia menor o igual que 1.20 m	Es necesario encamisar ambas caras del muro
	$25 \text{ cm} \leq t_{\text{muro}} \leq 30$ cm Celdas rellenas o parcialmente rellenas de mortero separadas a más de 1.50 m	Es necesario encamisar ambas caras del muro
	$25 \text{ cm} \leq t_{\text{muro}} \leq 30$ cm Celdas rellenas o parcialmente rellenas de mortero separadas a una distancia menor o igual que 1.50 m	El uso de PRF no es recomendable
	$t_{\text{muro}} > 30$ cm Celdas huecas o parcialmente rellenas	El uso de PRF no es recomendable
Piezas macizas	$t_{\text{muro}} \leq 10$ cm Muros con una sola hilada de piezas	Es aceptable encamisar una cara del muro
	$t_{\text{muro}} \leq 20$ cm Muros con dos hiladas de piezas	Es necesario encamisar ambas caras del muro
	$t_{\text{muro}} > 20$ cm Muros con varias hiladas de piezas	El uso de PRF no es recomendable

Requisitos de construcción

Los procedimientos para instalar el refuerzo a base de PRF es generalmente variable. Las diferencias entre procedimientos pueden variar en función de las especificaciones del fabricante, el tipo de fibra a emplear, el tipo de sistema y el estado de la estructura a rehabilitar, entre otras. A continuación, se describen, de manera general, las principales consideraciones para la implantación de polímeros reforzados con fibras en sistemas a base de muros de mampostería.

Preparación de la superficie del muro previa a la adhesión de PRF

- La superficie del muro debe quedar limpia, libre de polvo, partículas o restos del recubrimiento (en caso de tenerlo).
- Es necesario que la superficie de los muros se encuentre a temperatura ambiente (aprox. 20°C); no debe encontrarse fría, húmeda o mojada a menos que el fabricante lo indique. La temperatura deberá mantenerse durante el curado (al menos 24 h).
- En caso de ser necesario, habrán de repararse las grietas presentes en la mampostería. La superficie debe quedar lisa, en la medida de lo posible.

Aplicación del encamisado con PRF

- Deberá colocarse la imprimación o masilla de manera uniforme sobre la superficie del muro donde se colocarán las fibras. Habrá de evitarse la contaminación por

polvo, partículas, humedad u otros contaminantes en la imprimación aplicada, antes de la colocación de PRF.

- b) Una vez que se haya completado el proceso de curado de la imprimación o masilla deberá colocarse la resina sobre la superficie previamente preparada.
- c) Las fibras deberán colocarse sobre la superficie, donde se haya colocado la resina. Se recomienda que las fibras se impregnen previamente por separado, antes de ser colocadas. La configuración de las fibras estará en función de las indicaciones del fabricante, así como de los requisitos del proyecto de refuerzo y/o rehabilitación. En la figura 55 se muestran distintas configuraciones empleadas para esta técnica. Una vez colocadas sobre la superficie, debe asegurarse su correcta adhesión mediante presión suave y uniforme.
- d) Las fibras deberán cubrirse con resina saturante una vez colocadas. Es necesario eliminar el aire atrapado entre las capas de resina, antes de que ésta se endurezca. En caso de añadir capas adicionales de fibras, éstas deberán colocarse antes de que la capa de resina anterior se cure, para evitar desprendimientos.
- e) La resina deberá curarse de acuerdo con lo indicado por el fabricante. Mientras que las resinas se encuentren en fase de curado, deberá tenerse cuidado de la exposición a temperaturas adversas, contacto con agua, polvo o suciedad, luz solar excesiva y alta humedad. Es recomendable proteger de manera temporal el encamisado, mediante algún elemento como plástico o carpas.

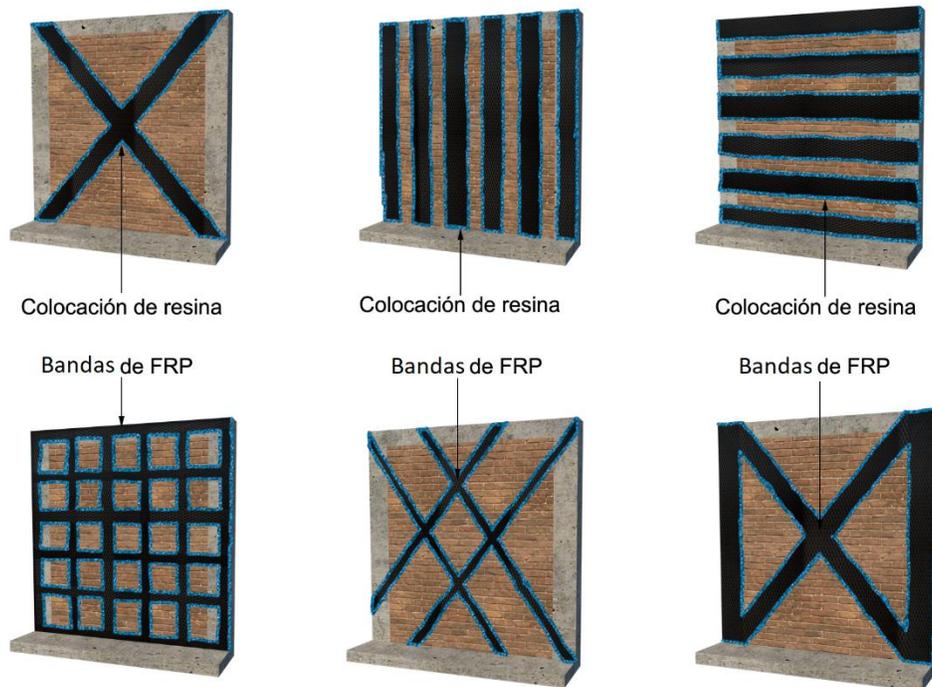


Figura 55. Configuración de encamisado con bandas de PRF. (Elaboración propia)

Empleo de conectores de PRF

Es aceptable el uso de conectores hechos de PRF para evitar el desprendimiento de las fibras de la superficie de la mampostería. Para la elaboración y colocación de conectores de PRF se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

- a) Para la elaboración de los conectores, la tela u hoja de fibras debe cortarse de forma perpendicular a la dirección de las fibras. Las dimensiones de corte estarán definidas conforme a los requisitos de diseño. La pieza recortada se enrolla en forma de cilindro con diámetro previamente definido. Uno de los extremos del cilindro tiene que amarrarse, para posteriormente insertarse en la perforación realizada en el muro. El otro extremo debe cortarse de manera longitudinal en varias tiras, buscando obtener la forma de una escobeta o abanico.
- b) Deberán perforarse los agujeros para los conectores. Se sugiere que la perforación se realice con un diámetro 3 o 4 mm mayor al diámetro del ancla, para permitir la colocación de resina. Los agujeros deberán quedar libres de polvo o material suelto, para asegurar una correcta adherencia.
- c) Dentro de la perforación y sobre la superficie de colocación del ancla habrá de aplicarse una imprimación de resina, que posteriormente deberá dejarse curar, para continuar con el proceso.
- d) Una vez que la imprimación de resina ha completado su proceso de curado, deberá aplicarse resina saturante sobre la superficie de colocación y dentro del agujero.
- e) El conector deberá introducirse de manera cuidadosa a través de los agujeros. Las fibras que queden expuestas deberán acomodarse para alcanzar la forma de abanico.
- f) Una segunda capa de resina se aplica, para saturar a la fibra y el conector. Una vez colocada, nuevamente tendrá que realizarse el proceso de curado de acuerdo con lo indicado por el fabricante.

3.5.4 Textiles estructurales

Como se mencionó anteriormente, los polímeros reforzados con fibra (PRF) se han convertido en materiales cada vez más empleados en el ámbito de la rehabilitación sísmica de estructuras. Sin embargo, la unión entre PRF y mampostería es posible, principalmente gracias a resinas (epoxi, por lo general). A pesar de esto, en la práctica constructiva existen ciertas desventajas relacionadas al empleo de resinas o materiales epoxi. De acuerdo con Kouris y Triantafyllou (2018), en el empleo de materiales epoxi para rehabilitar muros de mampostería se pueden considerar las siguientes desventajas:

- a) Existe un alto potencial de daño para los trabajadores si los epoxi no son trabajados con cuidado.
- b) Pérdida de adherencia en superficies húmedas.
- c) Poca permeabilidad al vapor; las matrices orgánicas (materiales epoxi) no son permeables, por lo que se podrían presentar afectaciones en el lado opuesto de los muros rehabilitados o incluso en muros colindantes.
- d) Problemas de compatibilidad térmica; al tener diferentes coeficientes térmicos (material epóxico y mampostería), se pueden llegar a generar deformaciones

debido a temperatura, además de que es necesario mantener la superficie de la mampostería cálida, para una adecuada adherencia de material epóxico.

- e) Nula protección al fuego.
- f) Irreversibilidad; al emplear resinas poliméricas, éstas no podrán futuramente desprenderse de la mampostería.
- g) Mala adherencia en superficies rugosas. La superficie de la mampostería debe ser cuidadosamente tratada, pues cualquier irregularidad podría representar una pérdida de efectividad al emplear matrices orgánicas.
- h) Costo elevado.

Por las desventajas anteriormente mencionadas es que se ha considerado el empleo de matrices inorgánicas que representen una solución viable para la rehabilitación de muros de mampostería. Como solución, se ha propuesto el empleo de morteros reforzados con fibras textiles (*Textile Reinforced Matrix*, “TRM”, por sus siglas en inglés), o también conocidos como textiles estructurales, los cuales consisten en un material compuesto que comprende la conformación de fibras embebidas en una matriz de pegado inorgánica.

El encamisado de muros de mampostería con textiles estructurales representa una técnica relativamente nueva, pues apenas se han desarrollado pocas investigaciones y programas experimentales para probar su efectividad en el campo de la rehabilitación sísmica. En la figura 56 se muestra distintos tipos de textiles utilizados en la rehabilitación estructural.

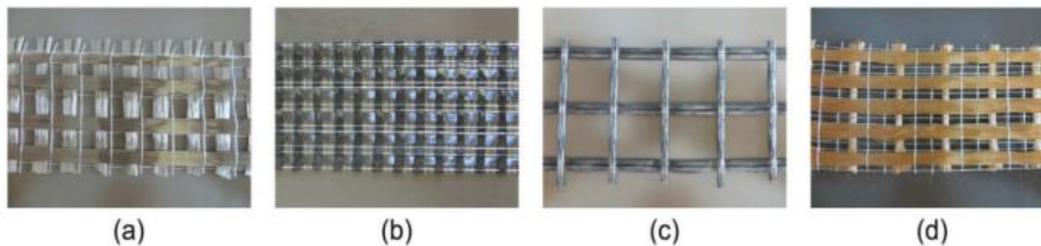


Figura 56. Textiles de a) Basalto, b) Carbono, c) Vidrio, d) PBO (Elsanadedy et al., 2019).

En general, los textiles estructurales presentan una menor capacidad de adhesión a la superficie de la mampostería en comparación con los PRF. Como tal, la matriz inorgánica no puede penetrar completamente entre las fibras, debido principalmente a las dimensiones de los agregados empleados en la matriz (por ejemplo, los agregados usados para la elaboración del mortero). Gracias a la penetración “desigual”, el modo de falla esperado para los muros rehabilitados con esta técnica es por deslizamiento, aunado a aplastamiento de piezas debido a niveles de tensión desiguales en el plano del muro rehabilitado.

3.5.4.1 Descripción de la técnica

La técnica consiste en la aplicación de un mallado conformado por fibras, que se encuentra embebido en una matriz inorgánica para su adhesión a la mampostería. Se pueden emplear fibras de vidrio, carbono, basalto, aramida, polipropileno o acero. La matriz inorgánica más común empleada es a base de mortero de cemento.

3.5.4.2 Revisión de la literatura

Como se mencionó anteriormente, esta técnica fue introducida recientemente al campo de la rehabilitación sísmica de muros de mampostería, por lo que no existen suficientes programas experimentales que analicen el efecto de esta técnica en el comportamiento de muros de mampostería a escala real. La mayoría de los experimentos se han llevado a cabo en muretes o muros de escala muy pequeña, por lo que resulta complicado el extrapolar sus resultados para reproducir el comportamiento de estructuras reales. Además, gran parte de los experimentos se han sometido a pruebas estáticas, donde se ha evaluado principalmente el comportamiento de la técnica ante compresión diagonal o flexión fuera del plano. Es conveniente que esta técnica sea mayormente evaluada mediante ensayos a escalas mayores y ante pruebas dinámicas, para obtener datos más precisos respecto al comportamiento de esta técnica en muros sometidos a cargas laterales (sismo, por ejemplo).

Durante la revisión de la literatura se encontró únicamente un programa experimental en el que se ensayó un muro de mampostería rehabilitado empleando una malla de fibra de vidrio y una matriz de mortero de cemento. A continuación, se describe este modelo de manera más precisa.

H. Guerrero y C. Lubin (2021): Se llevó a cabo el ensaye de 13 especímenes a base de mampostería confinada de piezas sólidas de arcilla. De los 13 especímenes, uno fue rehabilitado empleando un textil estructural a base de fibra de vidrio y una matriz de mortero de cemento industrializado. El muro se sometió a un ensaye bajo carga cíclica reversible, con la finalidad de evaluar y comparar el comportamiento del muro respecto al empleo de otras técnicas, como el encamisado con malla de alambre soldado, el encamisado con morteros especiales con fibras y contraventeos restringidos al pandeo. Con la finalidad de determinar la aportación de la malla a la resistencia lateral del muro rehabilitado, tres muretes fueron construidos y ensayados. Al finalizar el ensaye se comprobó el aumento en la resistencia del muro rehabilitado respecto al muro original, el muro rehabilitado alcanzó una resistencia cercana a 20 t. El modo de falla del muro rehabilitado fue por fuerza cortante. En comparación con los demás especímenes, la técnica de encamisado textil presentó resultados muy similares tanto en resistencia como en capacidad de deformación respecto a las otras técnicas. En la figura 57 se muestran detalles del procedimiento constructivo del muro rehabilitado.



Figura 57. Encamisado textil con fibra de vidrio y curva de comportamiento histerético (Lubin, 2021).

En la figura 58 se muestran las curvas de comportamiento histerético asociadas al modelo sin rehabilitar (M8), y el modelo rehabilitado (M8R), es posible apreciar el cambio en el comportamiento debido al efecto de la rehabilitación.

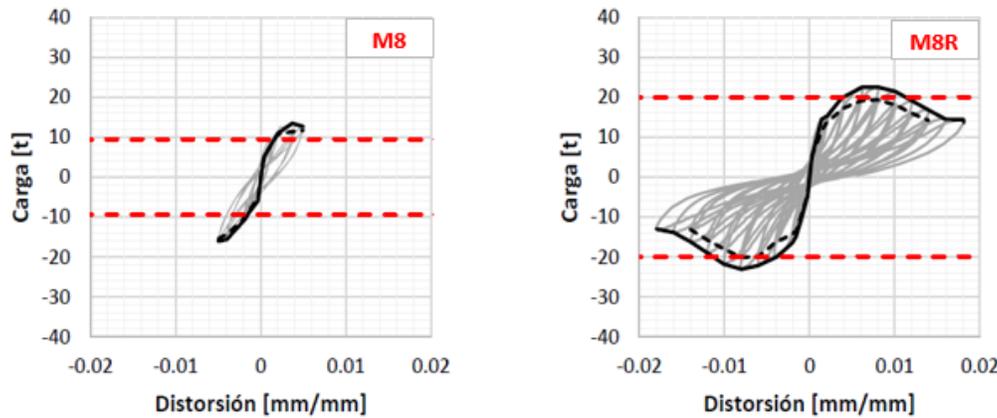


Figura 58. Curvas de comportamiento histerético del modelo sin rehabilitar (izq.) y el modelo rehabilitado (der.) (Lubin, 2021).

3.5.4.3 Metodología de implantación

Requisitos de análisis y diseño

En muros en los que se emplee esta técnica el modo de falla deseable debe considerar la falla de la mampostería en compresión o la falla de las fibras textiles en tensión. A continuación, se muestra en la figura 59 con base en Kouris y Triantafillou (2018), los principales modos de falla asociados a una unión incorrecta entre la matriz inorgánica (mortero), el refuerzo (fibras) y la mampostería. Los mecanismos de falla que pueden formarse en la interacción de la mampostería con el encamisado textil son:

- Deslizamiento entre la mampostería y el encamisado textil debido a una falla por corte en la mampostería.
- Deslizamiento entre la mampostería y el encamisado textil debido a una falla por corte en la matriz inorgánica.
- Deslizamiento de la fibra.
- Rotura de la fibra.

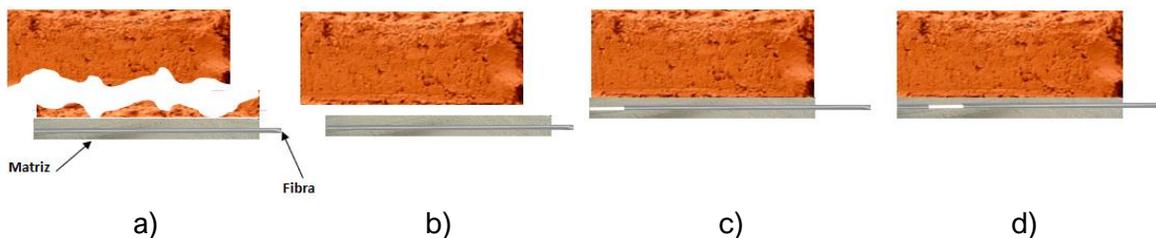


Figura 59. Modos de falla asociados a la pérdida de cohesión entre a) la mampostería y el encamisado textil (por falla en la mampostería), b) la mampostería y el encamisado (por falla en la matriz inorgánica), c) la fibra y la matriz inorgánica (deslizamiento), d) falla total del textil. (Elaboración propia con base en Kouris y Triantafillou, 2018)

Si pudiera observarse a nivel microscópico lo que sucede en cada componente cuando se presenta el mecanismo de falla, se podría apreciar que la ocurrencia del deslizamiento es inducida por la fricción entre los filamentos interiores y exteriores de las fibras debido a una impregnación no uniforme de la matriz inorgánica. Esto provoca que se genere una zona de tensiones no uniformes en los filamentos interiores y una zona de tensiones mayores en los filamentos exteriores. En sí, podría considerarse que la capacidad de unión entre la mampostería y el encamisado textil determina la fuerza máxima de tensión que puede soportar el muro rehabilitado.

Se ha considerado, para la determinación de la resistencia a fuerza cortante de los muros de mampostería rehabilitados mediante esta técnica, que la resistencia considerará la contribución tanto de la mampostería como la del encamisado textil.

Requisitos de construcción

Al igual que en las demás técnicas de encamisado, el procedimiento constructivo debe llevarse a cabo con el cuidado y la supervisión necesarias para asegurar la calidad y efectividad de la rehabilitación. Para esto, se sugiere tomar en cuenta los siguientes puntos, durante la construcción de la rehabilitación:

- a) Es necesario que antes de la colocación del mortero con fibras, la superficie del muro se encuentre limpia, libre polvo o partículas. Es recomendable aplicar un martelinado suave (logrando una rugosidad de 3 mm) al muro, con la finalidad de crear una superficie rugosa y mejorar la adherencia del mortero.
- b) Una vez que la superficie del muro se encuentra limpia y escarificada, debe aplicarse una capa de mortero directamente en la superficie de la mampostería, con la finalidad de impregnar, en la medida de lo posible, la mayor área de posible y asegurar que el encamisado no se desprenda o falle de manera prematura. Es sugerible colocar una capa de 5mm.
- c) Una vez colocada la primera capa de mortero, debe colocarse la malla de fibra (carbono, vidrio, acero, entre otras). Es importante que la malla quede correctamente unida a la mampostería y a la capa de mortero, para asegurar una distribución uniforme de esfuerzos. La correcta unión entre la matriz, la fibras y la mampostería es de gran importancia para la eficacia de la rehabilitación, pues una unión (conexión) inadecuada puede conducir a una falla prematura del muro. La malla de fibra puede ser colocada en distintas configuraciones; es posible encamisar por completo la superficie de la mampostería, o también colocar la malla en forma de bandas horizontales, verticales o diagonales. En la figura 60 se muestran distintas configuraciones de colocación de las mallas de fibra en muretes de mampostería.
- d) Después de colocar la malla de fibra debe colocarse otra capa de matriz inorgánica (mortero), cuyo espesor puede ser el mismo que el colocado en la primera capa.
- e) Es importante llevar a cabo el curado de los muros rehabilitados, y con esto evitar el agrietamiento por contracción del mortero. Se recomienda que los muros se curen durante al menos siete días posteriores a la colocación de la última capa de mortero. El curado consistirá en humedecer, con agua limpia, la superficie del muro durante cada hora.



Figura 60. Configuraciones de colocación del encamisado textil. (García, 2020)

3.6 ENCAMISADO CON MORTEROS ESPECIALES CON FIBRAS

Así como se han abordado técnicas tradicionales para rehabilitar muros de mampostería, como lo podría ser el empleo de malla de alambre soldado, también se ha buscado contar con nuevas técnicas, basadas en soluciones con materiales innovadores que además de mostrar un adecuado desempeño en conjunto con la mampostería, resulten asequibles. Tomando como referencia las técnicas tradicionales y a su vez la innovación en materiales, en los últimos años, se ha explorado el empleo de compuestos a base de morteros de cemento, o concretos con fibras de distintos tipos. Estas soluciones han mostrado ser eficientes en mejorar la resistencia y la capacidad de deformación en muros de mampostería ante la incidencia de fuerzas laterales. Sin embargo, a pesar de resultar una técnica innovadora y atractiva, ha sido poca la investigación que se ha realizado sobre la respuesta estructural de elementos de mampostería reforzados mediante estos compuestos.

3.6.1 Clasificación

Han sido varios los materiales que han sido estudiados trabajando de manera compuesta con mortero de cemento o concreto para rehabilitar muros de mampostería, dada la variabilidad de fibras que es muy amplia. Las hay metálicas, o de materiales plásticos/sintéticos y cada tipo cuenta con especificaciones distintas en su uso.

A continuación, se muestra una clasificación con los compuestos que han sido mayormente estudiados en las recientes investigaciones.

3.6.1.1 Morteros con fibras de acero

Este tipo de fibras se componen de alambre de acero trefilado en frío con bajo contenido de carbono. El alambre puede cortarse en distintas longitudes según el uso que vaya a tener.

Los morteros reforzados con fibras de acero han mostrado una mejora en la resistencia a esfuerzos de tracción en los muros rehabilitados, así como un mejor control del agrietamiento, gracias al trabajo generado por las fibras en el mortero. Entre los objetivos que tiene la implantación de morteros reforzados con fibras se encuentran el aporte al

incremento de la ductilidad en el encamisado. El incremento de la capacidad a compresión es ligero; por otra parte, el incremento a la capacidad a tensión se ha observado del orden del 30% al 40% cuando se agrega el 1.5% en volumen de fibras de acero. Sin embargo, el aumento de la resistencia a flexión es notablemente mayor que en compresión o tensión, pues ésta puede llegar a ser mayor que el doble al considerar un volumen de fibra de 4% (José, 2018).

3.6.1.2 Mortero con fibras de vidrio

En la actualidad el empleo de fibras de vidrio se ha vuelto más común, debido a las propiedades que, en combinación con materiales como el concreto o el mortero, se han observado durante la rehabilitación de distintos tipos de elementos estructurales. Este tipo de fibras han mostrado una excelente capacidad para controlar la fisuración del mortero o concreto. A su vez, contribuyen al incremento de la capacidad a flexión, al impacto y a la fatiga.

En la figura 61 se observan las fibras de acero y las fibras de vidrio que son comúnmente son empleadas en combinación con mortero o concreto para el refuerzo de estructuras.



a) b)
Figura 61. a) Fibras de acero, b) Fibras de vidrio (Sika,2014).

3.6.2 Descripción de la técnica

Esta técnica consiste en el recubrimiento, mediante una capa de mortero o concreto, en una o ambas caras de los muros. La mezcla de mortero o concreto empleada para el revestimiento se encuentra reforzada mediante fibras de longitud corta (en general, más pequeña que el espesor de la capa de recubrimiento), distribuidas de manera aleatoria en la matriz de mortero o concreto. Esta es una técnica que representa, entre sus ventajas, una disminución en los tiempos de ejecución de la rehabilitación, en comparación con técnicas que requieren de un mayor tiempo de intervención.

3.6.3 Revisión de la literatura

A continuación, se presenta la revisión de la literatura respecto a la realización de ensayos en muros de mampostería empleando morteros especiales con fibras como técnica de rehabilitación. Cabe resaltar que, al ser una técnica innovadora, su estudio e investigación

se está viendo potencializada, por lo que posiblemente en los próximos años se encuentren mayores investigaciones al respecto que logren estudiar de manera más precisa su efecto en el comportamiento de muros rehabilitados y con los que se logren obtener modelos de comportamiento más refinados.

L. Flores, M. Pacheco y J. Carrillo (2012): Dos muros de tabique de arcilla hueco, a base de mampostería confinada fueron previamente ensayados y llevados a un nivel de daño severo ante cargas laterales cíclicas, para posteriormente ser rehabilitados mediante dos técnicas distintas. Durante el ensaye previo a la rehabilitación ambos muros exhibieron una falla caracterizada por agrietamiento inclinado. El espécimen ME11 presentó desplazamiento permanente de la parte superior del muro, que posteriormente fue regresado a su posición original para poder rehabilitar el espécimen. La primera técnica de rehabilitación, aplicada al espécimen ME5 consistió en el encamisado del muro con malla de alambre soldado con calibre 6x6-6/6 y un recubrimiento de mortero de cemento. La segunda técnica, que fue aplicada en el espécimen ME11 consistió en un recubrimiento a base de mortero reforzado con fibra metálica marca Dramix, tipo ZP 305. La dosificación de fibra fue de 40 kg/m³. Para calcular la resistencia nominal de los muros rehabilitados se tomó en cuenta la resistencia remanente de cada muro original, para el espécimen ME5 se consideró la contribución del 50% de la resistencia de la mampostería, más la resistencia aportada por la malla de alambre. Para el espécimen ME11 se consideró la contribución del 50% de la resistencia de la mampostería, más la resistencia aportada por el recubrimiento de mortero. Al terminar los ensayes se observó que para el espécimen ME5, la resistencia del modelo reparado superó, en los ciclos positivos a la del modelo original, sin embargo, este aumento no fue significativo con respecto al espécimen ME11. Para el caso del espécimen ME11 rehabilitado, se presentó un menor número de grietas, pero de mayor espesor. Al final se observó una caída abrupta en la capacidad resistente de este espécimen debido al desprendimiento del mortero con fibras de la superficie de la mampostería. Existió muy poca diferencia en el comportamiento de ambos especímenes, por lo que se concluye que ambas técnicas son equivalentes. Ambas proporcionaron resistencias y rigideces similares, aunque, los mecanismos de falla finales fueron distintos. En efecto, el espécimen reforzado con malla de alambre presentó la formación de un mecanismo de desplazamiento, mientras que el espécimen ME11 falló por fuerza cortante. En la figura 62 se muestran los patrones de agrietamiento y las curvas de comportamiento histerético asociadas a los especímenes originales (M5 y M11) y los especímenes rehabilitados (M5-R y M11-R).

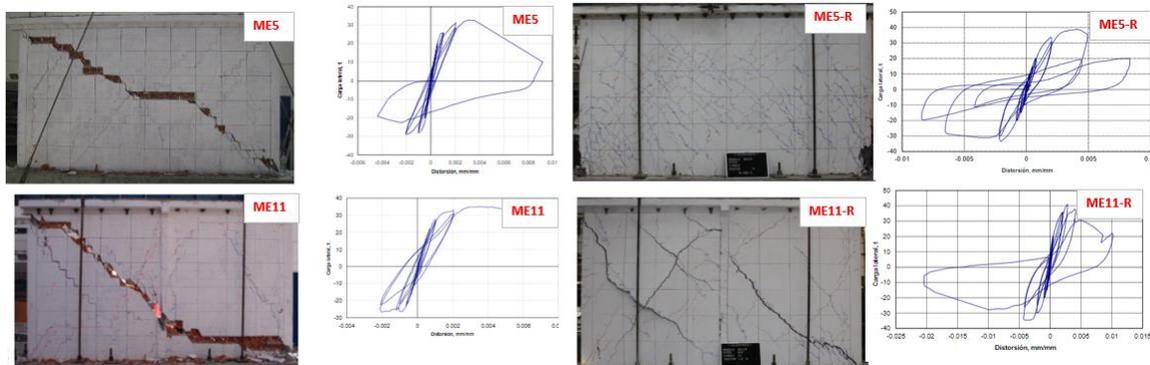


Figura 62. Patrones de agrietamiento en especímenes originales (izq.) y en especímenes rehabilitados (der.) (Flores, et al., 2012).

H. Guerrero y C. Lubin (2021): Se llevó a cabo el ensaye de 13 especímenes a base de mampostería confinada de piezas sólidas. De los 13 especímenes, cuatro fueron rehabilitados empleando morteros reforzados con fibras. Para el ensaye se consideraron dos tipos de fibra para actuar en combinación con el mortero: fibra de acero y fibras sintéticas. Se analizaron dos variantes de rehabilitación; la primera consideró únicamente el refuerzo con mortero con fibras, mientras que la segunda variante consideró un encamisado con malla de alambre y recubrimiento de mortero reforzado con fibras. Todos los muros fueron rehabilitados en una sola de sus caras. También, en todos los muros se indujo daño estructural previo. Para los muros en los que se colocó malla de alambre soldado, se emplearon clavos par concreto-colocados a cada 45 cm, con la finalidad de conectar la malla a la mampostería. La malla empleada fue de calibre 6x6-8/8. La dosificación de fibras colocadas fue de 30 kg/m^3 y 15 kg/m^3 para fibras de acero y fibras sintéticas, respectivamente. Al finalizar los ensayes logró observarse, para los cuatro muros, un incremento notable en la capacidad con respecto a la original de cada espécimen. Finalmente, los muros en los que se colocó malla de alambre soldado más la capa de mortero reforzado con fibras presentó una mayor resistencia en comparación con los muros en los que sólo se colocó una capa de mortero reforzado con fibras. El espécimen que mostró la mayor resistencia fue el que se rehabilitó con malla de alambre soldado y una capa de compresión de mortero reforzado con fibras sintéticas. En la figura 63 se muestra el patrón de agrietamiento final y las curvas de comportamiento histerético para los muros a) rehabilitado con mortero reforzado con fibras metálicas, b) rehabilitado con mortero reforzado con fibras de acero, c) rehabilitado con malla de alambre soldado y fibras sintéticas, d) rehabilitado con malla de alambre soldado y mortero reforzado con fibras de acero

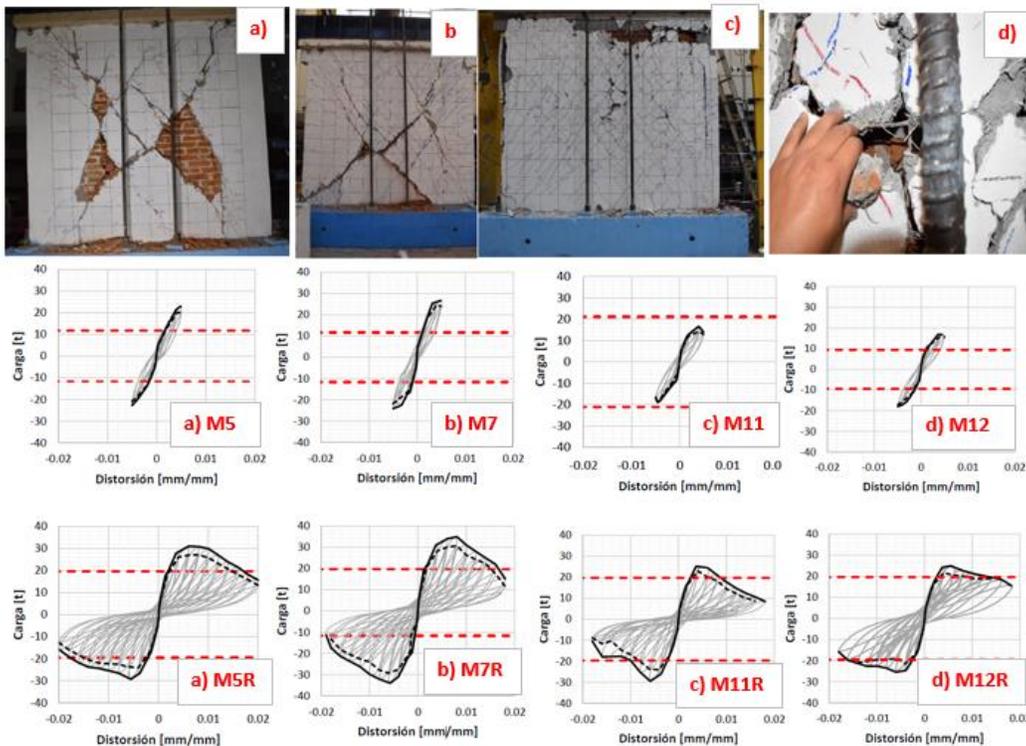


Figura 63. Patrón de agrietamiento final y curvas de comportamiento histerético en muros rehabilitados con morteros reforzados con fibras (Lubin, 2021).

3.6.4 Metodología de implantación

El estudio del comportamiento de materiales como el mortero reforzado con fibras ha ido gradualmente en aumento en los últimos años. Esta técnica no ha sido tan estudiada como lo ha sido el concreto reforzado con fibras. Por lo anterior, no existen criterios de diseño, principalmente en México, que regulen el empleo de estos compuestos en la construcción.

Requisitos de análisis y diseño

De estudios realizados por Flores (2012), se ha propuesto estimar la resistencia de muros rehabilitados mediante encamisado con fibras de acero considerando la aportación de la mampostería a resistir fuerza cortante en conjunto con la contribución del recubrimiento de mortero con fibra. Es aceptable considerar, para la aportación de la mampostería, el uso de factores de degradación de resistencia, como los expuestos en el Volumen 2 de la Metodología de Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México (INIFED, 2021b).

Flores (2012) propone obtener la aportación del mortero con fibra a la resistencia mediante la siguiente ecuación:

$$V_{mor} = \sqrt{f_b'} t_{mort} L$$

Donde

V_{mor} = Resistencia al cortante que aporta el mortero con fibra, t

f_b' = Resistencia experimental media a compresión de mortero con fibra, kg/cm²

t_{mort} = Espesor de la capa de mortero con fibra, cm

L = Longitud del muro, cm

Para la estimación de la rigidez Flores et al., (2012) propone considerar dentro del momento de inercia y el área de corte, una sección transformada de los castillos (en caso de que estos existan) y de la capa de mortero.

Requisitos de construcción

Esta esta técnica se caracteriza por el ahorro de tiempo y trabajo en su ejecución, en comparación con otras técnicas. La construcción debe llevarse con cuidado, para asegurar la efectividad de la técnica sobre el comportamiento de la rehabilitación. Para esto se sugiere considerar los siguientes puntos durante la ejecución de la técnica:

- a) Es necesario que antes de la colocación del mortero con fibras, la superficie del muro se encuentre limpia, libre polvo o partículas. Es recomendable aplicar un martelinado suave al muro (logrando una rugosidad de 3 mm), con la finalidad de crear una superficie rugosa y mejorar la adherencia del mortero
- b) Las fibras a emplear deberán ser utilizadas como agregado adicional en la mezcla de mortero y su dosificación dependerá del proyecto de rehabilitación. En la Guía Técnica para la Rehabilitación de la Infraestructura Física Educativa de México (INIFED,2021a) se sugiere emplear una cuantía de fibras (cuando se empleen fibras de acero) de 40 kg/m³, así como utilizar fibras con relación de aspecto (longitud/diámetro) mayor que 50.

- c) La aplicación de mortero con fibras sobre la superficie de la mampostería puede realizarse manualmente o mediante lanzado. Este proceso debe llevarse a cabo de manera cuidadosa, para evitar “grumos” o paquetes de fibras pegadas. Estas deberán encontrarse distribuidas en la mezcla de mortero.
- d) El espesor de la capa de mortero puede variar en función de cada proyecto. En los ensayos se han observado espesores que van desde 15 milímetros hasta 35 milímetros.
- e) Una vez que se haya colocado el recubrimiento de mortero con fibras deberá realizarse el curado del muro. Se sugiere seguir las indicaciones del fabricante, según el tipo de fibra seleccionado para el encamisado.

En la figura 64 se muestra en los incisos a) y b) la colocación y mezcla de fibras para la mezcla de mortero, en los incisos c) y d) se observa la colocación del mortero con fibras sobre la superficie de la mampostería.

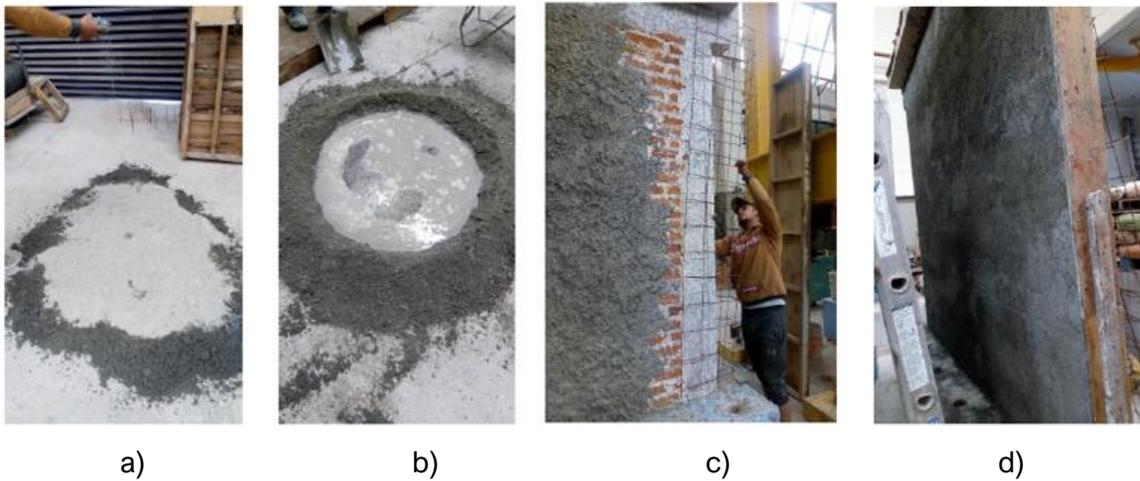


Figura 64. Procedimiento constructivo de rehabilitación de muros de mampostería empleando mortero reforzado con fibras de acero (Lubin, 2021).

3.7 Análisis comparativo de costos de rehabilitación de muros de mampostería

Adicionalmente a las consideraciones de resistencia y rigidez, un parámetro importante a tomar en cuenta durante el planteamiento del proyecto de rehabilitación sísmica de cualquier estructura es el costo. La selección de la técnica más adecuada comprende, en la mayoría de las ocasiones, un análisis con enfoque multivariable donde no solamente se estudie el incremento de resistencia o mejora del comportamiento estructural del elemento o estructura a rehabilitar, sino que también se estudien los costos de adquisición de material y de construcción, la disponibilidad de mano de obra calificada y la asequibilidad de los materiales, entre otros aspectos. Por tal motivo, a continuación, se presenta un análisis de precios unitarios de cada técnica mencionada en este capítulo. Este es un estudio general que permite dar una idea del costo relativo de las distintas técnicas estudiadas en este capítulo.

El análisis de costos se realizó con base en el elaborado por Lubin (2021) y tomando en cuenta el catálogo de precios unitarios en la Ciudad de México para el año 2021.

Para el cálculo de costo por mano de obra se tomó en consideración el valor de la Unidad de Medida y Actualización (UMA) para el año 2021. Como salario mínimo se consideró el Salario Mínimo General para el año 2021 (se descartó el salario correspondiente a la Zona Libre de la Frontera Norte de México). El cálculo del salario real se realizó de conformidad con lo establecido en la Ley Federal del Trabajo.

Cabe mencionar que el análisis de costos realizado considera aplicaciones tipo basadas en dimensiones de muros y propiedades de materiales característicos y similares a los que se han ensayado. El análisis de costos presentado no considera la obtención de una resistencia objetivo igual para cada técnica.

En las tablas 8 a 17 se muestran los cálculos realizados para obtener los costos por metro cuadrado asociados a cada técnica mencionada.

Tabla 8. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con malla de alambre soldado y mortero.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON MALLA DE ALAMBRE SOLDADO Y MORTERO						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras con malla de alambre soldado calibre 6x6-8/8, anclada con clavos para concreto. Encamisado con mortero de cemento tipo I, con resistencia a la compresión de 125 kg/cm ² , con 2.5 cm de espesor.						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Mortero tipo I Dosificación 1:4 . $f_j' = 125 \text{ kg/cm}^2$	m ³	0.025	\$ 1,526.70	\$ 38.17	24%	
Malla de alambre soldado 6x6-8/8	m ²	1	\$ 53.29	\$ 53.29	33%	
Clavos para concreto de 2 1/2" y 63.5 mm de longitud	kg	0.036	\$ 49.00	\$ 1.76	1%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 93.22	58%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 35.78	22%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 26.75	17%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 62.54	39%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 62.54	\$ 1.88	1%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 62.54	\$ 1.88	1%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 3.75	2%	
COSTO DIRECTO				\$	159.51	
COSTO INDIRECTO				16%	\$ 25.52	
				Subtotal	\$	185.03
UTILIDAD				10%	\$ 18.50	
				Subtotal	\$	203.53
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$ 0.10	
COSTO TOTAL / m²				\$	203.64	

Tabla 9. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con placa de acero.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON PLACA DE ACERO						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras con una placa de acero de 1.5 mm de espesor colocada sobre una capa de mortero 1:4 de 1 cm de espesor. La conexión de la placa a la mampostería se hará mediante pernos ajustados con tuercas y arandelas.						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Mortero tipo I Dosificación 1:4 . $f_j' = 125 \text{ kg/cm}^2$	m ³	0.01	\$ 1,526.70	\$ 15.27	2%	
Placa de acero galv cal 16 (1.5 mm) 2.43 x 1.21 m	pza	0.34	\$ 1,289.85	\$ 438.68	62%	
Tornillo hexagonal 160 mm con rondana de 1 1/2 pulg	pza	20	\$ 9.30	\$ 186.00	26%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 639.95	91%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 36.24	5%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 27.09	4%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 63.34	9%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 63.34	\$ 1.90	0%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 63.34	\$ 1.90	0%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 3.80	1%	
COSTO DIRECTO				\$ 707.08		
COSTO INDIRECTO				16%	\$ 113.13	
				Subtotal	\$ 820.22	
UTILIDAD				10%	\$ 82.02	
				Subtotal	\$ 902.24	
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$ 0.45	
COSTO TOTAL / m²				\$ 902.69		

Tabla 10. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con bandas de acero.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON BANDAS DE ACERO						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras, con bandas (soleras) de acero dispuestas en forma diagonal al centro del muro, y en forma vertical en los extremos del muro. Para anclar las bandas a los muros se emplearán pernos de acero A325 de 3/8 pulg. Las bandas se conectarán entre sí						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Solera placa 4 x 1/8" L=6 m	m	0.80	\$ 796.00	\$ 640.57	58%	
Pernos de acero A325 3/8 pulg (paquete de 4 pzas)	pza	20	\$ 10.62	\$ 212.40	19%	
Ángulos de acero 3"x 3/16 L=6 m	pza	0.2	\$ 719.54	\$ 143.91	13%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 996.88	90%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 36.41	3%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 27.22	2%	
1 Soldador	jor	0.13	\$ 336.64	\$ 43.76	4%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 107.39	10%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 107.39	\$ 3.22	0%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 107.39	\$ 3.22	0%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 6.44	0.6%	
COSTO DIRECTO				\$	1,110.71	
COSTO INDIRECTO				16%	\$ 177.71	
				Subtotal	\$ 1,288.42	
UTILIDAD				10%	\$ 128.84	
				Subtotal	\$ 1,417.26	
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$ 0.71	
COSTO TOTAL / m²				\$	1,417.97	

Tabla 11. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con bandas de polipropileno.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON BANDAS (FLEJES) DE POLIPROPILENO						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras con una malla conformada por bandas (flejes) de polipropileno de 1/2 pulg de ancho. La malla se anclará mediante clavos colocados con una densidad de 20 clavos por m ² . El encamisado será recubierto por una capa de mortero de 1.5 cm de espesor.						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Fleje de polipropileno	rollo	0.045	\$ 289.00	\$ 13.01	11%	
Mortero tipo I Dosificación 1:4 . $f_j' = 125 \text{ kg/cm}^2$	m ³	0.025	\$ 1,526.70	\$ 38.17	31%	
Clavos para concreto de 2 1/2" y 63.5 mm de longitud	kg	0.08	\$ 49.00	\$ 3.92	3%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 55.09	45%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 36.41	30%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 27.22	22%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 63.62	52%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	2%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	2%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 3.82	3%	
COSTO DIRECTO				\$	122.53	
COSTO INDIRECTO				16%	\$	19.61
				Subtotal	\$	142.14
UTILIDAD				10%	\$	14.21
				Subtotal	\$	156.35
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$	0.08
COSTO TOTAL / m²				\$	156.43	

Tabla 12. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con fibra de vidrio.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON FIBRA DE VIDRIO						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras, con fibra de vidrio colocada en el muro de mampostería mediante adhesivo epóxico.						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Malla de fibra de vidrio 1 x 50 mts	rollo	0.02	\$891.75	\$ 17.84	8%	
Adhesivo epóxico Sikadur 32 Gel	kg	0.15	\$ 962.99	\$ 144.45	63%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 162.28	71%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 36.41	16%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 27.22	12%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 63.62	28%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	1%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	1%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 3.82	2%	
COSTO DIRECTO				\$	229.72	
COSTO INDIRECTO				16%	\$ 36.76	
				Subtotal	\$ 266.48	
UTILIDAD				10%	\$ 26.65	
				Subtotal	\$ 293.13	
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$ 0.15	
COSTO TOTAL / m²				\$	293.27	

Tabla 13. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con fibra de carbono.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON FIBRA DE CARBONO						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras, con fibra de carbono colocada en el muro de mampostería mediante adhesivo epóxico.						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Malla de fibra de carbono 1 x 1.27 m	Malla	0.79	\$ 799.00	\$ 629.13	75%	
Adhesivo epóxico Sikadur 32 Gel	kg	0.15	\$ 962.99	\$ 144.45	17%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 773.58	92%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 36.41	4%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 27.22	3%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 63.62	8%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	0%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	0%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 3.82	0%	
COSTO DIRECTO				\$	841.02	
COSTO INDIRECTO				16%	\$ 134.56	
				Subtotal	\$ 975.59	
UTILIDAD				10%	\$ 97.56	
				Subtotal	\$ 1,073.15	
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$ 0.54	
COSTO TOTAL / m²				\$	1,073.68	

Tabla 14. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con encamisado textil a base de fibra de vidrio.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO TEXTIL DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON FIBRA DE VIDRIO						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras, con fibra de vidrio colocada en el muro de mampostería mediante adhesivo epóxico y recubierto con mortero industrial en una capa de 1.5 cm.						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Malla de fibra de vidrio 1 x 50 m	rollo	0.02	\$891.75	\$ 17.84	7%	
Mortero Industrial blanco Sika. Saco de 25 kg	kg	0.025	\$ 830.63	\$ 20.77	8%	
Adhesivo epóxico Sikadur 32 Gel	kg	0.15	\$ 962.99	\$ 144.45	58%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 183.05	73%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 36.41	15%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 27.22	11%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 63.62	25%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	1%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	1%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 3.82	2%	
COSTO DIRECTO				\$	250.49	
COSTO INDIRECTO				16%	\$ 40.08	
				Subtotal	\$ 290.57	
UTILIDAD				10%	\$ 29.06	
				Subtotal	\$ 319.63	
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$ 0.16	
COSTO TOTAL / m²				\$	319.78	

Tabla 15. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con encamisado textil a base de fibra de carbono.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO TEXTIL DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON FIBRA DE CARBONO						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras, con fibra de carbono colocada en el muro de mampostería mediante adhesivo epóxico y recubierto con mortero industrial en una capa de 1.5 cm.						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Malla de fibra de carbono 1 x 1.27 m	Malla	0.787	\$799.00	\$ 629.13	73%	
Mortero Industrial blanco Sika. Saco de 25 kg	kg	0.025	\$ 830.63	\$ 20.77	2%	
Adhesivo epóxico Sikadur 32 Gel	kg	0.15	\$ 962.99	\$ 144.45	17%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 794.35	92%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 36.41	4%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 27.22	3%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 63.62	7%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	0%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	0%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 3.82	0%	
COSTO DIRECTO				\$	861.79	
COSTO INDIRECTO				16%	\$ 137.89	
				Subtotal	\$ 999.68	
UTILIDAD				10%	\$ 99.97	
				Subtotal	\$ 1,099.64	
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$ 0.55	
COSTO TOTAL / m²				\$	1,100.19	

Tabla 16. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con mortero reforzado con fibras de acero.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON MORTERO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras con mortero de cemento tipo I, con resistencia a la compresión de 125 kg/cm ² , con 2.5 cm de espesor reforzado con fibra metálica. Dosificación de fibras: 30 kg/m ³						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Mortero tipo I Dosificación 1:4 . $f_j' = 125 \text{ kg/cm}^2$	m ³	0.025	\$ 1,526.70	\$ 38.17	14%	
Fibra metálica	saco	0.25	\$639	\$ 159.75	60%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 197.92	75%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 36.41	14%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 27.22	10%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 63.62	24%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	1%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	1%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 3.82	1%	
COSTO DIRECTO				\$	265.36	
COSTO INDIRECTO				16%	\$ 42.46	
				Subtotal	\$	307.82
UTILIDAD				10%	\$ 30.78	
				Subtotal	\$	338.60
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$ 0.17	
COSTO TOTAL / m²				\$	338.77	

Tabla 17. Análisis de costo de rehabilitación por metro cuadrado en muro de mampostería con mortero reforzado con fibras de vidrio.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO						
ENCAMISADO DE MURO DE MAMPOSTERÍA CON MORTERO REFORZADO CON FIBRA SINTÉTICA						
Costo por m ² de muro de mampostería de piezas macizas rehabilitado, en una de sus caras con mortero de cemento tipo I, con resistencia a la compresión de 125 kg/cm ² , con 2.5 cm de espesor reforzado con fibra sintética (filamentos). Dosificación de fibras: 15 kg/m ³						
MATERIALES						
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe	%	
Mortero tipo I Dosificación 1:4 . $f_j' = 125 \text{ kg/cm}^2$	m ³	0.025	\$ 1,526.70	\$ 38.17	17%	
Fibra de vidrio (filamentos)	saco	0.63	\$198	\$ 123.75	54%	
SUBTOTAL: MATERIALES				\$ 161.92	71%	
MANO DE OBRA						
Concepto	Unidad	Cantidad	S.R.	Importe	%	
1 Oficial Albañil	jor	0.13	\$ 280.04	\$ 36.41	16%	
1 Peón	jor	0.13	\$ 209.37	\$ 27.22	12%	
SUBTOTAL: MANO DE OBRA				\$ 63.62	28%	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
Concepto	Unidad	Cantidad	C.H.	Importe	%	
Maquinaria y herramienta menor	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	1%	
Equipo de seguridad personal	%	3%	\$ 63.62	\$ 1.91	1%	
SUBTOTAL: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$ 3.82	2%	
COSTO DIRECTO				\$ 229.36		
COSTO INDIRECTO				16%	\$ 36.70	
				Subtotal	\$ 266.06	
UTLIDAD				10%	\$ 26.61	
				Subtotal	\$ 292.66	
CARGOS ADICIONALES				0.05%	\$ 0.15	
COSTO TOTAL / m²				\$ 292.81		

En la tabla 18 y la figura 65 se muestra un análisis de los costos de rehabilitación calculados previamente. Como puede observarse, la técnica que mostró un menor costo de aplicación es la de encamisado a través de bandas de polipropileno, mientras que la de mayor costo es el encamisado empleando bandas de acero, con un incremento en el costo de hasta nueve veces, respecto al costo más bajo. Sin duda, el costo tanto de los materiales, como de herramientas y mano de obra especializada pueden representar una limitante considerable al momento de seleccionar una técnica de rehabilitación, por lo que es necesario realizar un análisis multifactorial para seleccionar la técnica que sea más adecuada para los requisitos de cada proyecto de rehabilitación. Cabe mencionar que este ejercicio solo representa una ejemplificación de la obtención de costos para los

esquemas de rehabilitación tipo vistos en la literatura existente; no se representa un análisis comparativo en términos de su impacto en el desempeño.

Tabla 18. Costos por m² de rehabilitación de muros de mampostería (pesos mexicanos corrientes de 2022).

Técnica	Costo por m ²
Malla de alambre soldado	\$ 203.64
Placa de acero	\$ 902.69
Bandas de acero	\$ 1,417.97
Bandas de polipropileno	\$ 156.43
Fibra de vidrio	\$ 293.27
Fibra de carbono	\$ 1,073.68
Textil estructural : Fibra de vidrio	\$ 319.78
Textil estructural : Fibra de carbono	\$ 1,100.19
Mortero reforzado con fibra de vidrio	\$ 292.81
Mortero reforzado con fibra de acero	\$ 338.77

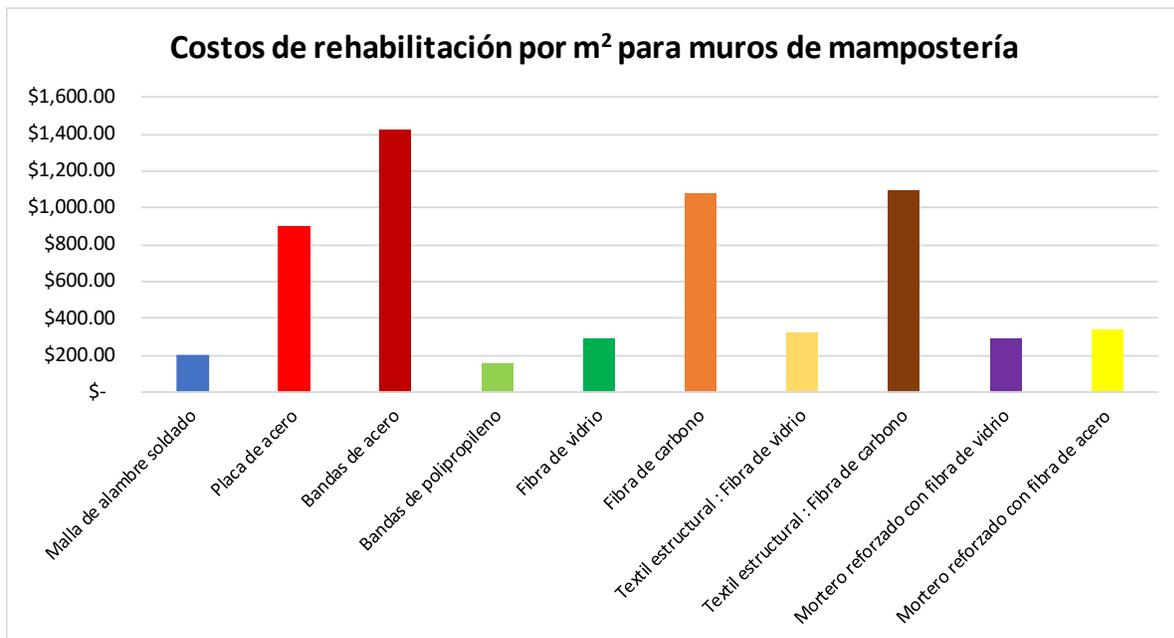


Figura 65. Costos de rehabilitación por m² en muros de mampostería (pesos mexicanos corrientes de 2022).

No obstante, para realizar un análisis comparativo de costos, se obtuvo, para cada técnica estudiada, la capacidad resistente en toneladas (t), de un muro de mampostería tipo. Para el cálculo de la resistencia asociada a cada técnica se emplearon las ecuaciones propuestas en la literatura (y que se describen en el Capítulo 5 de este documento). En la tabla 19 y en la figura 66 se muestran los costos por metro cuadrado divididos por la resistencia obtenida para el modelo tipo de cada técnica de rehabilitación.

Tabla 19. Costos por m²/t de rehabilitación de muros de mampostería (pesos mexicanos corrientes de 2022).

Técnica	Costo por m ² /t
Malla de alambre soldado	\$ 68.11
Placa de acero	\$ 27.56
Bandas de acero	\$ 48.90
Bandas de polipropileno	\$ 56.88
Fibra de vidrio	\$ 59.70
Fibra de carbono	\$ 35.90
Textil estructural : Fibra de vidrio	\$ 31.29
Textil estructural : Fibra de carbono	\$ 29.01
Mortero reforzado con fibra de vidrio	\$ 52.80
Mortero reforzado con fibra de acero	\$ 61.09

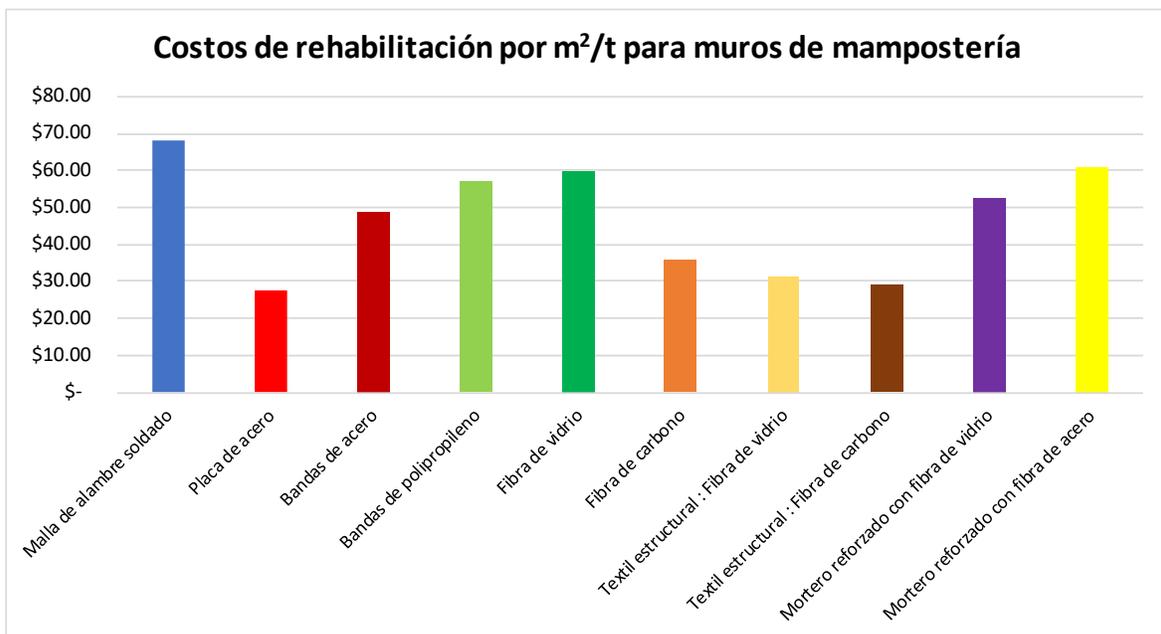


Figura 66. Comparación de costos de rehabilitación por m² en muros de mampostería (pesos mexicanos corrientes de 2022).

De la figura 66 se observa que, para el ejercicio de costos basado en los modelos tipo contenidos en la literatura, el costo por metro cuadrado resulta bajo para aquellas técnicas que mostraron una mayor capacidad resistente. Sin embargo, el ejercicio realizado puede resultar ambiguo considerando que algunas técnicas enfocan mayormente su aplicación a un aumento en la capacidad de deformación, en lugar de un incremento de la resistencia.

CAPÍTULO 4

BASE DE DATOS DE ENSAYES EXPERIMENTALES EN MUROS DE MAMPOSTERÍA

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta un análisis y descripción de cada una de las categorías y campos incluidos en una base de datos realizada con el fin de identificar el universo de ensayos experimentales realizados en muros de mampostería bajo algún esquema de rehabilitación.

Se incluye también el análisis de datos general de los especímenes y un análisis particular asociado a cada una de las técnicas estudiadas.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS

Teniendo como objetivo estudiar el desempeño de muros de mampostería rehabilitados mediante distintas técnicas se llevó a cabo la elaboración de una base de datos que reúne información de diversos ensayos en muros de mampostería tras ser rehabilitados mediante alguna técnica descrita en el Capítulo 3.

Entre los objetivos de la elaboración de esta base de datos se destaca conocer y estudiar las diversas variables que intervienen en la resistencia obtenida de muros que son rehabilitados respecto a especímenes de control, así como comparar los valores de resistencia obtenidos experimentalmente con los valores de resistencia obtenidos mediante el empleo de las ecuaciones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de 2017 y los valores calculados con los modelos propuestos por cada autor.

La base de datos consta de un total de 94 especímenes que fueron rehabilitados y posteriormente ensayados, considerando, en algunos casos, la presencia de daño previo a la rehabilitación. Especímenes provenientes de Canadá, China, Costa Rica, Japón, Macedonia del Norte, México, Perú y Turquía se encuentran incluidos en los análisis de resultados de la base de datos. En el Apéndice A se puede consultar la base de datos realizada.

4.3 CAMPOS ESPECÍFICOS DE LA BASE DE DATOS

Tomando en cuenta que la base de datos considera las técnicas de encamisado con malla de alambre soldado, el encamisado con bandas y placas, donde se incluyen las bandas y placas de acero, las bandas de polipropileno y los polímeros reforzados con fibras (PRF); el empleo de textiles estructurales, y el encamisado con morteros especiales con fibras, se incluyeron distintos campos de información en función de cada técnica.

Es importante mencionar que en la base de datos se incluyen valores obtenidos en unidades del Sistema Internacional (SI); los valores que no fueron obtenidos en estas

unidades fueron convertidos. A continuación, se mencionan los campos incluidos para el análisis de la base de datos.

4.3.1 Información general

Este campo fue el mismo para todas las técnicas analizadas. En esta sección se recabaron los datos generales de cada programa experimental y cada espécimen incluido. Los campos incluidos son:

- Autores.
- País.
- Año.
- Institución: Laboratorios, centros de investigación o universidades.
- Normatividad: Reglamentación que se aplicó para el análisis, diseño y construcción de cada espécimen. Permite conocer, en algunos casos, las ecuaciones empleadas para estimar la participación de las técnicas de rehabilitación a la resistencia, rigidez y disipación de energía.
- Especimen: Clave asignada por los autores al muro o modelo analizado.

4.3.2 Características estructurales generales

De igual forma, esta sección se empleó para todas las técnicas. Los campos de esta sección permiten conocer las propiedades estructurales de cada modelo en función de la estructuración de cada muro.

- Clasificación: Se consideró la estructuración empleada para el espécimen de estudio.
 - MC: Mampostería confinada.
 - MD: Muro diafragma.
 - MRI: Mampostería reforzada interiormente.
 - MS: Mampostería simple.
- Pieza: Tipo de pieza empleado en la construcción del espécimen.
 - BCH: Bloque de concreto hueco.
 - TAH: Tabique¹ de arcilla hueco.
 - TAMP: Tabique de arcilla multiperforado.
 - TAPH: Tabique de arcilla perforado horizontalmente.
 - TBR: Tabique de barro recocido.
 - TC: Tabicón de concreto.
- Dimensiones de la pieza de mampostería, en cm.
 - Altura.
 - Espesor.
 - Longitud.
- Juntas de mortero
 - Tipo: Mortero tipo I, II y III.
 - Proporcionamiento cemento-cal-arena.
 - Resistencia del mortero a la compresión (f'_j), en kg/cm² y MPa.

¹ En esta tesis se denomina “tabique” al ladrillo.

- Escala del muro o modelo.
- Modelo 3D: Se identifica si el espécimen es un muro, o un modelo estructural tridimensional (modelo tridimensional de casa habitación, por ejemplo).
- Crujías: Número de crujías que posee el espécimen.
- Niveles: Se indica el número de niveles (o paneles en elevación) que posee el espécimen.
- Altura, en cm.
- Longitud, en cm.
- Relación de aspecto: Comprende la relación entre la altura y la longitud del muro.
- Aberturas - Ventanas y Aberturas – Puertas.
 - Existencia: Se analiza si existen o no aberturas de ventana y/o puertas en los muros.
 - Cantidad: Número de aberturas de ventana y/o puertas en el muro de análisis.
 - Ancho y altura de la ventana, en cm.
 - Confinamiento: Si existe la presencia de confinamiento de la abertura.
- Modo de falla esperado (en caso de que la literatura lo indique)
 - FX: Flexión.
 - CT: Cortante (en forma de escalera siguiendo la junta de mortero, generada cuando la resistencia de la mampostería es alta con relación a la resistencia del mortero de pega).
 - DB: Deslizamiento en la base.
 - TD: Tensión diagonal (dada, por lo general, cuando la resistencia a tensión de la mampostería es baja con relación a la resistencia del mortero de pega).
 - APE: Aplastamiento en las esquinas.

4.3.3 Sistema estructural

En esta sección se recolectó la información referente a las características de los elementos que integran el sistema estructural: castillos, columnas, dalas, vigas y/o losas.

a) Castillos/Columnas: Se especificó si el muro se encuentra confinado por castillos, columnas o ambos elementos.

- b: Dimensión de la base de la sección transversal del elemento, en cm.
- h: Dimensión de la altura de la sección transversal del elemento, en cm.
- Refuerzo longitudinal: Se analizan las características propias del acero longitudinal.
 - Grado del acero.
 - f_y : Esfuerzo especificado de fluencia de las barras de acero longitudinal, en kg/cm² y MPa.
 - # Barras.
 - Φ : Diámetro de las barras.
- Refuerzo transversal: Se analizan las características propias del acero transversal.
 - Grado del acero.
 - f_y : Esfuerzo especificado de fluencia de las barras de acero longitudinal, en kg/cm² y MPa.
 - # Barras.
 - Φ : Diámetro de las barras.

- S_{centro} : Separación del refuerzo transversal al centro de la sección, en cm.
- S_{extremos} : Separación del refuerzo transversal en los extremos de la sección, en cm.
- f'_c =Resistencia especificada a la compresión del concreto empleado para estos elementos, en kg/cm².

b) Castillos de confinamiento en aberturas: Se especificó si el muro, en caso de contar con aberturas (puertas o ventanas), posee confinamiento en estas áreas. Para esta sección se incluyeron los mismos campos abordados en el punto anterior.

c) Dalas/Vigas: Se busca conocer las principales características de las dalas o vigas, en caso de que estas se encuentren presentes en el muro. De igual forma se incluyen en esta sección los mismos campos de las secciones anteriores.

d) Refuerzo interior: Sección aplicable en caso de que se tratara de un sistema de mampostería reforzada interiormente. Se incluyeron los siguientes campos:

- Refuerzo vertical.
 - # Barras.
 - Φ : Diámetro de las barras.
 - S: Distancia entre elementos de refuerzo vertical.
- Refuerzo horizontal.
 - # Barras.
 - Φ : Diámetro de las barras.
 - S: Distancia entre elementos de refuerzo horizontal.
- f'_c =Resistencia especificada a la compresión del concreto empleado para el relleno de las celdas de mampostería, en kg/cm².

4.3.4 Daño previo

El objetivo de esta sección fue conocer si el espécimen fue ensayado previamente, y registrar el estado del daño antes de llevar a cabo la rehabilitación, en caso de que apliquen.

- Daño previo en mampostería.
 - TMG: Tamaño máximo de grieta, en mm.
- Daño previo en castillos/columnas.
 - TMG, en mm.
- Daño previo en dalas/vigas.
 - TMG, en mm.
- Clasificación del daño previo a la prueba (con base en la clasificación de las NTC-Mampostería 2017).
 - NA: El espécimen no se ensayó previamente.
 - Ligero.
 - Moderado.
 - Severo.
 - Muy grave.

4.3.5 Reparación de grietas

Se busca conocer si en caso de haber presentado daño previo, se llevó a cabo un procedimiento de limpieza y reparación del muro previo a la rehabilitación. Los campos incluidos en esta sección son los siguientes:

- Preparación / Limpieza de muro: En caso de que previo a la rehabilitación se hayan retirado acabados, pintura, y se haya escarificado la superficie.
- Inyección
 - Mortero de cemento: En caso de que las grietas de hayan reparado mediante la inyección de mortero, y en qué proporción cemento-cal-arena.
 - Resina epoxi: Si se inyectó resina para reparar las grietas.
- Rajueleo.

4.3.6 Reparación / adición de elementos de confinamiento

En esta sección se identificó si existió reparación de elementos de confinamiento (columnas, castillos, dalas, vigas). También se verificó si al espécimen, en caso de ser de mampostería simple, se añadieron elementos de confinamiento como parte de la rehabilitación. Algunos de los campos tienen una definición de Sí o No.

- Adición de castillos/columnas.
- Adición de dalas/vigas.
- Reparación de castillos/columnas.
 - f_c' = Resistencia a la compresión del concreto empleado para reparar los castillos/columnas, en kg/cm².
 - Tipo= Clasificación del concreto empleado para la reparación.
- Reparación de dalas/vigas.
 - f_c' .
 - Tipo.

4.3.7 Rehabilitación

Los puntos anteriormente mencionados fueron considerados como aplicables para todas las técnicas de rehabilitación planteadas. Para estudiar de forma específica las características de cada técnica empleada se realizaron apartados distintos en la base de datos. A continuación, se enuncian los apartados realizados y los campos pertenecientes a cada uno.

4.3.7.1 Encamisado con malla de alambre soldado

- Características de la malla
 - No. caras encamisadas: Una o ambas caras, según sea el caso.
 - Calibre de la malla.
 - Φ Alambre: Diámetro del alambre que conforma la malla de alambre soldado, en mm.
 - A_{sh} : Área del refuerzo horizontal, en mm².

- S_h : Separación del acero de refuerzo horizontal de los alambres horizontales, en mm.
- Cuantía horizontal, en %.
- η : Factor de eficiencia del refuerzo horizontal, en caso de haberse considerado.
- Grado del acero de la malla empleada.
- f_y : Esfuerzo especificado de fluencia de la malla de alambre soldado, en kg/cm^2 .
- Anclaje
 - Tipo: Elemento de anclaje empleado para unir la malla a la mampostería (clavo común, fijadores tipo Hilti, pasadores, alcayatas, alambre, entre otros).
 - Distribución: Piezas empleadas por metro cuadrado.
 - Separadores: Se indica si se colocaron separadores (cartón, corcholatas o algún otro) entre la malla de alambre y la mampostería.
 - Método de colocación: Manual o mediante pistola de impacto controlado.
 - Longitud de anclaje, en mm y pulgadas.
 - Φ : Diámetro del anclaje empleado, en mm.
 - Separación: Separación entre anclaje en cada cara, en cm.
 - Distribución: Forma en que se distribuyó el anclaje sobre la mampostería, por ejemplo, en tresbolillo, en extremos, al centro del muro.
- Continuidad de la malla:
 - Extensión a castillos: En caso de que la malla se haya extendido hasta los castillos y haya dado vuelta (rodeado) a éstos.
 - No. Castillos con extensión de malla: Con la finalidad de saber si la malla se extendió a uno o ambos castillos.
 - Extensión de malla a dalas: Considera que la malla haya sido extendida y anclada a las dalas.
- Traslape de malla
 - Traslape de malla en castillos/columnas.
 - No. Castillos con traslape de malla.
 - Traslape de dalas/vigas.
 - Traslape en aberturas.
 - Longitud de traslape, en cm.
 - Calibre de mallas traslapadas: Tanto en la malla original (base) como en la malla de traslape.
- Recubrimiento de la malla.
 - Material: Mortero o concreto.
 - Método de aplicación: Manual o lanzado.
 - f_c' / f_j' : Resistencia especificada a la compresión del concreto o mortero empleado para el aplanado.
 - Proporción cemento-cal-arena, si aplica.
 - Espesor del encamisado en cada cara, en cm.

4.3.7.2 *Bandas y placas de acero*

- Características de las bandas

- Caras encamisadas: Una o ambas caras.
- Bandas diagonales: Se indicó si el espécimen contaba con bandas dispuestas en diagonal (o con algún grado de inclinación), se registró el ancho y espesor de las bandas, en mm y el valor del esfuerzo especificado de fluencia del acero empleado (f_y), en kg/cm² y MPa.
- Bandas verticales: Se indicó si el espécimen contaba con bandas dispuestas en forma vertical). De igual forma se registra el ancho y espesor de las bandas, en mm y el valor del esfuerzo especificado de fluencia del acero empleado (f_y), en kg/cm² y MPa.
- Anclaje: Se especificó el tipo de anclaje empleado para unir las bandas a la mampostería. Se registra el diámetro y la longitud del anclaje en mm y pulgadas.
- Uniones: Se hace referencia a la forma en que se unieron las bandas entre sí.
 - Soldadura.
 - Pernos.
 - Ángulos.
- Continuidad de bandas. En esta categoría se registró si las bandas de acero cubrieron únicamente la zona de mampostería, o si también se extendieron hacia los elementos de confinamiento (columnas o castillos, dadas o vigas).
- Características de las placas
 - Placas: Aplicable en caso de haber empleado placas, en lugar de bandas. Se registró el número de caras encamisadas, el tipo de placa empleado (multiperforadas, lisas, otros), el espesor de las placas y el esfuerzo especificado de fluencia f_y del acero de las placas.
 - Anclaje: Se registró el tipo de anclaje empleado, el diámetro y la longitud de éste en mm y pulgadas.
 - Extensión de placa: Se registró si la placa únicamente cubrió a la mampostería o si se extendió hasta elementos de confinamiento.
- Recubrimiento adicional. En caso de que además de las placas o bandas, se haya agregado al encamisado un aplanado con la finalidad de aportar al comportamiento estructural de los especímenes.
 - Material.
 - Método de aplicación.
 - f_c' / f_j' : Resistencia especificada a la compresión del material empleado, en kg/cm² y MPa.
 - Espesor del aplanado, en cada cara (en cm).

4.3.7.3 *Bandas de polipropileno*

- Características de las bandas.
 - No. de caras encamisadas.
 - Bandas diagonales: Se identificó si las bandas fueron dispuestas en posición diagonal. Se registró el ancho y espesor de las bandas, en mm.
 - Bandas verticales: Si las bandas fueron dispuestas en posición vertical. Se registró el ancho y espesor de las bandas, en mm.
 - Bandas horizontales: Si las bandas fueron dispuestas en posición horizontal. De igual forma se registró el ancho y espesor de las bandas, en mm.

- Malla: Campo aplicable en caso de que con las bandas de polipropileno se haya generado un mallado que posteriormente haya sido adosado a la mampostería. En este campo se incluye también el campo S_h , que hace referencia a la distancia en mm de la separación entre bandas para la conformación de las cuadrículas de la malla.
- Anclaje: Se analizó el tipo de anclaje empleado, el diámetro y la longitud de éste en mm y pulgadas.
- Conexión entre bandas: Se hace referencia a la forma y tipo en que se conectaron las bandas entre sí, en caso de que se haya generado una malla. Por ejemplo, mediante soldadura plástica o de algún otro tipo.
- Continuidad de bandas: Al igual que para las técnicas anteriores, este campo permite conocer si las bandas se extendieron o no hasta los elementos de confinamiento del muro, en caso de que estos existan.
- Recubrimiento adicional
 - Material.
 - Método de aplicación.
 - f_c' / f_j' : Resistencia especificada a la compresión del material empleado, en kg/cm^2 y MPa.
 - Espesor del aplanado, en cada cara (en cm).

4.3.7.4 Fibra reforzada de polímero

- Características de las bandas
 - Material.
 - Fibra de carbono.
 - Fibra de vidrio.
 - Fibra de aramida.
 - E_{FRP} : Módulo de elasticidad de la fibra empleada, en kg/cm^2 y MPa.
 - No. caras encamisadas.
 - Bandas diagonales: Si aplica, se registró el ancho y espesor de las bandas, en mm.
 - Bandas verticales: Si aplica, se registró el ancho y espesor de las bandas, en mm.
 - Bandas horizontales: De igual forma, en caso de que este campo aplique, se registró el ancho y espesor de las bandas, en mm.
 - Anclaje: Se capturó el tipo de anclaje empleado, el diámetro y la longitud de éste en mm y pulgadas.
 - Continuidad de bandas: Aplica lo indicado para las técnicas anteriormente mencionadas.
 - Resina: Este campo indica si se colocó algún tipo de resina para asegurar la adherencia de las fibras a la mampostería. También se incluye el valor del módulo de elasticidad de la resina utilizada (si aplica) en kg/cm^2 y MPa.
- Recubrimiento adicional: Esta categoría incluye los mismos campos mencionados en las técnicas anteriores.

4.3.7.5 Textiles estructurales

- Características del mortero/concreto de base.
 - No. caras encamisadas.
 - Base empleada: Mortero o concreto.
 - Tipo.
 - f_c' / f_j' , en kg/cm² y MPa.
 - Espesor de capa primer, en cm.
 - Espesor de capa de recubrimiento, en cm.
- Características de la malla textil.
 - Tipo de fibra empleada.
- Anclaje.
 - Tipo.
 - Cantidad.
 - Separación, en cm.

4.3.7.6 Morteros reforzados con fibras

- Características del mortero/concreto.
 - No. caras encamisadas.
 - Material empleado: Mortero o concreto.
 - Método de aplicación: Manual o lanzado.
 - f_c' / f_j' , en kg/cm² y MPa.
 - Tipo/clase.
 - Proporción cemento-arena (si aplica).
- Características de la fibra.
 - Fibra utilizada.
 - Dosificación de la fibra, en kg/m³.
- Características del encamisado
 - Espesor de cada cara, en cm.

4.3.8 Propiedades mecánicas de la mampostería

Esta categoría hace referencia a los valores tanto teóricos, como experimentales de la mampostería que se emplearon como base para el cálculo de la respuesta estructural de cada espécimen. Los campos incluidos en esta categoría fueron los siguientes:

- $f_{máx}$: Resistencia máxima a la compresión de la mampostería medida experimentalmente, en kg/cm² y MPa.
- f_m' : Resistencia de diseño a la compresión de la mampostería, valores teóricos y experimentales, en kg/cm² y MPa.
- E_m : Módulo de elasticidad de la mampostería, valores teóricos y experimentales, en kg/cm² y MPa.
- v_m' : Resistencia a compresión diagonal de la mampostería, valores teóricos y experimentales, en kg/cm² y MPa.
- G_m : Módulo de cortante de la mampostería, en kg/cm² y MPa.

4.3.9 Desarrollo experimental

Se hace referencia a las características del ensayo destructivo aplicado a cada espécimen. Los campos en esta categoría son:

- Carga lateral aplicada.
 - Tipo-Aplicación: Es decir, la forma en que se aplicó la carga, por ejemplo, de forma cíclica alternada, cíclica reversible, por desplazamiento, por mencionar algunos casos.
 - Magnitud de la carga aplicada, en t y kN.
- Carga vertical aplicada.
 - Tipo-Aplicación.
 - Magnitud de la carga aplicada, en t y kN.
 - σ : Magnitud equivalente del esfuerzo normal aplicado, en kg/cm^2 y MPa.

4.3.10 Resultados teóricos

Se abordan los valores considerados para el cálculo de la resistencia teórica de cada espécimen, así como los valores obtenidos de esta.

- P: Carga axial actuante en el muro, en t.
- Resistencia al cortante lateral.
 - F_R : Factor de resistencia considerado.
 - V_{mR} : Fuerza cortante de diseño resistida por la mampostería, en t y kN.
 - V_{sR} : Fuerza cortante de diseño que toma el acero de refuerzo horizontal o la malla de alambre soldado, en t y kN.
 - V_c : Fuerza cortante de diseño resistida por el aplanado, en caso de que se haya considerado, en t y kN.
 - V_R : Resistencia a cortante lateral del muro, en t y kN.
- Resistencia a cortante por flexión.
 - F_R : Factor de resistencia considerado.
 - M_0 = Momento flexionante que resiste el muro en flexión pura, en t-m y kN-m.
- Resistencia a flexocompresión.
 - P_u : Carga axial de diseño, en t.
 - M_R : Momento flexionante resistente de diseño, en t-m y kN-m.
- Resistencia a cargas verticales.
 - P_R : Resistencia de diseño del muro a carga vertical, en t y kN.

4.3.11 Resultados experimentales

- $V_{u,\text{teórico}}$: Resistencia a cortante calculada para cada espécimen, en t y kN.
- Resistencia - Ciclos positivos
 - V_{agr} : Cortante medido al inicio del agrietamiento, en t y kN. Se toman también datos relativos a la distorsión y el desplazamiento medido al inicio del agrietamiento, así como el tamaño máximo de la grieta registrada (TMG).

- V_{\max} : Cortante máximo medido, donde se alcanzó la resistencia de cada espécimen, en t y kN. También se registran los datos relativos a la distorsión y desplazamiento medido al alcanzar la resistencia.
- Resistencia - Ciclos negativos: En caso de que aplique, se toman los mismos datos que en los ciclos positivos.
- Rigidez.
 - Inicial teórica: Rigidez final calculada (reportada) en los especímenes que hayan sido ensayados antes de ser rehabilitados (especímenes de control). Medida en t/cm y kN/cm.
 - Inicial experimental: Rigidez final medida (reportada) en los especímenes que hayan sido ensayados antes de ser rehabilitados (especímenes de control). Medida en t/cm y kN/cm.
 - Final teórica calculada (reportada), en t/cm y kN/cm.
 - Final experimental medida (reportada), en t/cm y kN/cm.
 - R_R/R_0 : Relación entre
- Resistencia.
 - Inicial teórica: Resistencia final calculada en los especímenes que hayan sido ensayados antes de ser rehabilitados (especímenes de control). Medida en t/y kN.
 - Inicial experimental: Resistencia final medida en los especímenes que hayan sido ensayados antes de ser rehabilitados (especímenes de control). Medida en t y kN.
 - Distorsión inicial: Distorsión medida (reportada) al final del ensaye del espécimen sin rehabilitación (en caso de que aplique), en %.
 - Final teórica (reportada), en t y kN.
 - Final experimental (reportada o medida de las gráficas), en t y kN.
 - Distorsión final medida (reportada) en el espécimen, en %.
- Clasificación del daño, de acuerdo con la NTC-Mampostería 2017.
 - Insignificante.
 - Ligero.
 - Moderado.
 - Severo
 - Muy grave
- Observaciones: Se incluyeron comentarios referentes a lo información gráfica de cada artículo (distribución de grietas, daño en elementos de confinamiento, particularidades de algún espécimen, entre otras).
- Mecanismo de falla observado.
 - APM: Aplastamiento de la mampostería.
 - CT: Cortante.
 - CTVC: Cortante en vigas y columnas.
 - DB: Deslizamiento en la base del muro.
 - DESA: Desprendimiento del anclaje.
 - FCC: Flexocompresión en castillos.
 - FX: Flexión.
 - SC: Separación de castillos (agrietamiento vertical).
 - TD: Tensión diagonal.
- Calidad de la información: Este último campo se añadió con la finalidad de evaluar la calidad (cantidad y detallado) de la información relativa a cada ensaye

experimental. La calidad de la información se clasificó en: mala, regular, buena y muy buena.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA BASE DE DATOS

Una vez que se registró la información de cada una de las categorías y campos incluidos en la base de datos se analizó la información con la finalidad de identificar las variables que pudieran influir en el comportamiento estructural de cada espécimen rehabilitado.

De los 94 especímenes analizados, la técnica con mayor presencia de estudio fue la de encamisado con malla de alambre soldado y mortero o concreto, ya que 40% del total de los especímenes correspondieron a esta técnica. Posteriormente, la técnica de encamisado mediante bandas y placas de acero abarcó 28% del total de los especímenes, seguida por las técnicas de encamisado con fibras reforzadas de polímero, encamisado con bandas de polipropileno y encamisado con morteros reforzados con fibras, con un 18%, 7% y 5%, respectivamente. Por su parte, la técnica de encamisado mediante fibras textiles contó únicamente con un espécimen para su estudio, por lo que el análisis de datos certeros para la predicción del comportamiento de esta técnica está limitado. En la figura 67 puede observarse la clasificación de las técnicas analizadas en la base de datos y su respectivo porcentaje de especímenes respecto al total.

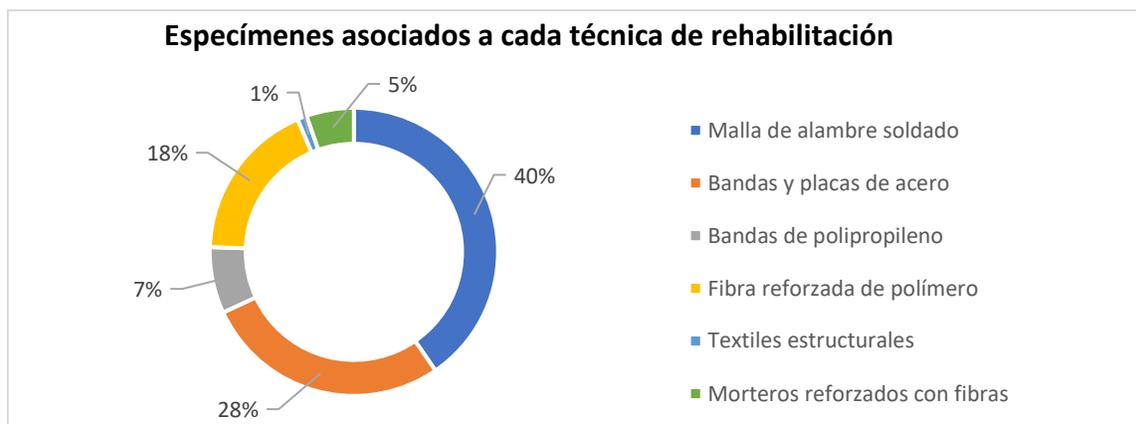


Figura 67. Clasificación de los especímenes de la base de datos

4.4.1 Análisis de las características estructurales generales de los especímenes

Variabes como el tipo de sistema estructural y el tipo de pieza empleado fueron de interés para este análisis. Por una parte, se estudió su influencia en el comportamiento de los especímenes. Por otra parte, su análisis permitió identificar variables que requieren ser mayormente exploradas.

En las figuras 68 y 69, y en las tablas 20 y 21, se presentan las distribuciones de los especímenes según su configuración estructural y el tipo de pieza.

Los sistemas correspondientes a mampostería confinada y muros diafragma fueron los que se encontraron con mayor frecuencia en los programas experimentales, posiblemente debido a que estos son los sistemas estructurales más empleados en la actualidad en los países donde fueron desarrollados cada uno de los ensayos. En la tabla 20 se identifican los sistemas estructurales estudiados en cada técnica. Como puede observarse, la técnica de encamisado con malla de alambre soldado y mortero o concreto ha sido probada en cada uno de los sistemas estructurales propuestos en este documento. Esto permite suponer que existe más información y el estudio de más variables respecto al efecto de esta técnica en cada sistema estructural, a comparación de otras técnicas en las que la experimentación ha sido limitada a un solo sistema estructural, como es el caso de la técnica de encamisado con bandas de polipropileno, o las técnicas de encamisado con mallas textiles o morteros reforzados con fibras.

Cabe mencionar que existen más investigaciones que no solamente se limitan a un sistema estructural. Estos especímenes se descartaron ya que fueron ensayados a escalas pequeñas, en las que se consideró que el comportamiento no estaría apegado a la realidad.

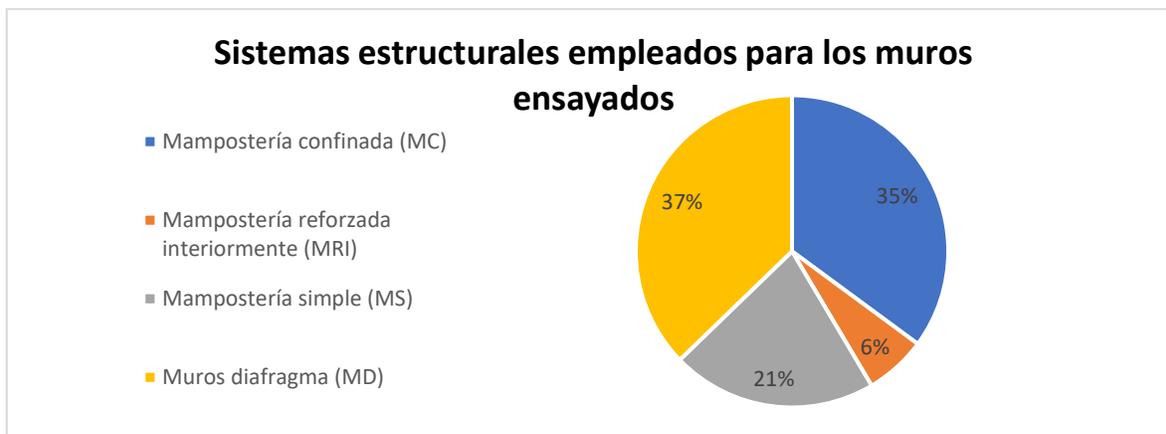


Figura 68. Sistemas estructurales de mampostería identificados en la base de datos

Tabla 20. Sistemas estructurales asociados a cada técnica de rehabilitación

Técnica de rehabilitación	MC	MRI	MS	MD	TOTAL
Malla de alambre soldado	27	4	4	3	38
Bandas y placas de acero	0	1	1	24	26
Bandas de polipropileno	0	0	7	0	7
Fibra reforzada de polímero	0	1	8	8	17
Textiles estructurales	1	0	0	0	1
Morteros reforzados con fibras	5	0	0	0	5

Observando la figura 69, donde se muestran los tipos de pieza identificados en la construcción de los distintos especímenes, resalta que las piezas macizas de barro recocido han sido las que se emplearon con mayor frecuencia en la construcción de los especímenes, abarcando cerca de 50% de los especímenes. Otras piezas como las de

tabique de arcilla perforado horizontalmente fueron de interés, de acuerdo con varios autores, debido a que son piezas que han sido prohibidas en su empleo para elementos estructurales, pero que en la actualidad siguen siendo las piezas más empleadas en localidades de alto peligro sísmico combinado con la alta influencia de la autoconstrucción, debido a su bajo costo. Por lo anterior se ha propuesto su estudio con la finalidad de proponer técnicas de rehabilitación adecuadas y asequibles para las comunidades que emplean estas piezas. Este es el caso de Perú y los estudios de A. San Bartolomé.

En la tabla 21, se identifica la cantidad de especímenes asociados a cada tipo de pieza. Al igual que para el tipo de sistema estructural, algunas técnicas de rehabilitación solamente han sido aplicadas en tipos de pieza específicos, lo cual limita el entendimiento del comportamiento de cada técnica y su aplicabilidad en función del tipo de pieza empleado. Sin embargo, se considera que este factor se ve influenciado principalmente por la zona geográfica donde se aplique la técnica de rehabilitación, ya que el tipo de pieza empleado para estructuras, de uso habitacional principalmente, se rige en gran medida por el precio y la eficiencia de construcción.

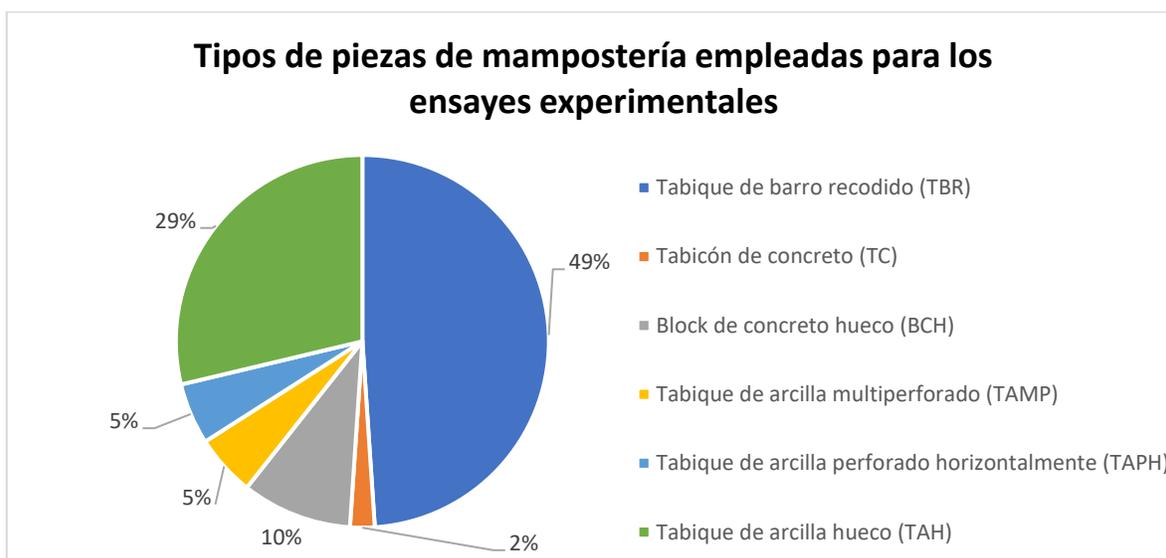


Figura 69. Clasificación del tipo de piezas empleadas para la construcción de los especímenes de la base de datos.

Tabla 21. Frecuencia de empleo de piezas de mampostería asociados a cada técnica de rehabilitación.

Técnica de rehabilitación	TBR	TC	BCH	TAMP	TAPH	TAH	TOTAL
Malla de alambre soldado	20	2	7	3	5	1	38
Bandas y placas de acero	0	0	2	0	0	24	26
Bandas de polipropileno	7	0	0	0	0	0	7
Fibra reforzada de polímero	14	0	0	2	0	1	17
Textiles estructurales	1	0	0	0	0	0	1
Morteros reforzados con fibras	4	0	0	0	0	1	5

Otra variable de interés para el análisis de datos fue la relación de aspecto de cada muro. La relación de aspecto comprende el cociente entre la altura y la longitud de un muro. De acuerdo con Pérez, et al., (2013), la variación en la relación de aspecto de un muro influye directamente en su resistencia. Esto debido, en parte a cambios en la deformación causados por flexión del muro ante distintas relaciones de aspecto.

Los muros con relación de aspecto menores que 1, ($H/L < 1$, muros robustos) tienen una menor contribución a la flexión, predominando las deformaciones por cortante. De acuerdo con la literatura (Pérez et al., 2013), ante relaciones de aspecto menores a 1, predominan una combinación de falla dada por tensión diagonal y deslizamiento, que son modos de falla frágil.

En la figura 70, se puede observar que 61% de los especímenes estudiados (65 especímenes) cuentan con una relación de aspecto menor a 1, por lo que podría suponerse un modo de falla mayormente gobernado por una combinación entre tensión diagonal y deslizamiento. Más adelante se comparan los modos de falla esperados y los obtenidos en cada espécimen, así como la relación de esta variable con la resistencia de cada muro.

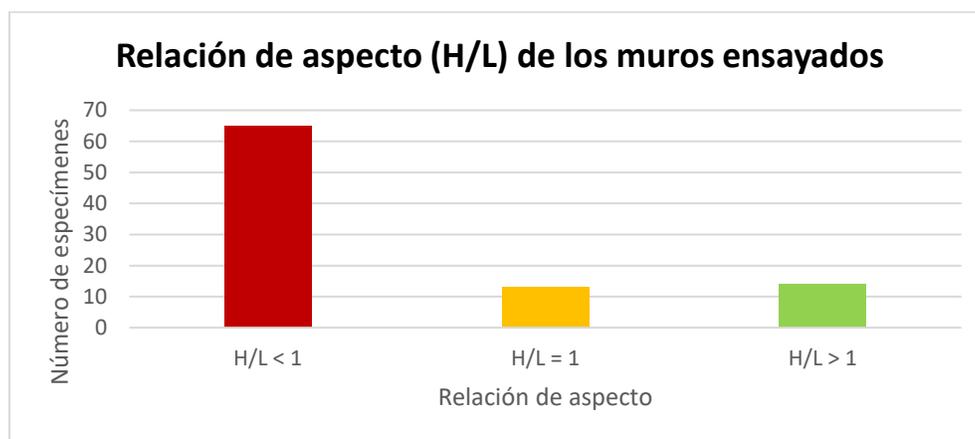


Figura 70. Variación de la relación de aspecto en los especímenes de la base de datos

4.4.2 Análisis de las técnicas de rehabilitación

Dado que se estudiaron distintas técnicas de rehabilitación, se presenta un análisis de datos específico para cada técnica. Mediante este análisis de datos se pretende identificar las variables que han sido mayormente exploradas en la literatura, y aquéllas que pueden representar un área de interés para investigaciones futuras.

4.4.2.1 Encamisado con malla de alambre soldado

Un total de 38 especímenes fueron estudiados bajo esta técnica. Variables como el número de caras encamisadas, el calibre de la malla empleada, el tipo de anclaje, la presencia de separadores, el material del recubrimiento y el espesor de éste fueron analizadas.

Como puede observarse en la tabla 22, más de 60% de los especímenes ensayados fueron rehabilitados por ambas caras. Respecto al calibre de la malla, los dos más

empleados fueron el calibre 6x6 / 10-10 y 6x6 / 8-8 con 32% y 29%, respectivamente. Es posible observar que se emplearon calibres mayores que los comúnmente vistos en obra, por ejemplo, el calibre 6x6 / ¼ - ¼ y 6x6 / 4-4 con una frecuencia de 3% y 13%, respectivamente.

El anclaje más empleado fueron los clavos, seguidos por alambre, los cuales, a su vez, representan los anclajes más utilizados en los proyectos de rehabilitación en la actualidad en México. En la base de datos se tiene el registro de tres especímenes en los cuales existió falla por desprendimiento del anclaje; estos especímenes emplearon alcayatas y barras de acero para fijar la malla a la mampostería. En la literatura no se presenta información relativa al uso de resina epoxi para la fijación del anclaje. Aunado al anclaje, fue de interés conocer la presencia de separadores entre la malla y la mampostería. Las recomendaciones actuales (INIFED, 2021a) indican que resulta una mejor opción evitar la presencia de separadores, ya que estos pudiesen llegar a interferir en el comportamiento monolítico de la malla con la mampostería dado que tienden a favorecer la deformabilidad de la conexión y el desprendimiento de los conectores.

Por otra parte, el material más empleado para el recubrimiento fue el mortero con 82%, seguido por el concreto con 18%. El espesor de la camisa fue variable, donde incluso algunos especímenes contaron con una capa de 9 cm de espesor. Los especímenes cuyo recubrimiento fue a base de mortero tuvieron, en su mayoría un espesor de 2.5 cm (67%), también se emplearon espesores de 3 cm (26%), 5 cm (5%) y 2 cm (2%). Por su parte, los especímenes con un recubrimiento a base de concreto presentaron espesores de recubrimiento de 3 cm (57%) y 9 cm (43%). En la tabla 22 se registran los valores generales de espesor, sin considerar el material del recubrimiento. Respecto a la resistencia medida (registrada) en los especímenes con recubrimiento a base de mortero, en ningún caso se registró una resistencia medida menor que 75 kg/cm² (clase III, de acuerdo con las NTC-Mampostería 2004). Con relación a los especímenes con recubrimiento a base de concreto, ningún espécimen tuvo una resistencia medida a la compresión menor a 200 kg/cm² ni mayor que 330 kg/cm².

Tabla 22. Variables de análisis para la técnica de encamisado con malla de alambre soldado

No. Caras encamisadas		Malla (calibre)		Anclaje		Separadores		Camisa		Espesor de camisa	
1	37%	6x6 / 1/4-1/4	3%	Alcayatas	5%	Sí	34%	Mortero	82%	t < 2.5 cm	3%
2	63%	6x6 / 4-4	13%	Fijadores Hilti	5%	No	66%	f _i ≥ 125 kg/cm ²	68%	t = 2.5 cm	58%
		6x6 / 6-6	18%	Pasadores "U"	5%			f _i ≥ 75 kg/cm ²	19%	t < 5.0 cm	26%
		6x6 / 8-8	29%	Barras de acero	11%			Sin datos	13%	t ≥ 5.0 cm	13%
		6x6 / 10-10	32%	Alambre	29%			Concreto	18%		
		Sin datos	5%	Clavos	45%			f _c ≥ 250 kg/cm ²	86%		
								f _c < 250 kg/cm ²	14%		

Se consideró que una de las variables principales de análisis de esta técnica fue el efecto del calibre de la malla en la resistencia de cada muro. En la actualidad, la normatividad vigente en México (NTC 2017) propone, dentro de sus consideraciones de diseño, incluir el aporte de la resistencia de la malla sumado a la contribución de la resistencia de la mampostería para determinar la resistencia final de un muro rehabilitado bajo esta técnica.

De forma conservadora, la normatividad no considera la participación del mortero o concreto en la resistencia y rigidez de los muros debido a la incertidumbre en la calidad de la elaboración y colocación del recubrimiento. Algunos autores han optado por considerar el aporte a la resistencia mediante una sección transformada de mortero o concreto a mampostería. Este es un tema que merece un estudio más detallado; en particular, en el caso de encamisados de concreto de varios centímetros de espesor que pueden tener una resistencia, en lo individual, comparable o superior a la mampostería.

En la figura 71 se identifican los especímenes que fueron ensayados previamente, y posteriormente rehabilitados mediante encamisados con malla de alambre soldado, se presenta el cociente de la resistencia lateral del modelo rehabilitado y la resistencia del modelo original. Los especímenes identificados con barras de color rojo fueron rehabilitados con malla calibre 6x6 / 10-10, en azul con calibre 6x6 / 6-6, en verde con calibre 6x6 / 4-4 y los especímenes en color naranja aquellos con calibre 6x6 / 8-8. Se identifica en cada barra, el tipo de pieza empleada en la construcción de cada espécimen.

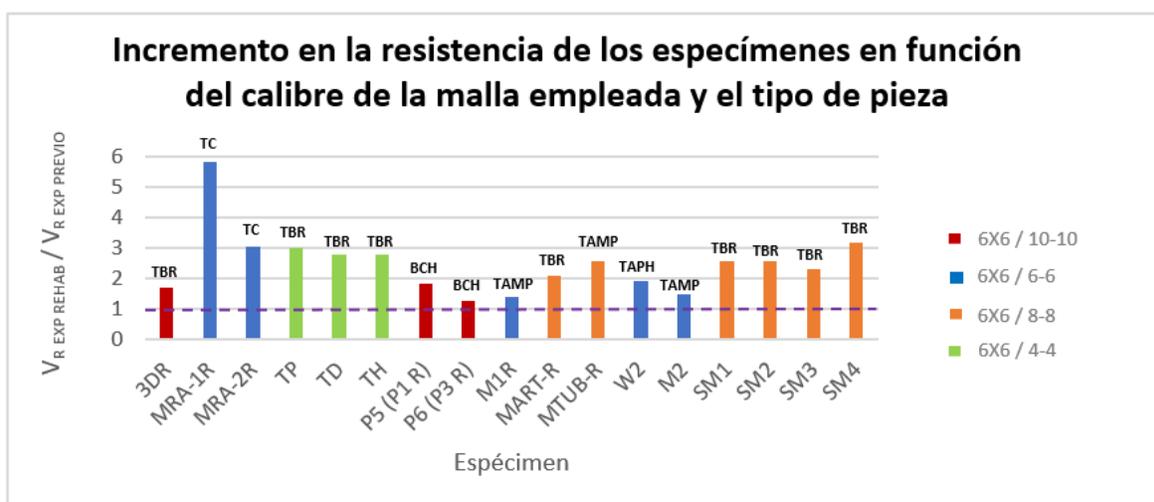


Figura 71. Incremento en la resistencia en función del calibre de la malla empleada y el tipo de pieza

De la figura 71 se observa que para todos los especímenes la resistencia se incrementó. En general, la respuesta en función del calibre de la malla se mantuvo parecida en la mayoría de los especímenes rehabilitados. Se descartan del análisis los especímenes MRA-1R y MRA-2R, considerando que en su construcción se emplearon piezas de mala calidad. En promedio para los especímenes con calibre 6x6 / 10-10 la resistencia aumentó en 1.6 veces, para los especímenes con calibre 6x6 / 6-6 se observó un aumento promedio de 1.6 veces; para calibre 6x6 / 4-4 un incremento de 2.9 veces y para especímenes con malla calibre 6x6 / 8-8 un incremento de 2.6 veces la resistencia original. Además, se distingue de las gráficas un mayor incremento de la resistencia para los especímenes construidos con piezas macizas, tanto de concreto como de arcilla (TBR, TC), respecto a los especímenes construidos con piezas huecas, independientemente del material (BCH, TAMP, TAPH).

Con la finalidad de considerar como otra variable de interés el tipo de conectores empleados para unir la malla de alambre soldado a la mampostería, se incluye, en la figura

72, el tipo de conectores utilizados. De esta figura se destaca una posible relación entre los especímenes que emplearon clavos para la fijación de la malla, ya que coinciden en ser los modelos con un menor incremento en la resistencia.

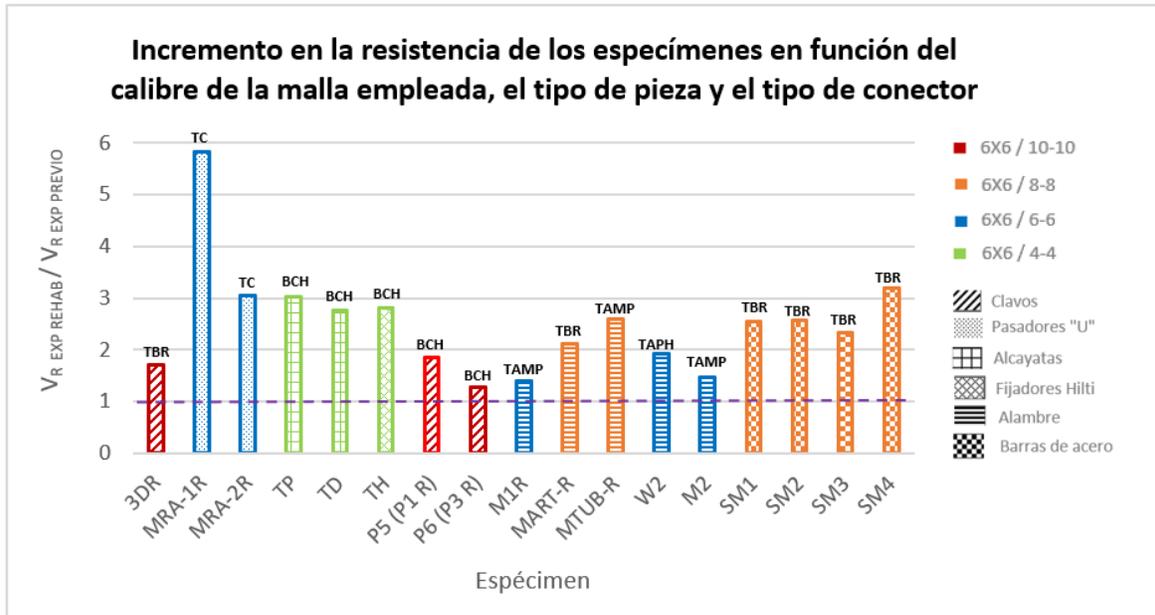


Figura 72. Incremento en la resistencia en función del calibre de la malla empleada, el tipo de pieza y el tipo de conector utilizado.

4.4.2.2 Encamisado con bandas y placas de acero

Para la técnica de encamisado con bandas y placas de acero, 26 especímenes fueron revisados. Como tal, estas técnicas resultan ser poco convencionales, a pesar de ello, de acuerdo con la revisión de la literatura han mostrado un comportamiento estructural satisfactorio. Para esta técnica todos los especímenes fueron ensayados previamente, y posteriormente fueron rehabilitados por ambas caras. En 92% de los especímenes (24), se emplearon placas de acero multiperforadas de distinto espesor. El espesor de las placas y bandas empleadas varió entre 0.3 y 3.81 mm; predominó, en 62%, el uso de bandas y placas con un espesor menor que 1 mm. En 46% de los especímenes se añadió una capa de mortero. De acuerdo con los autores, no se consideró el efecto del mortero en el aumento a la resistencia, únicamente se consideró como acabado de los especímenes.

Adicionalmente, en todos los muros se emplearon pernos como sistema de anclaje ente el acero y la mampostería. Cabe mencionar que en la literatura no se hace mención del uso de resina epoxi para la colocación de los pernos en la mampostería, por lo que se supone, el anclaje se hizo a través de fijación directa.

Tabla 23. Análisis de datos de la técnica de encamisado mediante bandas y placas de acero.

No. Caras encamisadas		Camisa		Espesor de banda /placa		Recubrimiento	
1	0%	Bandas	8%	t ≤ 1 mm	62%	Mortero	46%
2	100%	Placa completa	92%	t ≤ 2 mm	31%	NA	54%
				t > 2 mm	8%		

Con el objetivo de identificar el incremento en la resistencia en función de la técnica empleada (ya sea con bandas o placas completas) y del espesor de la placa o bandas colocadas, se realizó la comparación mostrada en la figura 73. En color rojo se identifican los muros que fueron rehabilitados mediante bandas de acero dispuestas en forma diagonal y en color verde y azul los especímenes rehabilitados con placa completa. A su vez, el color rojo indica espesor mayor que 2 mm, el color verde un espesor menor o igual a 1 mm y el color azul indica un espesor menor o igual a 2 mm (pero mayor que 1 mm).

Se aprecia que para los especímenes en los que se emplearon bandas diagonales de espesor mayor que 2 mm (9R) y (10R), la resistencia se incrementó hasta cuatro veces, mientras que, en el resto de los especímenes, en los cuales se empleó una placa completa de acero, el incremento en la resistencia fue cercano a dos veces la resistencia original.

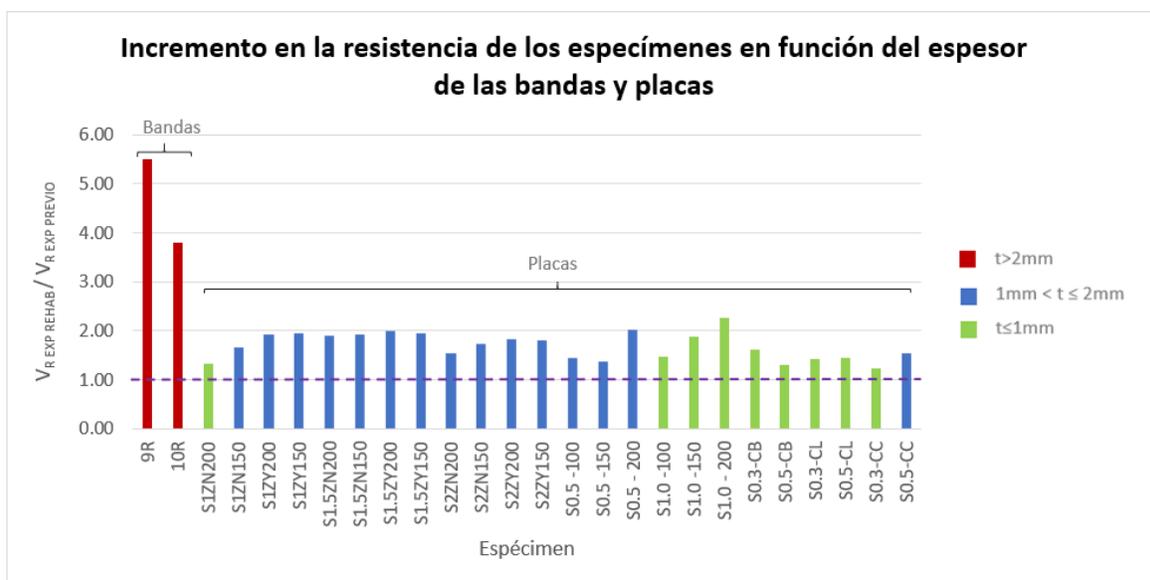


Figura 73. Incremento en la resistencia en función del espesor de la banda o placa empleada

4.4.2.3 Encamisado con bandas de polipropileno

Esta técnica, en comparación con otras como el encamisado con malla de alambre soldado o con PRF, ha sido muy poco estudiada, a pesar de que en términos de asequibilidad y costo resulta ser bastante eficiente. De esta técnica únicamente se encontraron siete especímenes, a base de un sistema de mampostería simple. Únicamente dos de los siete especímenes fueron ensayados previamente para después ser rehabilitados en ambas caras.

En todos los casos se formó una malla a base de bandas de polipropileno unidas entre sí a través de una soldadura plástica. Como se observa en la figura 74, 71% de los especímenes fueron rehabilitados bajo la conformación de una malla con bandas orientadas de forma horizontal y vertical (paralelas a los ejes del muro), mientras que el resto de los especímenes fueron ensayados con una malla conformada en forma diagonal.

En seis de los siete especímenes se aplicó un recubrimiento adicional a base de mortero de cemento, con la finalidad principal de asegurar la unión de las bandas a la mampostería. En promedio, se obtuvo un aumento de la resistencia de 1.3 veces respecto a la resistencia original. Cabe resaltar que en la literatura no se presentaron modelos para estimar la contribución a la resistencia, incluso, se hizo mención de que, como tal, no se esperó un incremento de la resistencia a través de esta técnica, pero sí un aumento en la capacidad de deformación.

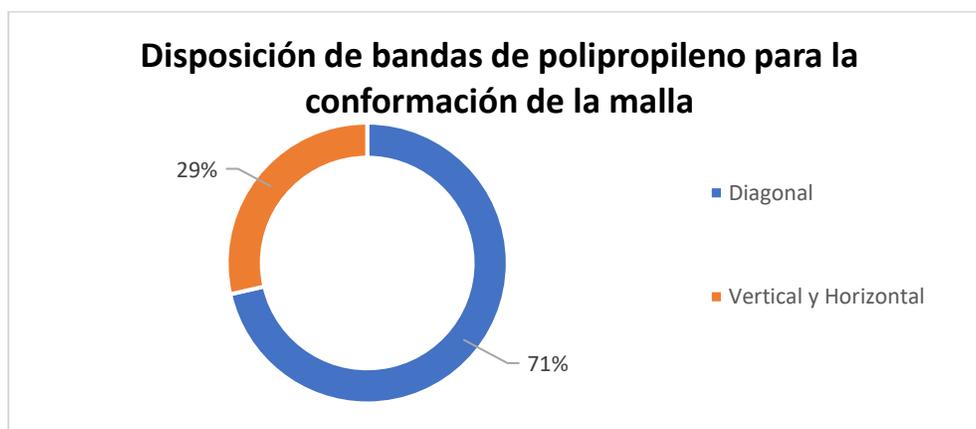


Figura 74. Disposición de bandas para la técnica de encamisado con bandas de polipropileno

4.4.2.4 Encamisado con fibras reforzadas de polímeros

Para esta técnica, 17 especímenes fueron estudiados. Prácticamente la mitad de los muros fueron ensayados mediante un refuerzo con fibra de carbono y el resto mediante fibra de vidrio, cubriendo, en 59% de los especímenes, ambas caras del muro como se muestra en la tabla 24. Se estudiaron tres distintas configuraciones de bandas: diagonal, vertical y horizontal.

Para anclar las fibras a la mampostería se emplearon pasadores y anclas elaboradas también con fibra reforzada con polímero. Los especímenes en los que no se emplearon anclajes, se adhirieron a la mampostería a través de resina epoxi. En dos especímenes (reforzados con fibra de carbono) se añadió una capa de yeso de 10 cm de espesor en ambas caras del muro.

Sólo uno de los diecisiete especímenes fue ensayado previamente. Para este espécimen se observó un incremento en la resistencia de 1.5 veces.

Tabla 24. Análisis de variables para la técnica de encamisado mediante fibras reforzadas con polímeros.

No. Caras encamisadas	FRP	Disposición de bandas		Anclaje		Recubrimiento adicional		
1	F. Carbono	53%	Diagonal	47%	Pasadores	35%	Sí	12%
2	F. Vidrio	47%	Vertical	47%	Anclas FRP	18%	No	88%
			Horizontal	6%	Sin anclaje	47%		

Respecto a los especímenes rehabilitados mediante fibra de carbono, en la literatura no se especifica el tipo de fibra utilizada: ultra-alto módulo, tipo UHM (módulo >450 GPa), alto módulo, tipo HM (módulo entre 350 – 450 GPa), módulo intermedio, tipo IM (módulo entre 200-350 GPa) o de módulo bajo y de alta resistencia a la tensión, tipo HT (módulo <200 GPa y resistencia a la tensión > 3GPa). A pesar de ello, con los valores dados del módulo de las fibras se supuso que todos los especímenes ensayados poseen fibras de carbono de módulo intermedio. Para el caso de las fibras de vidrio, la literatura menciona el uso de dos tipos: CW130-1000 (de baja resistencia, bidireccional) y EGFW40 (de alta resistencia y unidireccional). En la figura 75 se muestra la relación entre el tipo de fibra empleada y el modo de falla presentado en los especímenes.

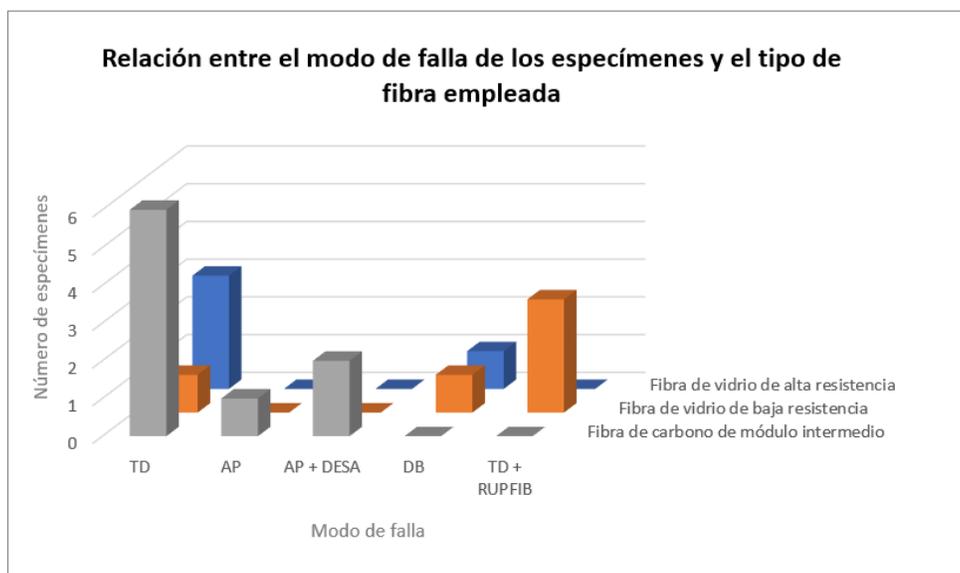


Figura 75. Relación entre el modo de falla de los especímenes y el tipo de fibra empleada.

De la figura 75 se observa que el modo de falla predominante para la mayoría de los especímenes fue por tensión diagonal, que incluso, para los especímenes rehabilitados con fibra de vidrio de baja resistencia se presentó en conjunto con la ruptura de las fibras (TD + RUPFIB). Para el caso de dos especímenes rehabilitados con fibra de carbono de módulo intermedio, se presentó un modo de falla dominado por aplastamiento de la mampostería y desprendimiento del anclaje (AP + DESA). Para ningún espécimen rehabilitado mediante fibras de carbono o fibras de vidrio se obtuvo una falla dominada por flexión.

4.4.2.5 Encamisado mediante textiles estructurales

En el caso de esta técnica, únicamente se estudió un espécimen. Realmente ha sido poca la experimentación que se ha realizado en torno a esta técnica. En sí, en la literatura se encontraron diversos programas experimentales abordando esta técnica; no obstante, estos programas experimentales fueron llevados a cabo en muretes de escala pequeña, por lo que se descartó su inclusión en la base de datos.

En el espécimen estudiado se empleó una malla textil a base de fibra de vidrio, y sólo una de las caras del muro fue encamisada. Después de la colocación de la malla textil se aplicó

una capa de “primer” a base de mortero de cemento de 0.5 cm de espesor, posteriormente se aplicó una capa de 0.5 cm como recubrimiento final.

Dado que el muro había sido previamente ensayado, se observó un incremento en la resistencia de 1.07 veces la resistencia original. Este valor debe ser tomado como una referencia.

4.4.2.6 Encamisado con morteros especiales con fibras

En esta técnica, cinco especímenes fueron registrados. Como se muestra en la tabla 25, en 60% de los muros se emplearon fibras metálicas, mientras que en el resto se incluyeron fibras sintéticas en la mezcla de mortero. Se emplearon tres tipos distintos de dosificación de fibras: 15 kg/m³, 30 kg/m³ y 40 kg/m³. Todos los especímenes fueron rehabilitados sólo en una de sus caras. El espesor del recubrimiento con mortero varió entre 0.5 y 3.0 cm.

Se tiene registro de la resistencia obtenida en uno de los especímenes previo a su rehabilitación, comparando este valor con el obtenido después de la rehabilitación se obtuvo un incremento de la resistencia de 1.2 veces con respecto a la original.

Tabla 25. Variables de análisis para la técnica de encamisado con morteros reforzados con fibras.

Tipo de fibra		Dosificación		Espesor camisa	
Metálicas	60%	< 20 kg/m ³	40%	< 1.5 cm	40%
Sintéticas	40%	> 20 kg/m ³	60%	> 1.5 cm	60%

Tomando en consideración que existen distintos tipos de fibras, tanto metálicas, como sintéticas, y con la finalidad de conocer la posible influencia del tipo de fibra en el modo de falla de los muros, se presenta en la figura 76 una gráfica que considera, además del tipo de fibra, variables como el tipo de pieza y la dosificación de fibras en la mezcla.

Las fibras metálicas pueden clasificarse de distintas formas (Silva, 2022):

- Según su origen o procedencia
 - Tipo I: Alambre rolando en frío.
 - Tipo II: Lámina de acero.
 - Tipo III: Extracción de fundición.
 - Tipo IV: Otros procesos.
- Según su forma
 - De extremos en gancho: Surgen de un proceso de trefilado (estirado mecánico) en frío sin modificar la estructura del acero.
 - Ondulada: Por su forma son de fácil trabajabilidad, dado que la longitud de las fibras está optimizada por su forma.
 - Recta: Posee extremos cónicos para asegurar el anclaje dentro de la matriz de concreto.

Por su parte, las fibras de vidrio y las fibras sintéticas (polipropileno, polietileno, poliéster, nylon) se clasifican, principalmente, en función de su tamaño :

- Microfibras: Tienen un diámetro comprendido entre 0.02 mm y 0.05 mm y una longitud de hasta 25 mm. Su uso se enfoca, principalmente, a minimizar el agrietamiento del concreto en estado fresco, se considera que su aporte a la capacidad estructural es nulo.
- Macrofibras: Poseen un diámetro de 0.5 – 0.7 mm, con una longitud de 19 – 50 mm. Las macrofibras se emplean en la prevención del agrietamiento del concreto en estado endurecido y para contribuir al desempeño de elementos sometidos a flexión y tensión.

La literatura no especifica el tipo de fibra utilizada, a pesar de ello, se asume con base en la evidencia fotográfica que las fibras metálicas y sintéticas empleadas para los especímenes de Lubin (2021) fueron de tipo onduladas y macrofibras, respectivamente. Para el espécimen de Flores (2012) se supuso, con base en fotografías, un fibra metálica con extremos en gancho.

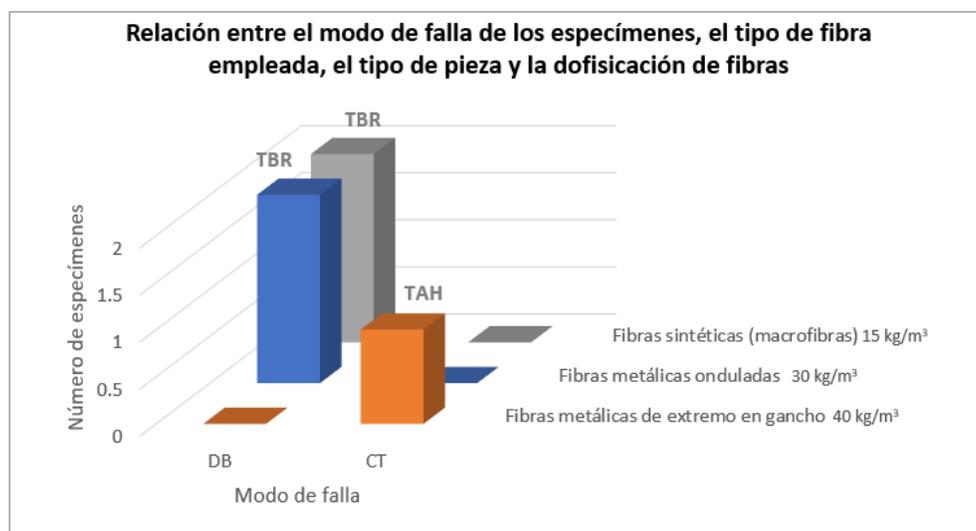


Figura 76. Relación entre el modo de falla de los especímenes, el tipo de fibra empleada, la dosificación de fibras y el tipo de pieza.

De la figura 76 se observa que predominó un modo de falla por deslizamiento en los especímenes conformados por piezas macizas (TBR), con una dosificación de fibras igual o menor a 30 kg/m³, mientras que para el espécimen hecho con piezas de arcilla huecas con fibras con extremo en gancho se presentó una falla dominada por cortante.

4.4.3 Análisis de la respuesta estructural de los especímenes

Después de la recopilación de la información general y la asociada a cada técnica de rehabilitación se buscó conocer la respuesta de cada espécimen en función de los valores de resistencia teóricos calculados en contraste con los valores experimentales obtenidos, así como la influencia de diversas variables en el comportamiento final de cada muro.

4.4.3.1 Efecto del daño

Una de las variables consideradas de interés para efectos de la rehabilitación fue la presencia de daño previo en los especímenes. Como se muestra en la figura 77, 66% de los especímenes no fueron ensayados previamente (daño nulo), 34% de los especímenes restante sufrió un determinado nivel de daño, catalogado como: ligero (2%), moderado (21%), severo (4%) y muy grave (6%), de acuerdo con la clasificación de la NTC-Mampostería 2017. En la tabla 26, se presenta el número de especímenes asociados a cada nivel de daño. A través del análisis de esta variable se pretende conocer el efecto del daño en el comportamiento del muro rehabilitado.

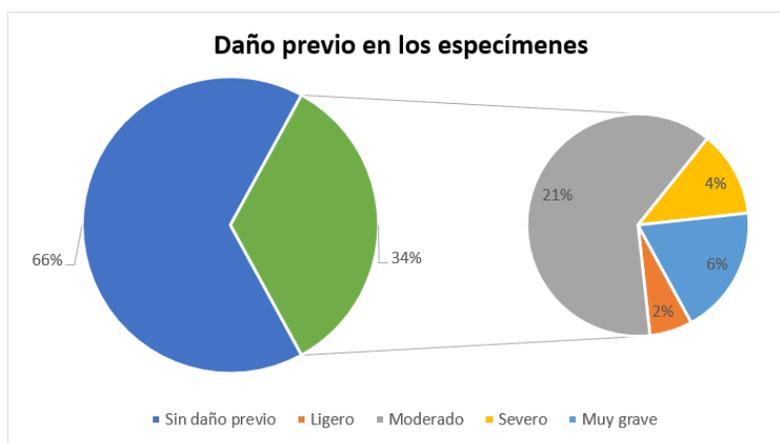


Figura 77. Presencia y nivel de daño previo a la rehabilitación

Tabla 26. Frecuencia y nivel de daño en los especímenes asociados a cada técnica de rehabilitación

Técnica de rehabilitación	NA	Ligero	Moderado	Grave	Severo
Malla de alambre soldado	15	2	15	3	3
Bandas y placas de acero	26	0	0	0	0
Bandas de polipropileno	7	0	0	0	0
Fibra reforzada de polímero	14	0	0	3	0
Textiles estructurales	0	0	1	0	0
Morteros reforzados con fibras	0	0	4	0	1
Total	62	2	20	6	4

Respecto a la información mostrada en la tabla 26 y la figura 77, se observa que la mayoría de los especímenes contenidos en la base de datos no fueron ensayados previamente, esto es relevante para este trabajo ya que mediante el análisis de estos especímenes se pueden estudiar las diversas técnicas de rehabilitación desde un enfoque de reforzamiento de muros, no de rehabilitación, como es el caso de los especímenes donde si hubo algún nivel de daño previo. Al conocer la respuesta de los muros que fueron ensayados previamente es posible conocer el aporte de cada una de las técnicas a la resistencia a manera de un cociente entre la resistencia del muro rehabilitado entre la resistencia del muro original.

4.4.3.2 Modo de falla

Del análisis de la información resultó relevante el considerar el modo de falla esperado y compararlo con los modos de falla obtenidos experimentalmente. En la figura 78, puede observarse que en 63% de los especímenes se esperó un modo de falla controlado por fuerza cortante, seguido por un modo de falla controlado por tensión diagonal y deslizamiento en la base, los cuales representan una combinación característica de una falla frágil en un muro de mampostería. Se descartó en todos los especímenes la posibilidad de una falla regida por aplastamiento de la mampostería (se muestra en 0%). También, asociado a cada técnica de rehabilitación se observó el modo de falla esperado.

En la tabla 27 se presenta el número de especímenes ensayados según su modo de falla esperado (registrado por los autores)0 y tipo de técnica de rehabilitación.

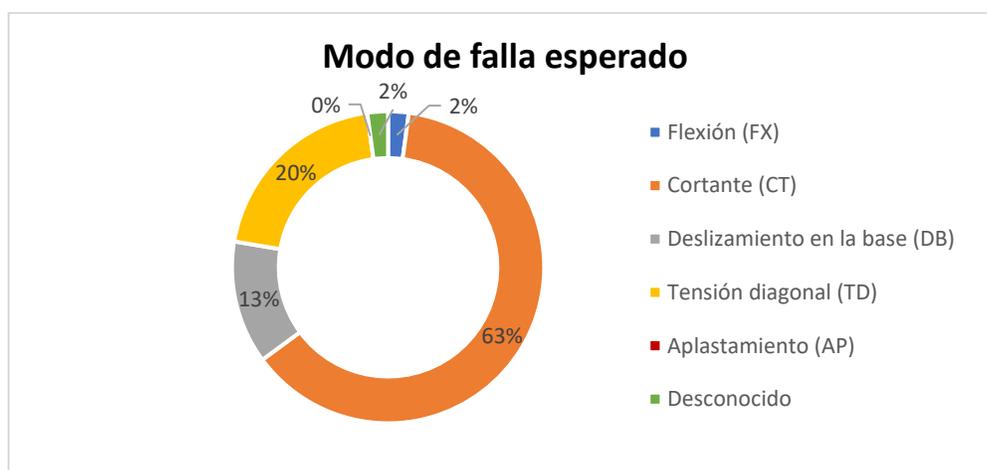


Figura 78. Modo de falla esperado en los especímenes rehabilitados

Tabla 27. Modo de falla esperado asociado a cada técnica de rehabilitación

Técnica de rehabilitación	FX	CT	DB	TD	APE	S/D
Malla de alambre soldado	2	32	0	2	0	2
Bandas y placas de acero	0	14	12	0	0	0
Bandas de polipropileno	0	7	0	0	0	0
Fibra reforzada de polímero	0	0	0	17	0	0
Textiles estructurales	0	1	0	0	0	0
Morteros reforzados con fibras	0	5	0	0	0	0
Total	2	59	12	19	0	2

En contraste con los modos de falla esperados antes del ensaye de los especímenes rehabilitados, se muestra en la figura 79 la frecuencia de modos de falla obtenidos experimentalmente. El modo de falla que predominó en 26% de los especímenes fue por deslizamiento en la base, seguido por tensión diagonal en 24%. El resto de los modos de falla se mantuvo similar, en términos de porcentaje (cortante, flexión y aplastamiento).

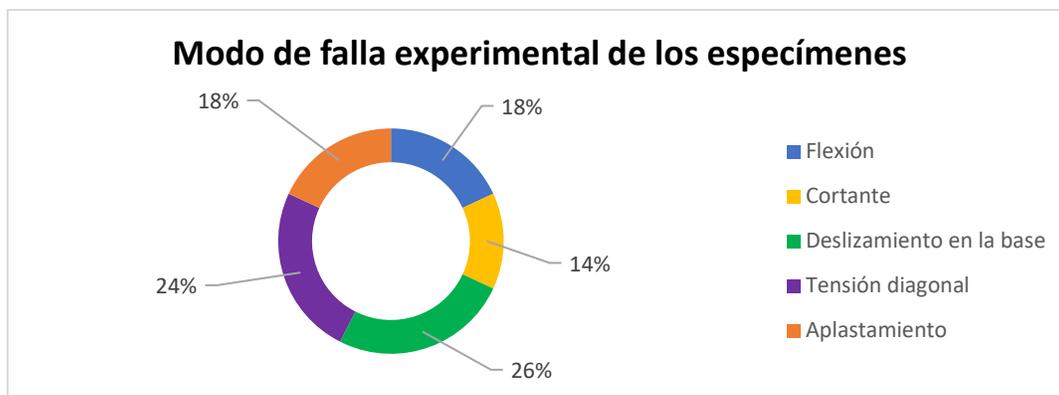


Figura 79. Modos de falla observados experimentalmente en los especímenes ensayados

Al comparar la tabla 27 con la tabla 28 es posible observar la diferencia entre lo esperado y lo obtenido. La variación entre los modos de falla esperados y los modos de falla obtenidos experimentalmente puede explicarse considerando que algunos especímenes, a pesar de haber sido diseñados para un determinado modo de falla, no fallaron de acuerdo con lo establecido teóricamente, ya sea porque así resultó el experimento o porque intervinieron variables que no fueron consideradas durante el diseño.

Tabla 28. Modo de falla obtenido experimentalmente, asociado a cada técnica de rehabilitación

Técnica de rehabilitación	FX	CT	DB	TD	APE
Malla de alambre soldado	8	5	15	6	4
Bandas y placas de acero	7	6	3	0	10
Bandas de polipropileno	2	1	1	3	0
Fibra reforzada de polímero	0	0	1	13	3
Textiles estructurales	0	0	0	1	0
Morteros reforzados con fibras	0	1	4	0	0
Total	17	13	24	23	17

4.4.3.3 Resistencia de cada espécimen

También, se evaluó, en función de cada técnica de rehabilitación, el efecto de la rehabilitación en la resistencia de cada espécimen. Para esta comparación se emplearon tres valores base:

$V_{RNTM2017}$, que representa el valor del cortante resistente nominal del muro calculado con las expresiones propuestas por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería en su versión 2017. Para la obtención de este valor se empleó la ecuación 5.4.2. de las NTC-Mampostería 2017:

$$V_{mR} = F_R[(0.5v'_m A_T + 0.3P) * f] \leq 1.5 F_R v'_m A_T f$$

Donde v'_m representa la resistencia a compresión diagonal para diseño de la mampostería. A_T es el área transversal del muro (incluyendo castillos, en caso de que se

trate de mampostería confinada). P es la carga axial que toma el muro, la cual se desprecia si la carga es de tensión. f es un factor que se determina en función de la relación de aspecto del muro, y se determina como

$$f = \begin{cases} 1.5 & \text{si } \frac{H}{L} \leq 0.2 \\ 1.0 & \text{si } \frac{H}{L} \geq 1.0 \end{cases}$$

Para este cálculo se consideró un factor de resistencia $F_R=1$.

$V_{RTEÓRICO}$, representando el valor de la resistencia calculada por los autores, considerando un factor de resistencia unitario. En el Capítulo 5 de este documento se desglosan las ecuaciones propuestas por cada autor para determinar la resistencia asociada a cada técnica.

$V_{REXPREV}$, que es el valor de la resistencia (carga nominal) obtenida en el ensayo previo a la rehabilitación, o, en su defecto, el valor de la resistencia obtenida en especímenes de control. Este apartado no se incorpora para aquellos especímenes en los que no se haya realizado una prueba destructiva previa a la rehabilitación.

Cabe mencionar que para los especímenes en los cuales no existe suficiente información, se colocó valor nulo.

En la figura 80 se presenta el incremento de resistencia para los muros encamisados con malla de alambre soldado. Lo ideal es obtener un cociente $V_{EXP}/V_{NOMINAL} \geq 1$ para evaluar la precisión del modelo o método de diseño. Cabe mencionar que en el empleo de las ecuaciones de las NTC-Mampostería 2017 se tomó en cuenta el aporte a la resistencia dado por la malla y se desprecio, como lo sugiere la norma, la contribución del mortero o del concreto.

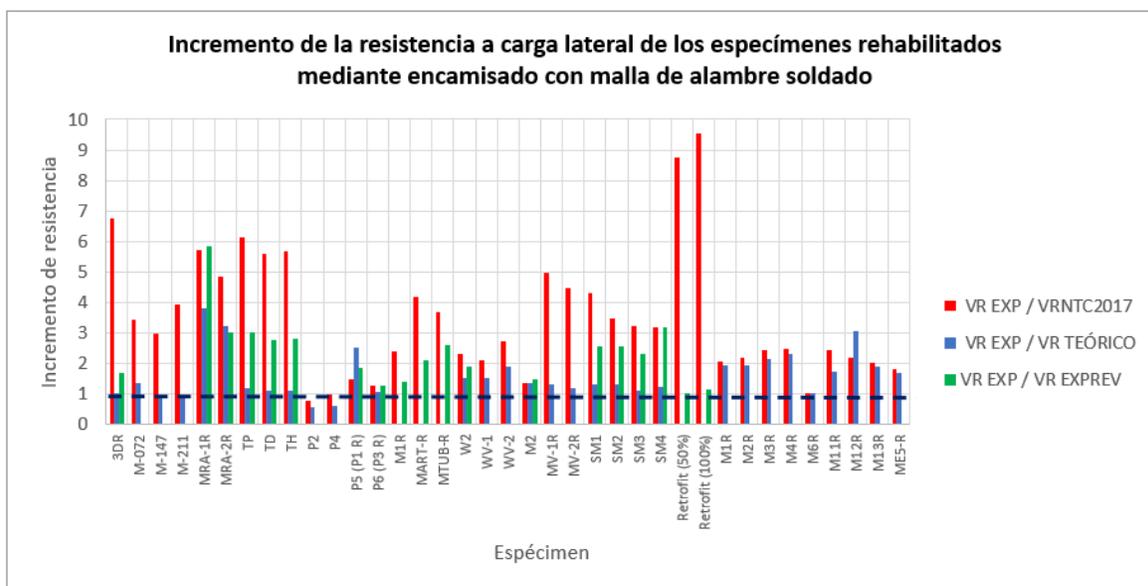


Figura 80. Relación de incremento de la resistencia experimental obtenida en los especímenes rehabilitados mediante malla de alambre soldado.

De la figura 80 se observa que, para la técnica de encamisado con malla de alambre soldado, en general, la resistencia medida (V_{EXP}) es mayor que la resistencia nominal calculada con las ecuaciones de la NTC-Mampostería 2017. Cabe resaltar que para las expresiones de la normatividad mexicana se empleó un factor de resistencia unitario, y además se consideró el aporte de la malla de alambre a la resistencia para cada espécimen (ecuación presentada en el Capítulo 5 de este documento). Por lo anterior, se consideró que los resultados obtenidos podrían considerarse conservadores, debido, posiblemente, a la intervención de diversas variables como el espesor del recubrimiento, el tipo de anclaje empleado, que no son tomadas en cuenta por las expresiones de la normatividad mexicana. Respecto al incremento observado de los valores experimentales respecto a los valores teóricos calculados por los autores, los valores se mantuvieron más cercanos a la unidad, por lo que se considera que los modelos de comportamiento propuestos pudieron haber resultado más aproximados. Por su parte, en los especímenes que fueron ensayados previamente, se presentó un incremento, en la mayoría de los casos, mayor que la unidad, lo que indica que la técnica resulta adecuada para la recuperación de la resistencia en muros que han sufrido daño.

En la figura 81 se presenta el análisis del incremento de la resistencia en los especímenes rehabilitados mediante bandas y placas de acero. Dado que la normatividad mexicana actual únicamente considera ecuaciones para la técnica anterior, en este caso la resistencia se calculó tomando en cuenta únicamente el aporte de la mampostería.

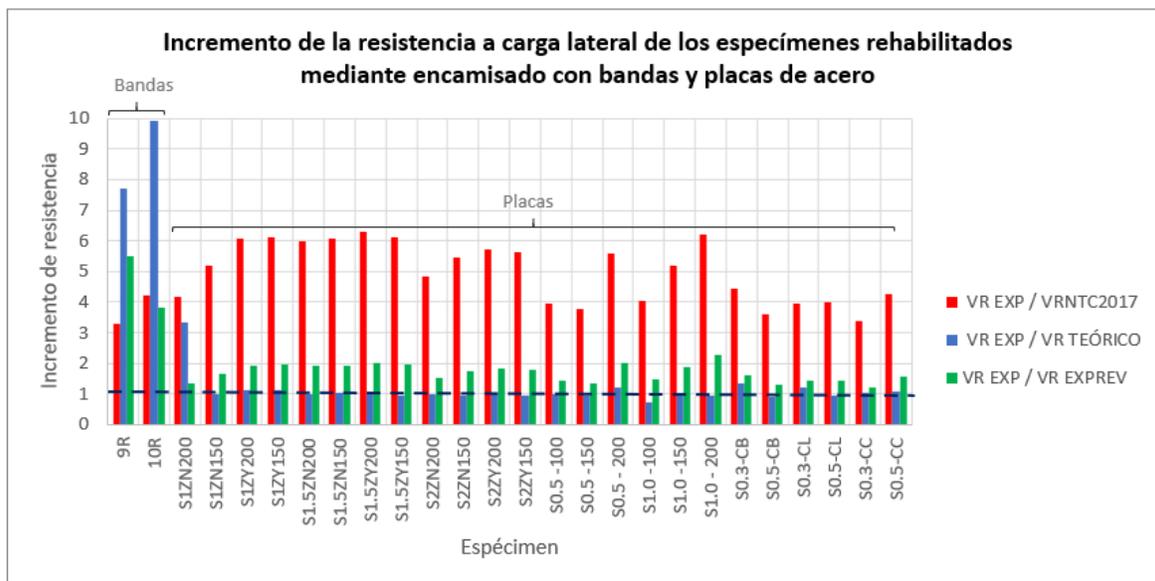


Figura 81. Relación de incremento de la resistencia experimental obtenida en los especímenes rehabilitados mediante bandas y placas de acero.

De la figura 81 se puede observar que los valores calculados con la NTC-Mampostería 2017 son mayores, en comparación con los valores teóricos calculados por los autores. La diferencia principal reside en las consideraciones realizadas para estimar la aportación de las bandas y placas de acero a la resistencia de los especímenes, como se mencionó anteriormente, únicamente se consideró la aportación de la mampostería, por lo que se puede estimar que las bandas y placas de acero brindan un aporte importante a la

resistencia de los especímenes. Con referencia a los gráficos que muestran la relación entre los valores experimentales y los valores teóricos de resistencia calculados por los autores, se aprecia una relación muy cercana a la unidad, al menos para el caso de los especímenes rehabilitados mediante placas completas de acero. Lo anterior podría indicar que los modelos propuestos por los autores se ajustan de forma muy aproximada al comportamiento experimental de los especímenes. En cambio, para los especímenes rehabilitados con bandas de acero, se podría considerar que los modelos propuestos resultan conservadores para la estimación del comportamiento, debido al incremento elevado que muestran. Con relación al incremento de resistencia entre los especímenes ensayados previamente se observan resultados favorables, ya que para todos los casos el cociente de resistencia fue mayor o al menos igual a la unidad.

Para el caso del encamisado mediante bandas de polipropileno, que se presenta en la figura 82, existen datos faltantes relacionados con los valores teóricos de la resistencia obtenidos por los autores. Así mismo, los valores asociados a la resistencia experimental previa de cinco de los siete especímenes. Respecto a los valores calculados con la normatividad mexicana actual, para este caso se consideró únicamente el aporte de la mampostería a la resistencia, dado que no existen expresiones que consideren la contribución del polipropileno.

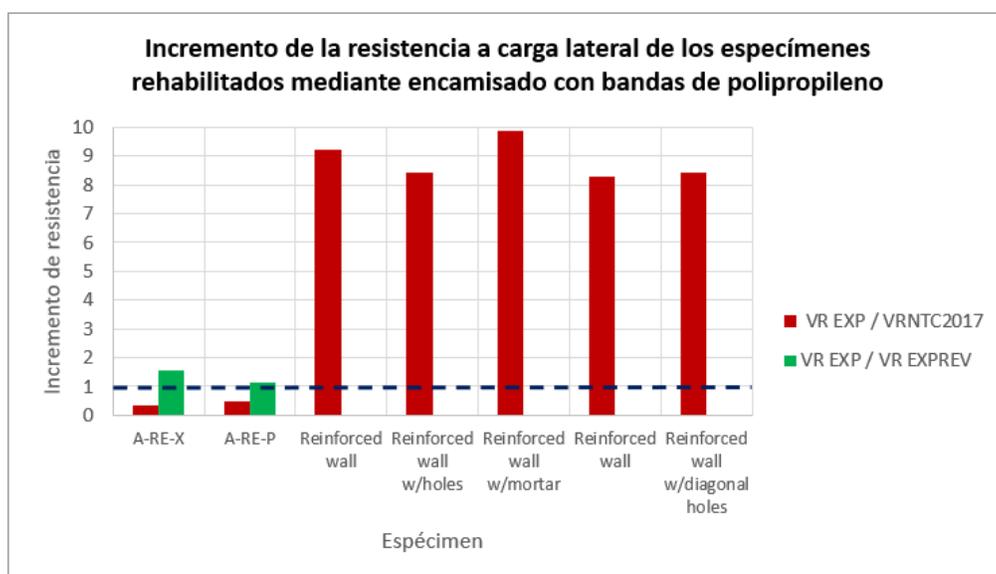


Figura 82. Relación de incremento de la resistencia experimental obtenida en los especímenes rehabilitados mediante bandas de polipropileno.

Para los especímenes mostrados en la figura 82 existió una variación notable entre los especímenes de los distintos programas experimentales (dos registrados) comparados con el aporte de la mampostería a la resistencia, calculado con las expresiones de las NTC – Mampostería 2017. Es posible que la diferencia entre ambos comportamientos se base en variables como la escala de los modelos ensayados y el tipo de prueba realizada; para el programa experimental que agrupa los especímenes A-RE-X y A-RE-P, el modelo se construyó a una escala 1:3 y se ensayó bajo una prueba dinámica en dos direcciones (X y Y); por otra parte, el resto de los especímenes se construyeron a escala real y se ensayaron ante carga lateral cíclica reversible.

Para los muros rehabilitados con bandas a base de polímeros reforzados con fibras, también existieron datos faltantes relativos a la obtención del valor teórico de la resistencia y de ensayos experimentales previos. De igual forma esta es una técnica cuya aportación no se incluye en la normatividad mexicana actual, por lo que la resistencia calculada con las expresiones de la NTC-M 2017 únicamente consideran la contribución de la mampostería a la resistencia. En la figura 83 se muestran los cocientes de resistencia obtenidos para cada espécimen, se observa que el incremento de resistencia basado en el aporte de la mampostería calculado con las expresiones de la NTC-Mampostería resulta en la mayoría de los casos, mayor o al menos igual que uno, no obstante, sigue siendo una relación conservadora, pues no se considera el efecto (teórico) de las bandas de PRF. Para los valores obtenidos del cociente entre la resistencia experimental y la calculada por algunos autores se presentan valores cercanos a uno, lo que puede indicar que los modelos propuestos por los autores se ajustan al comportamiento real de los especímenes. Finalmente, sólo un espécimen fue previamente rehabilitado, gráficamente se observa que se presentó un incremento de resistencia mayor que uno, lo que sugiere que, a través de esta técnica, es posible restituir al menos la resistencia inicial de un muro.

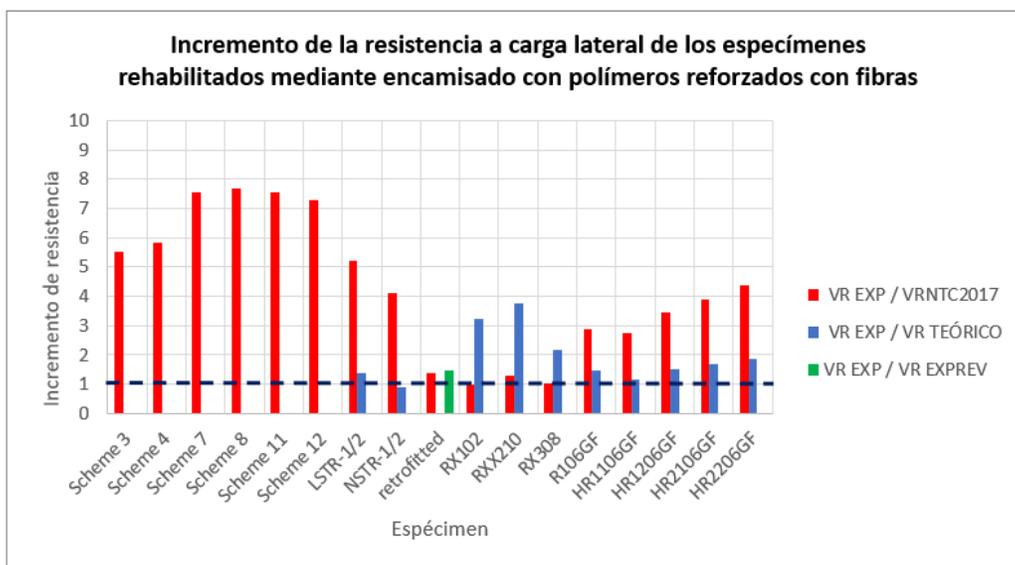


Figura 83. Relación de incremento de la resistencia experimental obtenida en los especímenes rehabilitados con polímeros reforzados con fibras.

La técnica correspondiente al encamisado mediante textiles estructurales no fue considerada para este análisis, dado que únicamente se cuenta con un espécimen y resultaría poco significativa para describir el comportamiento de los muros rehabilitados bajo esta técnica.

Por otro lado, en la figura 84 se muestran los valores de incremento de resistencia obtenidos para la técnica de encamisado mediante morteros reforzados con fibras.

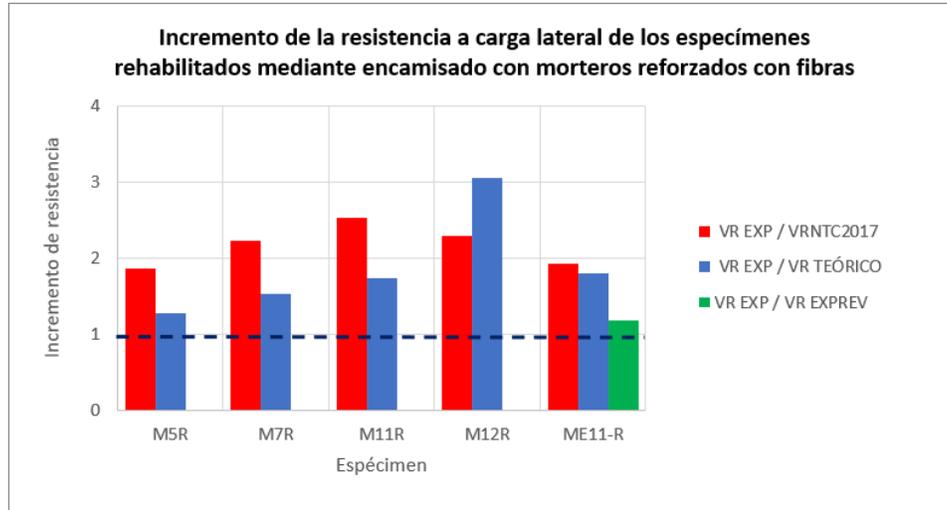


Figura 84. Relación de incremento de la resistencia experimental obtenida en los especímenes rehabilitados con polímeros reforzados con fibras.

Los valores de incremento marcados con la línea de color rojo se calcularon tomando en cuenta únicamente la aportación de la mampostería a la resistencia a través de la expresión propuesta por la NTC-Mampostería 2017, a excepción de los especímenes M11R y M12R, donde se incluyó la contribución de una malla de alambre soldado en cada espécimen, dado que estos especímenes se rehabilitaron mediante un encamisado con malla de alambre soldado y un recubrimiento de mortero reforzado con fibras. Estos valores de incremento se presentan cercanos a un valor de 2, lo cual resulta coherente tomando en cuenta que no se está considerando la aportación del recubrimiento de concreto/mortero. Respecto a los incrementos obtenidos con base en los valores teóricos calculados por los autores, se obtuvieron relaciones mayores a uno, lo que puede sugerir que los modelos propuestos por los autores cuentan con un margen “conservador” respecto a la respuesta real de los muros. Considerando que únicamente un espécimen fue ensayado previamente (ME11-R), se obtuvo un incremento de resistencia respecto al espécimen sin rehabilitar mayor que uno, lo que sugiere un comportamiento adecuado dada la rehabilitación con mortero reforzado con fibras metálicas.

Las distintas técnicas estudiadas han mostrado, en general, resultados favorables en la recuperación de la resistencia e incluso, en algunos casos, el aumento en la capacidad de deformación de los muros. No obstante, sigue existiendo una limitante en la aplicación de algunas de las técnicas previamente presentadas debido a la poca investigación que se ha realizado. El contar con mayor investigación permitirá formar bases de datos más robustas y detalladas que permitan establecer modelos de comportamiento cada vez más aproximados al comportamiento real de los muros de mampostería rehabilitados.

CAPÍTULO 5

MODELOS PARA DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrollan diversos modelos de análisis, bajo un enfoque de diseño por desempeño, para las técnicas de rehabilitación estudiadas en el Capítulo 4 de este documento. Los modelos de análisis se presentan a través de curvas de comportamiento basadas en tres puntos: inicio del agrietamiento en la mampostería (V_{agr} , δ_{agr}), resistencia máxima ($V_{máx}$, $\delta_{máx}$) y resistencia última ($V_{últ}$, $\delta_{últ}$).

El objetivo de este capítulo es desarrollar una serie de curvas de comportamiento que permitan predecir la respuesta no lineal de muros de mampostería rehabilitados mediante distintas técnicas, tomando en cuenta variables como el modo de falla del muro (aplastamiento, cortante, deslizamiento, flexión, tensión diagonal), el tipo de configuración estructural (mampostería simple, mampostería confinada, mampostería reforzada interiormente o muros diafragma de mampostería), el tipo de pieza (macizas o huecas de arcilla o de concreto), la relación de aspecto (H/L) y la presencia de daño previo en el muro.

5.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Para el establecimiento de parámetros que definirán a cada curva de comportamiento, se realizó un análisis de los datos registrados en la base de datos (Apéndice A). Se identificaron variables de interés que se consideraron relacionadas con el comportamiento final de los muros, para esto, de cada programa experimental se obtuvieron las curvas de comportamiento histerético (Apéndice B) y sus envolventes de respuesta (Apéndice C). De las envolventes de respuesta se observaron las tendencias en el comportamiento de cada espécimen en función de la técnica con la que fue rehabilitado. El proceso de selección de parámetros fue iterativo, se buscó la menor dispersión de datos posible, con la finalidad de obtener curvas más refinadas.

5.2.1 Parámetros generales

Los parámetros generales identificados para la elaboración de las curvas de comportamiento para cada una de las técnicas de rehabilitación estudiadas en el Capítulo 4 son:

- a) Modo de falla: A través del modo de falla de un muro de mampostería es posible suponer, a través del diseño, la forma en que el muro se comporta ante distintas demandas de capacidad. Los modos de falla considerados en esta categoría son:
 - Aplastamiento
 - Cortante
 - Deslizamiento
 - Flexión
 - Tensión diagonal

- b) Configuración estructural: La configuración estructural cobra gran relevancia en el desempeño de un sistema a base de muros de mampostería, ya que es posible conocer qué otros elementos, como el acero, intervienen en la contribución a la resistencia, como es el caso de la mampostería confinada, la mampostería reforzada interiormente o los muros diafragma de mampostería (ya sea en marcos de acero o de concreto); o en su defecto, bajo la ausencia de qué elementos el sistema estructural soporta las cargas que actúan sobre él, como es el caso de la mampostería simple.
- c) Tipo de pieza: Identificar el tipo de pieza que conforma a un sistema de mampostería es fundamental, puesto que a través de ello es posible conocer un parámetro completamente relevante desde el punto de vista estructural: la resistencia a compresión; sin dejar de lado otros parámetros importantes como la resistencia a compresión diagonal, la resistencia al aplastamiento, la resistencia a tensión, el módulo de elasticidad o el módulo de cortante. Para esta categoría se distinguieron cuatro categorías generales, que incluyen a los distintos tipos de piezas que conforman la base de datos. La categorías son:
- Piezas de arcilla macizas (TBR)
 - Piezas de arcilla huecas (TAH, TAMP, TAPH)
 - Piezas de concreto macizas (TC)
 - Piezas de concreto huecas (BCH)
- d) Relación de aspecto del muro (H/L): Este parámetro es de gran relevancia para determinar el comportamiento de un muro de mampostería, ya que, de acuerdo con Pérez et al. (2013), la variación en la respuesta de un muro de mampostería en términos de resistencia se encuentra directamente relacionada con la relación de aspecto. A medida que se cuenta con muros más robustos (menor relación de aspecto, $H/L < 1$), la componente de fuerza debida a flexión disminuye, lo que da lugar a modos de falla de tipo frágil (controlados por fuerza cortante), como una falla por tensión diagonal o por deslizamiento.
- e) Daño previo: Tomando en consideración que las técnicas estudiadas en el Capítulo 4 pueden ser empleadas para muros de mampostería donde se busca restituir su capacidad debido a un daño previo (rehabilitación), como para aumentar su capacidad (reforzamiento), se optó por tomar en cuenta la presencia o ausencia de daño previo para la elaboración de las curvas de comportamiento. Este parámetro permite conocer si los modelos de comportamiento propuestos son aplicables a muros cuyas propiedades se encuentran degradadas o no.

Cabe mencionar que los parámetros anteriormente mencionados se aplicaron de forma indistinta para todas las técnicas mencionadas en este estudio.

5.2.2 Parámetros específicos

Para algunas técnicas, se observaron tendencias de comportamiento que además de variar con respecto a los parámetros generales de 5.2.1, variaron en función de otros parámetros. A continuación, se mencionan los parámetros tomados en cuenta para cada técnica donde se observaron tendencias particulares de comportamiento en las curvas envolventes de respuesta.

- Encamisado mediante placas de acero
 - a) Espesor de placa (t_{placa})
 - b) Esfuerzo especificado de fluencia de las placas ($f_{y, placa}$)
 - c) Soporte/anclaje en bordes: En el análisis de las tendencias se observó la influencia de la distribución del anclaje en los bordes del muro, por lo que se optó por incluir este parámetro en la conformación de algunos modelos de análisis.

- Encamisado con bandas de polipropileno
 - a) Disposición de las bandas: Este parámetro hace referencia a si las bandas se colocaron de forma diagonal (y con que ángulo de inclinación), vertical u horizontal sobre la mampostería.

- Encamisado con polímeros reforzados con fibras (PRF)
 - a) Disposición de las bandas: Al igual que para la técnica anterior, se observaron variaciones en el comportamiento en función de las distintas formas de disponer las bandas.
 - b) Tipo de fibra: Se consideraron los distintos tipos de fibras (para este caso de carbono y de vidrio) que fueron empleadas para la rehabilitación de los especímenes de la literatura: fibras de carbono de módulo intermedio, fibras de vidrio de alta resistencia y de baja resistencia.

5.2.3 Exclusión de datos para el análisis

Con la finalidad de obtener modelos con mayor nivel de precisión y evitar el sesgo de información para la elaboración de los modelos de comportamiento, se eliminaron del análisis diversos especímenes, que, aunque fueron incluidos en la base de datos, durante el análisis de tendencias mostraron una dispersión importante respecto al resto de datos. Algunos especímenes pertenecientes a otros programas experimentales se descartaron previo a la elaboración de la base de datos, dado que se consideró que sus características (tanto del espécimen como del programa experimental) tendrían el potencial de generar un sesgo de información.

Los criterios considerados para la exclusión de datos se enuncian a continuación.

- Escala incompatible: Se descartaron tanto de la base de datos como del análisis de las curvas envolventes de respuesta de aquellos especímenes construidos a una escala menor que la escala real (1:1). Se consideró que los datos obtenidos de estos modelos no eran comparables respecto a los demás, desde un punto de vista de resistencia y capacidad de deformación.

- Comportamiento irregular en las envolventes de respuesta: Este criterio hace referencia a especímenes en los que su envolvente de respuesta presentó un comportamiento que no responde al comportamiento común de la mampostería ante la acción de cargas gravitacionales y laterales. Así mismo, se incluyen aquí los especímenes cuya envolvente de respuesta presentó una dispersión en sus datos mayor que 50% respecto a su curva promedio asociada.

- Información insuficiente o incompatible: En algunos especímenes se completó información faltante (generalmente propiedades de diseño de la mampostería) con base en valores propuestos por la NTC-Mampostería 2017. No obstante, se descartaron especímenes donde hizo falta información relativa a la geometría de los especímenes o incluso donde no se presentaron envoltentes de respuesta. A su vez, no se elaboraron modelos de comportamiento para aquellas técnicas de rehabilitación con pocos especímenes que además tuvieron parámetros que no coincidieron entre sí, por ejemplo, para la técnica de morteros reforzados con fibras, en los especímenes que presentaron un modo de falla controlado por deslizamiento, cada espécimen se rehabilitó de forma distinta, lo que dio lugar a una dispersión de datos considerable.

Con la exclusión de datos, únicamente se utilizó la información de 56 de los 94 especímenes registrados en la base de datos para la elaboración de los modelos de comportamiento. Lo anterior resalta la necesidad de contar con mayor investigación experimental, que permita manejar una mayor cantidad de datos que dé lugar a modelos más precisos.

5.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A FUERZA CORTANTE

Para la construcción de las curvas de comportamiento, se utilizaron valores normalizados de la resistencia obtenida experimentalmente en cada espécimen dividida por la resistencia calculada mediante diversas expresiones basadas en modelos propuestos en la literatura y por expresiones propuestas en la normatividad vigente.

5.3.1 Fuerza cortante resistida por la mampostería

Con la finalidad de estimar la aportación de la mampostería a resistir la fuerza cortante se calculará mediante la expresión 5.4.2 de la NTC-Mampostería 2017.

$$V_{mR} = F_R[(0.5v'_m A_T + 0.3P) * f] \leq 1.5 F_R v'_m A_T f$$

Donde

- A_T Área transversal del muro (incluyendo castillos sin sección transformada, para el caso de mampostería confinada).
- v'_m Resistencia a compresión diagonal para diseño de la mampostería.
- F_R Factor de resistencia, que para todos los muros se tomó igual que 1.
- P Carga axial total que obra sobre el muro.
- f Factor adimensional que depende de la relación de aspecto y que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$f = \begin{cases} 1.5 & \text{si } \frac{H}{L} \leq 0.2 \\ 1.0 & \text{si } \frac{H}{L} \geq 1.0 \end{cases}$$

En muros de mampostería reforzada interiormente, además de la contribución de la mampostería, la NTC-Mampostería 2017 considera la contribución del refuerzo horizontal a la resistencia, de tal forma que la resistencia total se define con la expresión 6.4.1:

$$V_R = V_{mR} + V_{sR}$$

Donde la fuerza cortante resistida por el acero de refuerzo horizontal se obtiene mediante la expresión 6.4.4 de la NTC-Mampostería 2017 de la siguiente forma:

$$V_{sR} = F_R \eta \rho_h f_{yh} A_T$$

Donde

F_R Factor de resistencia, que para todos los muros se tomó igual que 1.

η Factor de eficiencia del refuerzo horizontal, que cuando la carga axial es de compresión, se calcula de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R \rho_h f_{yh} A_T} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s$$

ρ_h Cuantía de acero de refuerzo horizontal

$$\rho_h = \frac{A_{sh}}{s_h t}$$

A_{sh} Área de acero de refuerzo horizontal.

s_h Separación del acero de refuerzo horizontal en el muro.

K_0 Factor para determinar la resistencia a fuerza cortante de la mampostería que depende de la relación de aspecto.

$$k_0 = \begin{cases} 1.3 & \text{si } \frac{H}{L} \leq 1.0 \\ 1.0 & \text{si } \frac{H}{L} \geq 1.5, \end{cases} \quad \text{ó interpolación para valores intermedios}$$

k_1 Factor de reducción de la resistencia a fuerza cortante de la mampostería que depende de la cuantía de refuerzo.

$$k_1 = 1 - \alpha \rho_h f_{yh} \geq (1 - 0.1 f_{nm} f'_m \alpha)$$

f_{nm} Cociente entre el área neta y área bruta del muro con refuerzo interior, considerando a las celdas rellenas de mortero como macizas.

$$f_{nm} = \frac{A_T - \Sigma A_{hueco}}{A_T}$$

η_s Factor parcial de eficiencia del refuerzo horizontal que depende de la resistencia a compresión de la mampostería.

$$\eta_s = \begin{cases} 0.75 & \text{si } f'_m \geq 9 \text{ MPa} \left(90 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \\ 0.55 & \text{si } f'_m \leq 6 \text{ MPa} \left(60 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \end{cases}$$

α Reducción de la resistencia a fuerza cortante normalizada por unidad de $\rho_h f_{yh}$

$$\alpha = 0.45 \text{ MPa}^{-1} \left(0.045 \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)^{-1} \right)$$

También, se propone el empleo de la expresión 7.2.4 del ACI 369 (*Shear Friction Controlled Walls*). Se consideró el uso de esta expresión para los especímenes cuyo modo de falla principal fue controlado por desplazamiento. Cabe resaltar que esta expresión es empleada comúnmente para muros de concreto reforzado, sin embargo, se consideró su uso para el caso de los muros de mampostería con la finalidad de buscar un resultado más preciso para cada espécimen en función de su modo de falla:

$$V_{cyfWallSE} = \mu(A_{vf}f_y + N_{UG}) \leq 0.2f'_cE A_g$$

Donde

- F_R Factor de resistencia, que para todos los muros se tomó igual que 1.
- μ Coeficiente de fricción-cortante, tomado como 0.6 para el caso de la mampostería.
- A_{vf} Área del refuerzo a cortante.
- f_y Esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo.
- N_{UG} Carga axial total que obra sobre el muro.
- f'_c Resistencia especificada a la compresión del concreto. Este valor se cambió por la resistencia de diseño a la compresión de la mampostería (f'_m).
- A_g Área transversal del muro (incluyendo castillos sin sección transformada, para el caso de mampostería confinada).

Para el caso de los muros diafragma, se emplearon las expresiones propuestas en el Capítulo 4 de las NTC-Mampostería 2017. La resistencia a corte por aplastamiento a lo largo de la diagonal del muro diafragma se calculó mediante la expresión 4.3.1:

$$V_R = 0.4F_R f'_m b_d t \cdot \cos\theta_d$$

Donde

- f'_m Resistencia a compresión para diseño de la mampostería.
- t Espesor del muro
- b_d Ancho de la diagonal equivalente.

$$b_d = \frac{1}{2} \sqrt{\ell_c^2 + \ell_v^2} \leq \frac{l_d}{4}$$

ℓ_c, ℓ_v Longitudes de contacto del muro con la columna y la viga, respectivamente.

$$\ell_c = \frac{\pi}{2} \left(\frac{4E_f I_c H}{E_m t \text{ sen}2\theta_d} \right)^{1/4}$$

$$\ell_v = \pi \left(\frac{4E_f I_v L}{E_m t \operatorname{sen} 2\theta_d} \right)^{1/4}$$

$$l_d = (H^2 + L^2)^{1/2}$$

- E_f, E_m Módulo de elasticidad para cargas de corta duración, del material del marco y de la mampostería, respectivamente.
- I_c, I_v Momentos de inercia de la sección transversal bruta de la columna y de la viga.
- H Altura libre del muro.
- L Longitud del muro.
- θ_d Ángulo que forma la diagonal del muro con la horizontal.

$$\theta_d = \tan^{-1} \left(\frac{H}{L} \right)$$

Por otra parte, la fuerza cortante resistente por deslizamiento para los muros diafragma se calculó mediante la expresión 4.4.1 de la NTC-Mampostería 2017:

$$V_R = \frac{0.4F_R f'_m v'_m A_T}{1 - 0.9F_R \tan \theta_d}$$

A través de las expresiones mostradas, se buscó conocer la contribución de la mampostería a la resistencia, no obstante, para conocer la contribución de cada técnica de rehabilitación a la resistencia se emplearon las expresiones propuestas por cada autor incluido en la base de datos. En los siguientes puntos se mencionarán las expresiones empleadas para cada técnica de rehabilitación.

5.3.2 Fuerza cortante resistida por el encamisado con malla de alambre soldado

Después del sismo del 19 de septiembre de 2017 la nueva versión de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería para la Ciudad de México fueron publicadas y entraron en vigor para su aplicación tanto en las nuevas edificaciones como en la revisión y rehabilitación de las existentes. Antes de la edición de 2017 de las NTC-M, se encontraban en vigor las NTCM-2004, estas surgieron como cambio para la normatividad que fue emitida después del sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México. La normatividad de 2004 basó sus cambios, con respecto a la normatividad de 1985, en programas experimentales, analíticos y en observaciones de campo realizadas en México y en otros países. En particular, respecto al empleo de malla de alambre soldado, la normatividad de 2004 incluyó a través de una expresión, la contribución que tiene la malla a la resistencia a cortante de los muros en los que es colocada (Alcocer, et al., 2005). Cabe mencionar, que esta la única técnica que se encuentra especificada en la normatividad mexicana actual.

Para todos los especímenes rehabilitados mediante esta técnica se emplearon las expresiones propuestas por la NTC-Mampostería 2017. Para esta técnica, la normatividad propone el uso de la misma ecuación para el cálculo de la resistencia a fuerza cortante

resistida por el acero de refuerzo horizontal en muros de mampostería reforzada interiormente, (ecuación 5.4.12 en la NTC-Mampostería 2017):

$$V_{sR} = F_R \eta \rho_h f_{yh} A_T$$

Sin embargo, existe una variación en el cálculo de algunos de los parámetros que integran la expresión anterior, como se muestra a continuación:

$$\eta = k_1 \eta_s$$

$$\eta_s = 0.5$$

La norma únicamente considera la cuantía de los alambres horizontales de la malla, o en su defecto, las componentes horizontales en caso de que la malla sea colocada de forma inclinada. A su vez, no se considera la contribución a la resistencia dada por el recubrimiento de mortero o de concreto.

5.3.3 Fuerza cortante resistida por el encamisado con bandas y placas de acero

Para el caso de los especímenes rehabilitados mediante bandas de acero, la literatura existente no presenta expresiones o modelos a través de los cuales se pueda estimar la contribución de las bandas a la resistencia de los especímenes, además de esto, no fue posible elaborar curvas de comportamiento para esta técnica (empleo de bandas), debido a que los especímenes existentes presentaron modos de falla distintos, además de tener una configuración estructural distinta entre sí.

Por otra parte, para el caso de los especímenes que fueron rehabilitados mediante placas completas de acero, los autores (Özbek et al., 2019) proponen varias expresiones para el cálculo de la resistencia de muros diafragma rehabilitados mediante esta técnica. La primera expresión considera un modo de falla controlado por aplastamiento en las esquinas de los muros:

$$V_{cinf} = a_{inf} t_{inf} f'_{me90} \cos \theta$$

Donde

- t_{inf} Espesor del muro de mampostería.
- f'_{me90} Resistencia a compresión para diseño de la mampostería.
- a_{inf} Ancho de la diagonal de compresión equivalente.
- θ Ángulo cuya tangente es la relación de aspecto del muro de mampostería.

$$a_{inf} = 0.175 (\lambda h_{col})^{-0.4} r_{inf}$$

$$\lambda = \left[\frac{E_{me} t_{inf} \text{sen} 2\theta}{4 E_{fe} I_{col} h_{inf}} \right]^{1/4}$$

- h_{col} Altura de la columna medida entre los ejes de las vigas.
- r_{inf} Longitud en diagonal del muro de mampostería.

E_{fe} , E_{me} Módulo de elasticidad para cargas de corta duración, del material del marco y de la mampostería, respectivamente.

I_{col} Momento de inercia de la columna.

h_{inf} Altura del muro de mampostería.

Partiendo de la ecuación de resistencia al cortante por aplastamiento, los autores proponen una expresión que considere la aportación de las placas de acero sustituyendo el ancho de la diagonal equivalente del muro diafragma sin rehabilitar a_{inf} por a_{str} donde se considera el ancho equivalente del muro rehabilitado. La expresión propuesta se define como:

$$V_{str} = a_{str} t_{inf} f'_{me90} \cos \theta$$

$$a_{str} = a_{inf} \left[1 + \frac{2\omega s t_p f_{yp}}{t_{inf} f'_{me90}} \right]$$

Donde

- ω Factor que cambia respecto a la condición de conexión de las columnas con las placas de acero. En muros donde las placas se encuentran conectadas, de alguna forma, a las columnas, se observó que la placa resiste esfuerzos de tensión en la dirección diagonal del muro. Sin embargo, el nivel de esa contribución depende del patrón de agrietamiento en el muro y de la distribución de anclajes sobre la mampostería. Debido a ese comportamiento complejo, los autores propusieron que la resistencia adicional dada por una conexión entre la placa y las columnas fuera de 20% respecto a la contribución proporcionada por la placa en la dirección de compresión. Por lo tanto, ω puede adoptar el valor de 1.2 cuando exista conexión entre la placa y el muro, de lo contrario, se considerará un valor igual que 1.
- s Cociente entre el área neta y el área bruta de la placa (en caso de que ésta se encuentre perforada).
- t_p Espesor de la placa de acero.
- f_{yp} Esfuerzo especificado de fluencia de las placas de acero.

5.3.4 Fuerza cortante resistida por el encamisado con bandas de polipropileno

Tomando en cuenta que la cantidad de información encontrada respecto a esta técnica fue limitada, en la literatura ningún autor incluye dentro de sus estudios una expresión que permita estimar la fuerza cortante que resisten las bandas de polipropileno. Algunos autores (Sathiparan et al., 2012) argumentan que las bandas de polipropileno no propician un aumento de la resistencia inicial de los muros, sin embargo, sí incrementan la capacidad de deformación y la capacidad de disipación de energía de los muros. Esto resulta, hasta cierto punto, consistente con lo observado en los especímenes que han sido ensayados con esta técnica, puesto que se ha presentado un aumento promedio de 20% en la resistencia de los especímenes, sin embargo, los autores atribuyen este aumento a la aportación de los recubrimientos a la resistencia (mortero).

Para la elaboración de los modelos de comportamiento, únicamente se consideró la contribución de la mampostería a resistir la fuerza cortante calculada con las expresiones de las NTC-Mampostería 2017. El valor normalizado resultante puede considerarse conservador, sin embargo, esto realza la importancia de llevar a cabo una mayor cantidad de ensayos experimentales que permitan estudiar de forma más precisa el comportamiento de muros rehabilitados mediante esta técnica.

5.3.5 Fuerza cortante resistida por el encamisado con bandas de polímeros reforzados con fibras (PRF)

En la actualidad, el uso de polímeros reforzados con fibras en el reforzamiento y rehabilitación de estructuras existentes ha sido cada vez más recurrente, dado que ha existido un mayor interés por conocer como contribuye esta técnica a mejorar el comportamiento de un elemento estructural. Puesto que es una técnica que se utiliza cada vez con mayor frecuencia (sobre todo en elementos de concreto), existen diversas propuestas que permiten estimar la contribución de los PRF a la capacidad de un elemento, en este caso, a los muros de mampostería.

Binici et al.,(2007) estableció un modelo de esfuerzo-deformación trilineal para la respuesta a tensión de muros diafragma reforzados con bandas diagonales de fibra de carbono. A través del modelo propuesto, se supuso una contribución dada por la mampostería, la fibra de carbono y el recubrimiento del muro. En la figura 85 se muestra el modelo propuesto por Binici et al., (2007).

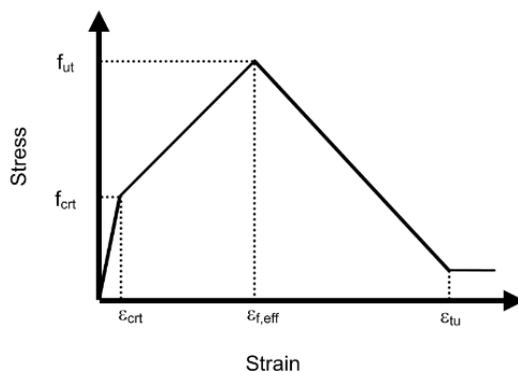


Figura 85. Modelo esfuerzo-deformación para la rehabilitación de muros diafragma mediante bandas diagonales de fibra de carbono (Binici et al., 2007).

A continuación, se muestran las expresiones propuestas por Binici (2007) para conformar el modelo de la figura 85.

Para la resistencia al agrietamiento:

$$f_{crt} = \frac{V_{crt}}{A_{tie}}$$

$$V_{crt} = f_{pt} w_f ((t_{in} + t_p) + \left(\frac{E_f}{E_m}\right) t_f)$$

Donde

- f_{pt} Resistencia a tensión del recubrimiento.
 w_f Ancho de las bandas.
 E_f, E_m Módulo de elasticidad de la fibra y módulo de elasticidad del mortero.
 t_{in} Espesor del muro de mampostería.
 t_p Espesor del recubrimiento.
 t_f Espesor de la banda conformada por la fibra.

Y el área de tensión se expresa como

$$A_{tie} = w_f t_{tie}$$

$$t_{tie} = t_f + t_p + t_{in}$$

Para el punto de resistencia máxima:

$$f_{ut} = \frac{V_{ut}}{A_{tie}}$$

$$V_{ut} = \varepsilon_{f,eff} w_f t_f E_f$$

Donde

- $\varepsilon_{f,eff}$ Deformación efectiva de la fibra, que depende del tipo de falla que presente la fibra (falla del anclaje, desprendimiento de la fibra). Binici (2007) supuso un valor de 0.002 para un modo de falla controlado por la falla del anclaje. A su vez, propuso que el nivel de deformación que indica la falla por desprendimiento del anclaje es tres veces la deformación efectiva de la fibra, es decir, 0.006.

También, Binici et al., (2007) estableció un modelo de puntales de compresión para estimar la capacidad resistente de muros diafragma de mampostería rehabilitados mediante bandas de polímeros reforzados con fibras. En la figura 86 se muestra, a la izquierda, el modelo de puntales de compresión de un muro diafragma sin rehabilitación, mientras que a la derecha se observa el modelo que considera la contribución de las fibras.

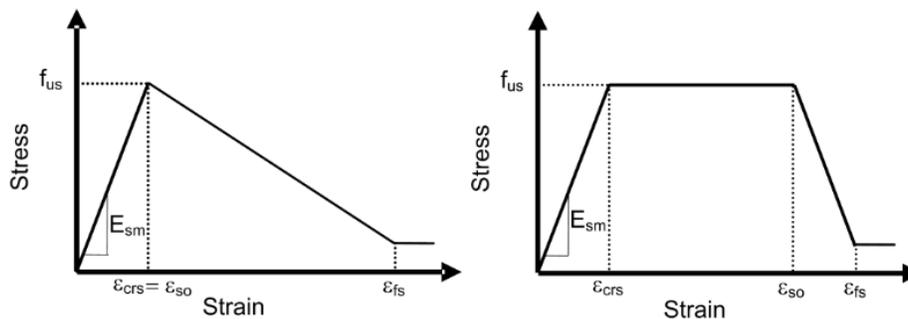


Figura 86. Modelo esfuerzo-deformación (stress-strain) bajo el método de puntales de compresión de un muro diafragma de mampostería sin rehabilitación (izq), y un muro diafragma reforzado con PRF (der.) (Binici et al., 2007).

Se propone un cálculo del área del puntal de compresión mediante la siguiente expresión:

$$A_{str} = w_s t_{st}$$

Donde

t_{st} Espesor equivalente del puntal de compresión.

$$t_{st} = t_p + t_{in}$$

w_s Ancho equivalente del puntal de compresión.

$$w_s = \frac{(1 - \alpha) \alpha h}{\cos \theta}$$

h Altura del puntal de compresión.

θ Ángulo de inclinación del puntal de compresión.

α Parámetro adimensional que representa la longitud de contacto entre el marco y el muro de mampostería.

$$\alpha = \sqrt{\frac{2(M_{pj} + 0.2M_{pc})}{h^2 t_{st} f_{mc}}}$$

M_{pj} Capacidad mínima de momento de la viga o columna.

M_{pc} Capacidad de momento de la columna.

f_{mc} Resistencia a la compresión de la mampostería.

$$f_{mc} = \frac{f_{in} t_{in} + f_m t_p}{t_{st}}$$

Se propusieron dos expresiones de resistencia basadas en los modos de falla que controlan la respuesta del muro: deslizamiento o aplastamiento de las esquinas. Se estableció que el valor de la resistencia máxima de los muros estaría regido por el valor mínimo obtenido a través de las siguientes expresiones:

Para falla por deslizamiento

$$V_{ss} = f_{mv} L t_{st}$$

Para falla por aplastamiento en las esquinas

$$V_{cc} = 250 t_{st} f_{mc}$$

Por lo que la resistencia máxima estará definida como

$$V_{us} = \min (V_{ss}, V_{cc})$$

$$f_{us} = \frac{V_{us}}{A_{st}}$$

L Longitud del muro de mampostería.

f_{mv} Resistencia a la compresión del mortero de pega.

Como se mencionó anteriormente, esta técnica ha sido mayormente estudiada en el reforzamiento de elementos de concreto, por lo que algunos documentos normativos ya consideran expresiones para estimar la contribución de los PRF a la resistencia a flexión y cortante en elementos de concreto, como es el caso del ACI440.2R-17. A continuación, se muestran las ecuaciones propuestas en este documento para el cálculo de la resistencia a cortante de elementos de concreto reforzados con polímeros reforzados con fibras.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f}$$

Donde

A_{fv} Área de la fibra (PRF) empleada para el refuerzo.

$$A_{fv} = 2nt_f w_f$$

f_{fe} Esfuerzo de tensión de la fibra.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

α Ángulo de aplicación de las bandas de PRF respecto a al eje longitudinal del muro.

d_{fv} Profundidad efectiva del refuerzo con PRF.

s_f Separación (a ejes) entre bandas de PRF.

t_f Espesor de las bandas de PRF.

n Relación modular de elasticidad entre las fibras y la mampostería (E_f/E_m).

w_f Espesor de las bandas de PRF.

Adicionalmente, en ACI440.7R-10, se proponen expresiones para el cálculo de la resistencia a fuerza cortante en muros de mampostería simple reforzados con FRP.

Para sistemas de PRF unidos externamente, en los que las bandas de PRF se unen a ranuras hechas en la superficie de la mampostería (*NSM FRP Systems*):

$$V_f = \rho_{fv} \frac{d_v}{s_f}$$

Para sistemas de FRP montados en contacto directo con la superficie de la mampostería:

$$V_f = \rho_{fv} w_f \frac{d_v}{s_f}$$

Donde

d_v Profundidad efectiva de la mampostería.

$$d_v = \min (H, L)$$

ρ_{fv} Fuerza por unidad de ancho de las bandas de FRP.

$$\rho_{fv} = \begin{cases} nt_f f_{fe} \leq 260 \frac{N}{mm} & \text{para sistemas en contacto directo con la mampostería} \\ A_{f,bar} f_{fe} \leq 44,500 \frac{N}{bar} & \text{para sistemas unidos mediante ranuras a la mampostería} \end{cases}$$

$A_{f,bar}$ Área de una barra rectangular o circular de PRF.

De forma adicional, en ACI 440.2R se proponen las siguientes expresiones para determinar la aportación de las bandas de PRF a la resistencia a fuerza cortante.

Si el refuerzo está constituido por bandas de PRF en dirección vertical y horizontal, con una separación s en dirección vertical:

$$V_{fR} = 0.5 \frac{A_f f_{fe} d}{s}$$

Donde

A_f Área de refuerzo.

$$A_f = n w_f t_f$$

n Número de bandas de PRF dispuestas en una cara del muro.

w_f Ancho de cada banda de PRF.

t_f Espesor de las bandas de PRF.

f_{fe} Resistencia de diseño efectiva a tensión de las bandas.

$$f_{fe} = k_m f_{fu} = k_m C_E f_{fu}^*$$

E_{fu} Módulo de elasticidad de diseño del PRF.

$$E_{fe} = k_m E_{fu} = k_m C_E E_{fu}^*$$

k_m Coeficiente de reducción que limita las deformaciones del PRF.

$$k_m = \frac{1}{60 \varepsilon_{fu}} \left[\frac{n E_{fu} t_f}{360,000} \right] \leq 0.90 \text{ para } n E_{fu} t_f \leq 180,000$$

$$k_m = \frac{1}{60 \varepsilon_{fu}} \left[\frac{90,000}{n E_{fu} t_f} \right] \leq 0.90 \text{ para } n E_{fu} t_f \geq 180,000$$

E_{fu} Módulo de elasticidad de diseño del PRF.

$$E_{fu} = C_E E_{fu}^*$$

f_{fu} Resistencia a tensión de diseño del PRF.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

- f_{fu}^* Resistencia a tensión del PRF según el fabricante.
- E_{fu}^* Módulo de elasticidad del PRF según el fabricante.
- C_E Factor de reducción por condiciones ambientales (tabla 8.1 ACI 440.2R, 2008).

Tabla 29. Factor de reducción por condiciones ambientales para varios sistemas de PRF y condiciones de exposición (ACI 440.2Rm 2008, tomada con base en SMIE (2015))

Condiciones de exposición	Tipo de fibra y resina	Factor de reducción ambiental, C_E
Exposición interior	Carbón / Epoxi	0.95
	Vidrio / Epoxi	0.75
	Aramid / Epoxi	0.85
Exposición exterior (puentes, muelles, estacionamientos abiertos)	Carbón / Epoxi	0.85
	Vidrio / Epoxi	0.65
	Aramid / Epoxi	0.75
Condiciones ambientales agresivas (plantas químicas, plantas de tratamiento de aguas residuales)	Carbón / Epoxi	0.85
	Vidrio / Epoxi	0.85
	Aramid / Epoxi	0.70

Si el refuerzo está únicamente conformado por bandas dispuestas en forma horizontal o forma vertical:

$$V_{fR} = k_v A_f f_{fu}$$

k_v Coeficiente que toma en consideración la dirección de las fibras con respecto a la dirección de la superficie de falla; se determina de forma experimental para cada tipo de fibra y mampostería. En caso de no lograr obtener datos experimentales, se pueden utilizar los valores mostrados en la tabla 30.

Tabla 30. Factor k_v para diferentes sistemas de FRP (SMIE,2015)

Tipo de PRF	Forma de colocación	Tipo de adhesivo	Piezas de concreto	Piezas de arcilla
Rejillas de poliurea reforzadas con fibra de vidrio (GGRP)	Una o ambas caras	Poliurea	0.2	0.5
Laminados de PRF	Una cara	Epoxi	0.2	0.6
	Ambas caras	Epoxi	0.3	0.8
Bandas de PRF adheridas a la superficie sin barras en las juntas	Una cara	Epoxi	0.3	0.7
	Ambas caras	Epoxi	0.5	0.8
	Una o ambas caras	Lechada modificada con látex	0.6	0.6
Bandas de PRF adheridas a la superficie con barras en las juntas	Una o ambas caras	Epoxi	0.4	0.6
Bandas de PRF adheridas a la superficie con barras en las juntas, ranura 3. 5 veces el diámetro de la barra	Una o ambas caras	Lechada modificada con látex	0.6	0.6

Las expresiones propuestas en ambas metodologías fueron empleadas para el cálculo de la resistencia a fuerza cortante en los especímenes utilizados para la elaboración de las curvas esqueléticas (modelos de comportamiento) que se encuentran en el apartado 5.4 de este documento.

5.3.6 Fuerza cortante resistida por los encamisados textiles

Como se mencionó en el Capítulo 3 de este documento, los encamisados textiles consisten en la implantación de compuestos de fibras de alta resistencia, por ejemplo, de carbono, vidrio, aramida, basalto, PBO (zylon), cáñamo, lino, entre otras. Estas fibras se encuentran tejidas ortogonalmente y son embebidas en matrices inorgánicas (comúnmente mortero).

En comparación con otros materiales empleados para la rehabilitación sísmica, como los PRF, las láminas o bandas de fibras se reemplazan por textiles y la resina epoxi se reemplaza por mortero. La eficiencia de esta técnica recae entre la trabazón mecánica que se genera entre la malla y el mortero.

La contribución de los sistemas de encamisados a base de morteros con fibras textiles a la capacidad a corte en el plano de un muro de mampostería puede obtenerse a través de diversos modelos existentes, como los propuestos en ACI549.4R-13, CNR-DT 215/2018 (*National Research Council of Italy*), Triantafyllou (2016) y Thomoglou (2020); este último comparó las tres anteriores. Todos los modelos se basan en la suposición de que la contribución total a la capacidad de corte (V_{Rd}) consiste en la suma de dos términos: la capacidad aportada por la mampostería, V_m , y la capacidad que aporta el refuerzo con fibras textiles, V_{TRM} .

Expresiones propuestas en ACI549.4R-13:

$$V_{TRM} = 2nA_f L f_{fv}$$

Donde

- n Número de capas colocadas de malla textil.
- A_f Área de refuerzo por unidad de ancho efectivo.
- L Longitud del muro.
- f_{fv} Esfuerzo de tensión del textil.

$$f_{fv} = E_f \varepsilon_{fv}$$

Expresión propuesta en CNR 2018:

$$V_{TRM} = 0.5 \cdot n_f \cdot t_{vf} \cdot \ell_f \cdot \alpha_t \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

Donde

- n_f Número total de capas de fibras textiles en las caras de los muros.
- t_{vf} Espesor de una capa de recubrimiento con fibra textil.
- ℓ_f Altura del muro (longitud menor que cubrirá la fibra textil).
- α_t Coeficiente que toma en cuenta la reducción de la resistencia a tensión de las fibras cuando se someten a esfuerzos cortantes. Puede asumirse como 0.8.

ε_{fd} Esfuerzo último de tensión del textil.
 E_f Módulo de elasticidad de las fibras.

Expresión propuesta por Triantafillou (2016):

$$V_{TRM} = 0.9nlt_f f_{td}$$

Donde

n Número de caras encamisadas.
 l Longitud del muro.
 t_f Espesor de una capa de recubrimiento con fibra textil.
 f_{td} Esfuerzo de tensión del textil.

Expresión propuesta por Thomoglou (2020):

$$V_{TRM} = 2nA_f L_f E_f \varepsilon_{ffd} + A_{mortar} E_{mortar} \varepsilon_{tm}$$

Donde

n Número de capas de fibra textil aplicadas.
 A_f Área de la fibra textil por unidad de ancho.
 L_f Longitud del muro de mampostería.
 E_f Módulo de elasticidad de la fibra textil (agrietada).
 ε_{ffd} Esfuerzo último de deformación de la fibra textil.
 A_{mortar} Área por unidad de ancho del recubrimiento de mortero.
 E_{mortar} Módulo de elasticidad del mortero.
 ε_{tm} Esfuerzo último de deformación del mortero, tomado como 0.057% cuando se usa fibra textil de vidrio, 0.112% para fibra textil de carbono, 0.038% para una fibra textil con aleación de vidrio con carbono (De Santis et al., 2018).

La literatura indica que las expresiones propuestas anteriormente han mostrado resultados satisfactorios en términos de predecir la resistencia a fuerza cortante de muros reforzados mediante esta técnica. Para el caso del modelo de Thomoglou (2020), se obtuvieron resultados con una menor distorsión respecto a los resultados obtenidos en 104 especímenes rehabilitados mediante esta técnica, lo que sugiere que considerar la aportación del mortero al encamisado da resultados más precisos.

En este trabajo no se presentan modelos de comportamiento asociados a esta técnica, dado que en la base de datos no se incluyeron suficientes especímenes para poder aportar resultados precisos.

5.3.7 Fuerza cortante resistida por los encamisados con morteros reforzados con fibras

Flores y Carrillo (2012) propusieron una expresión con el objetivo de determinar la aportación a la resistencia dada por un encamisado con mortero reforzado con fibras, dado que únicamente existía literatura que estudiaba la resistencia a tensión de elementos de concreto rehabilitados con concreto reforzado con fibras. La expresión propuesta por Flores y Carillo es:

$$V_{mor} = \sqrt{f_b} t_{mor} L$$

Donde

- f_b Resistencia media a compresión del mortero.
- t_{mor} Espesor de la capa de mortero.
- L Longitud del muro.

Al igual que en la técnica anterior, en este documento no se presentan modelos de comportamiento para esta técnica, dado que la información de los especímenes existentes es incompatible (distinta configuración estructural y distintos esquemas de rehabilitación con fibras), lo que no permite buscar tendencias de comportamiento.

5.4 CURVAS DE COMPORTAMIENTO

De acuerdo con Riahi (2009), el diseño basado en desempeño se basa en la construcción de modelos no lineales para la respuesta fuerza - deformación de un sistema estructural con la finalidad de controlar el daño generado por cargas accidentales (en este caso, carga por lateral, generada por sismo). Estos modelos tienen como objetivo predecir o simular el comportamiento, o bien, desempeño de las estructuras hasta su falla.

A través de este documento se propone la formulación de modelos calibrados mediante los valores obtenidos experimentalmente (registrados en la base de datos explicada en el capítulo anterior), de manera que los modelos propuestos puedan ser incluidos en la normatividad futura, con la finalidad de aproximar la respuesta real de muros de mampostería rehabilitados.

Las curvas de comportamiento (*backbone curves*, en inglés) están conformadas, generalmente, por tres puntos: el punto donde se presenta el primer agrietamiento en la mampostería (V_{cr}), el punto donde se da la resistencia máxima a cortante ($V_{m\acute{a}x}$), y el punto de resistencia última, o de falla (V_u). En sí, la forma de cada curva de comportamiento depende de diversos factores, como el tipo de configuración estructural que se tenga, el modo de falla predominante del muro o la estructura, la distribución del agrietamiento de la mampostería y el protocolo de carga aplicado, entre otros factores. En la figura 87 se observa la forma que toma una curva de comportamiento para el caso de mampostería confinada.

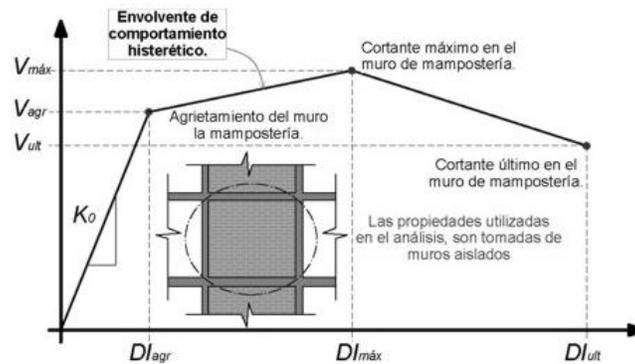


Figura 87. Curva de comportamiento para mampostería confinada (Flores y Alcocer, 1995)

Para la conformación de los modelos que a continuación se presentan, se utilizaron las envolventes de respuesta provenientes de cada uno de los especímenes incluidos en la base de datos mostrada en el Apéndice A. Posteriormente, se agruparon todas aquellas curvas que mostraran una misma tendencia y se definieron los parámetros característicos de dicho conjunto de curvas (explicados en la sección 5.2 de este documento). Es importante mencionar que para los casos en que no se lograron obtener los datos (de forma que pudiesen graficarse) de las curvas de histéresis o de comportamiento, se empleó la herramienta GraphGrabber v2.0.2. con la cual, a partir de las imágenes de las curvas de histéresis en cada reporte experimental, se realizó un trazado a escala, para obtener los datos de cada espécimen.

Una vez que se identificaron tendencias y se establecieron los parámetros de cada modelo, se realizó una normalización de datos, con la finalidad de ajustar los valores de resistencia obtenidos en cada espécimen. La normalización se llevó a cabo dividiendo cada valor de resistencia obtenido en las envolventes de respuesta por la resistencia a fuerza cortante calculada con las expresiones de la sección 5.3 de este documento.

Debido a que no se contó con una base de datos lo suficientemente robusta como para realizar modelos estadísticos refinados (regresiones lineales múltiples, por ejemplo), se optó por obtener una curva promedio para cada conjunto de curvas. La curva promedio de cada conjunto de datos representa cada uno de los modelos de comportamiento (curvas esqueléticas) propuestos en este trabajo. En cada curva promedio se marcan tres puntos: inicio del agrietamiento de la mampostería (δ_{cr} , V_{cr}), máxima resistencia a fuerza cortante (δ_{max} , V_{max}) y resistencia última o punto de falla (δ_{ult} , V_{ult}). Es importante mencionar que no fue posible elaborar modelos para las técnicas de encamisado mediante bandas de acero, encamisados textiles y morteros reforzados con fibras, dado que no existieron suficientes especímenes con características compatibles para poder elaborar modelos basados en los parámetros de análisis establecidos.

Con la finalidad de observar el efecto de cada una de las técnicas de rehabilitación en el comportamiento de cada modelo que considere una configuración a base de mampostería confinada, se comparó cada una de las curvas promedio obtenidas con una curva esquelética obtenida a través de las expresiones propuestas por Riahi (2009), las cuales se muestran a continuación.

Para el inicio del agrietamiento de la mampostería:

$$V_{cr} = 0.424v_m + 0.374\sigma_v \leq v_m$$

$$\delta_{cr} = \gamma \frac{V_{cr}}{\sqrt{f_m}}, \quad \gamma = \begin{pmatrix} 1.13 - \text{piezas de arcilla} \\ 0.72 - \text{piezas de concreto} \end{pmatrix}$$

Para el punto de resistencia máxima:

$$V_{max} = 0.21v_m + 0.363\sigma_v + 0.0141 \sqrt{\rho_{vc} f_{yvc} f'_c} \geq V_{cr}$$

$$\delta_{max} = 0.65\delta_{ult}$$

Para el punto de resistencia última o de falla:

$$V_{ult} = 0.8 V_{max}$$

$$\delta_{ult} = \mu \gamma \frac{V_{max}}{\sqrt{f_m}}$$

$$\mu = \frac{0.5}{V_{m\acute{a}x}^2} + 1.3 \leq 6$$

En los siguientes apartados de este capítulo se presentan los modelos de comportamiento obtenidos para cada técnica de rehabilitación. Cabe mencionar que algunos modelos se proponen únicamente de forma indicativa, dado que se considera que no representan de forma precisa el comportamiento de las técnicas de rehabilitación. Al final de cada técnica de rehabilitación se presenta una tabla resumen con los valores referentes a los puntos de agrietamiento, resistencia máxima y resistencia última de cada modelo presentado.

5.4.1 Modelos de comportamiento para encamisado mediante malla de alambre soldado

5.4.1.1 Modelos para modo de falla controlado por cortante

En la figura 88, se muestra el modelo de comportamiento correspondiente a un modo de falla controlado por cortante para muros de mampostería confinada, hechos con piezas de arcilla huecos (para este caso, los especímenes se construyeron con tabique de arcilla perforados horizontalmente o también conocidos como “pandereta”) con una relación de aspecto $H/L \leq 1$, y con presencia de daño previo. Se observa que, respecto a la curva obtenida con el modelo de Riahi (2009), existe una contribución considerable tanto a la resistencia como a la capacidad de deformación. Incluso, para los valores calculados a través de las expresiones de Riahi (2009) se obtuvieron ante el mismo valor de carga y distinto nivel de deformación, el agrietamiento de la mampostería y la resistencia máxima.

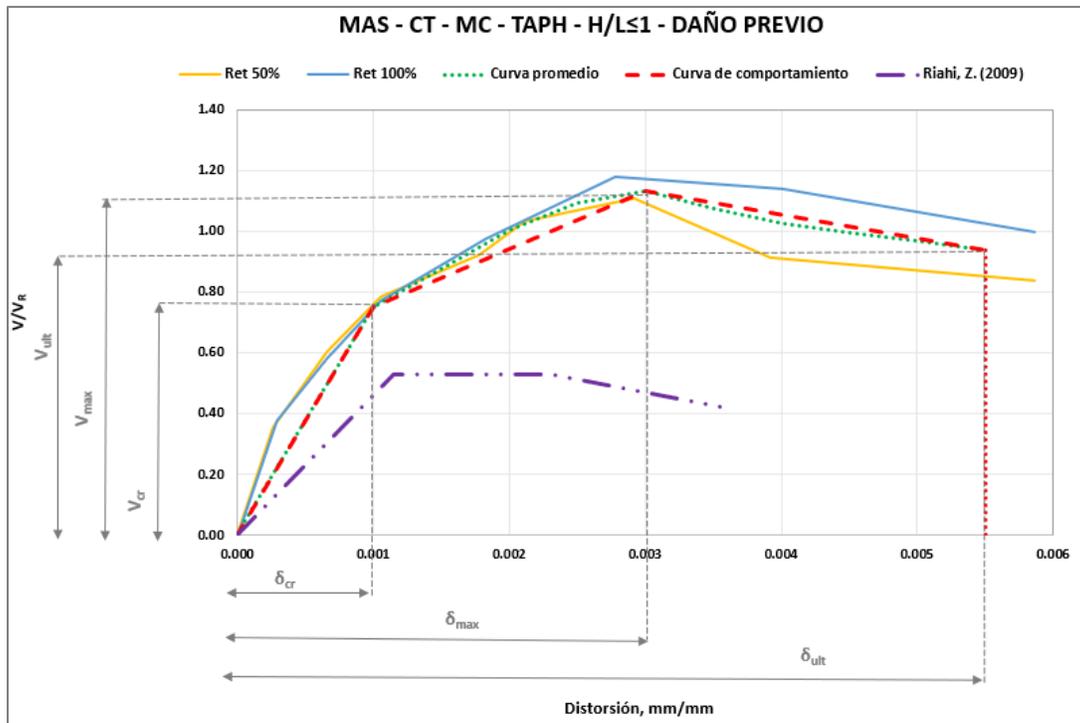


Figura 88. Curva esquelética para muros de mampostería confinada con un modo de falla controlado por cortante, construido con piezas huecas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno y presencia de daño previo.

5.4.1.2 Modelos para modo de falla controlado por tensión diagonal

Para un modo de falla controlado por tensión diagonal se obtuvieron tres distintos modelos, los cuales se presentan en las figuras 89, 90 y 91.

La figura 89 presenta un modelo aplicable a muros de mampostería confinada, construidos con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto $H/L \leq 1$ y la presencia de daño previo. Se observa que, para esta figura, nuevamente el modelo rehabilitado supera tanto en resistencia como en capacidad de deformación al modelo de Riahi (2009).

Por otra parte, en la figura 90 se incluyen los mismos parámetros que en la figura 89, a diferencia de la presencia de daño previo. Para la figura 91, se muestra un modelo elaborado para mampostería confinada, de piezas huecas de arcilla relación de aspecto $H/L \leq 1$ y sin daño previo. Para este último modelo también se observa una notable diferencia con respecto a lo calculado con las expresiones de Riahi (2009), ya que, tanto para la capacidad de deformación como para la resistencia a fuerza cortante existió un incremento considerable.

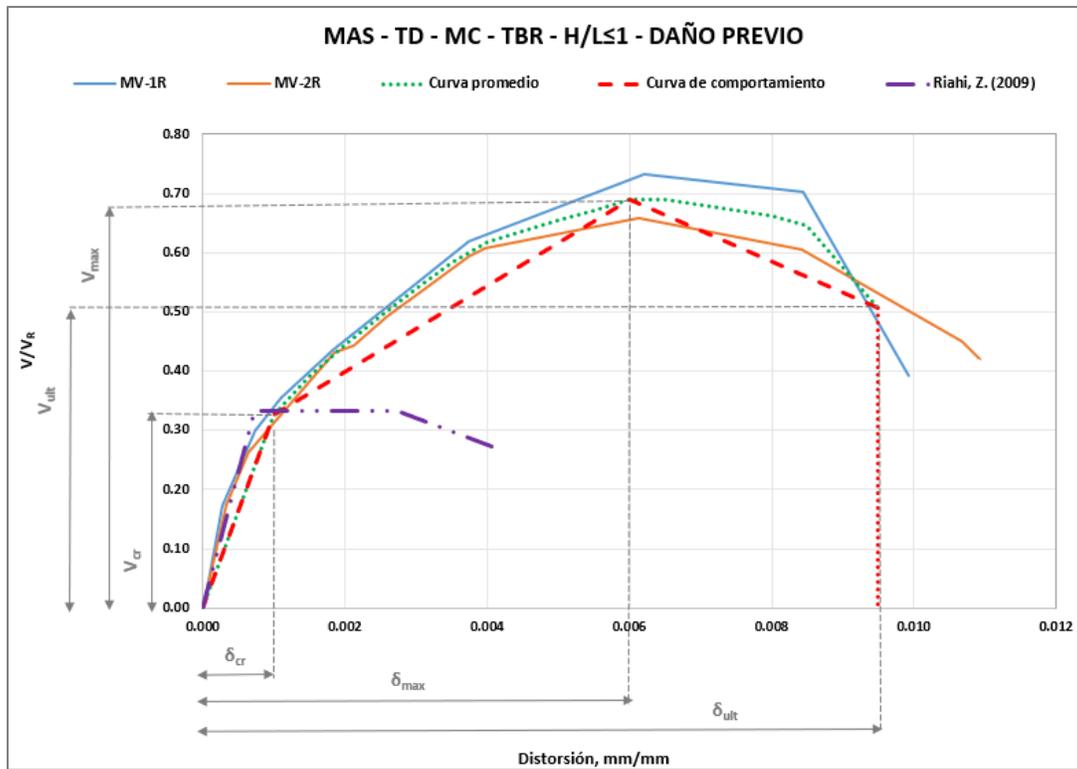


Figura 89. Curva esquelética para muros de mampostería confinada con un modo de falla controlado por tensión diagonal, construido con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno y presencia de daño previo.

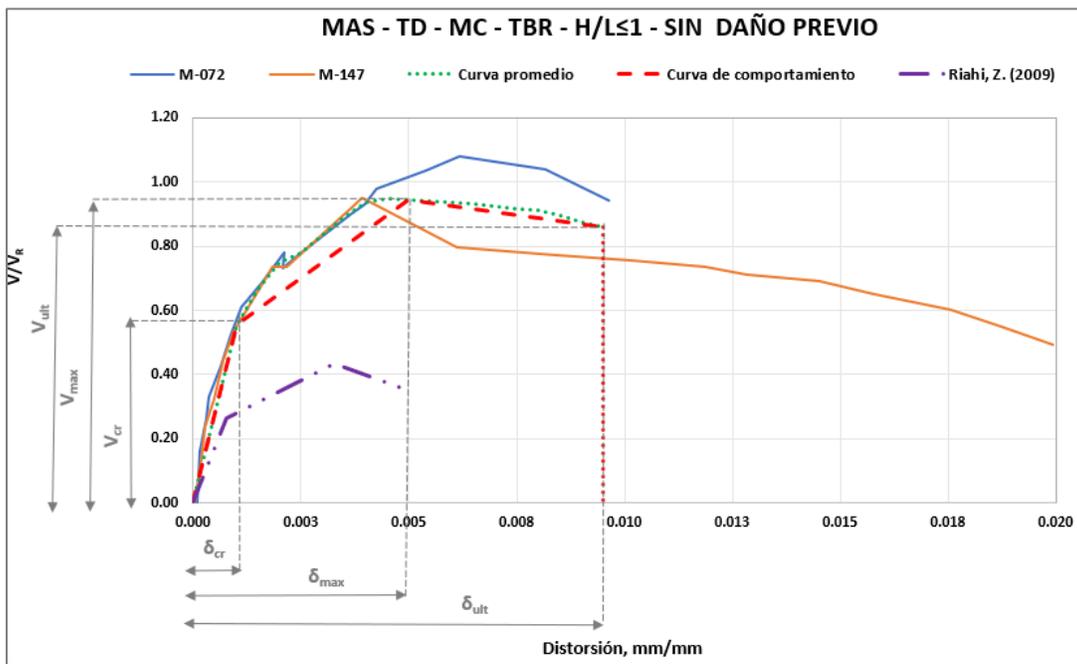


Figura 90. Curva esquelética para muros de mampostería confinada con un modo de falla controlado por tensión diagonal, construido con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno y sin daño previo.

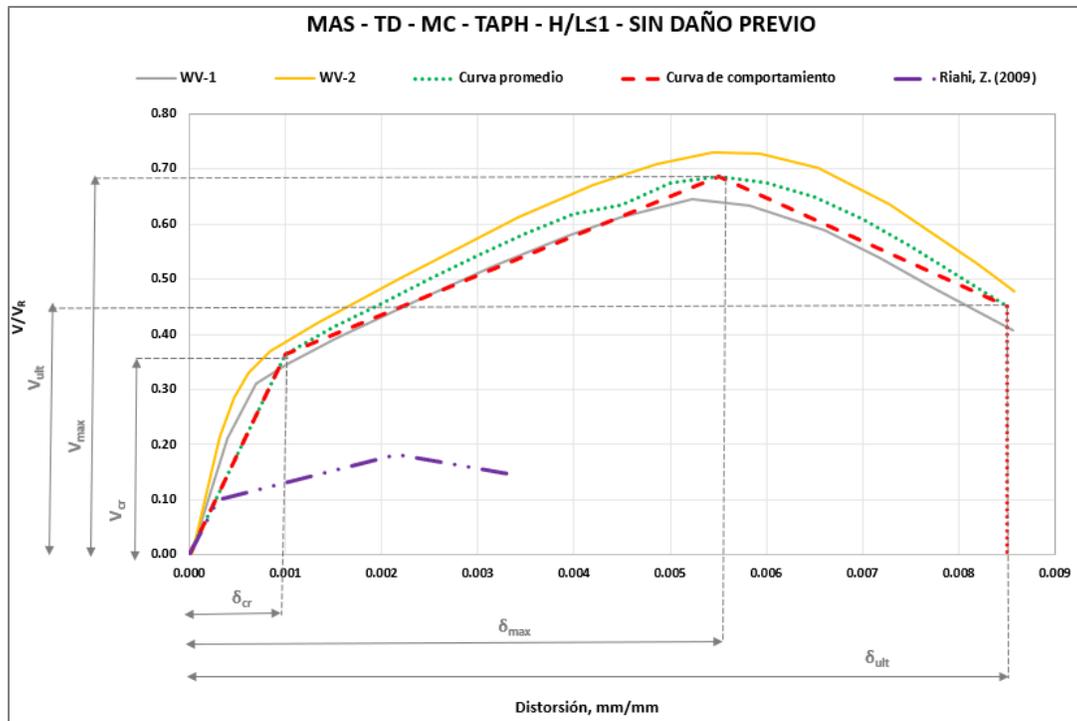


Figura 91. Curva esquelética para muros de mampostería confinada con un modo de falla controlado por tensión diagonal, construido con piezas huecas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno y sin daño previo.

5.4.1.3 Modelos para modo de falla controlado por flexión

En la literatura se encontró un caso particular de cuatro especímenes pertenecientes al mismo programa experimental (Churilov y Dumova, 2013), los cuatro especímenes construidos bajo un esquema de mampostería simple con dos hiladas de piezas presentaron un modo de falla controlado por flexión. Este caso se considera particular, puesto que los muros presentaron una falla con una combinación por cabeceo dada por un desprendimiento en su base (movimiento como cuerpo rígido) y por el desprendimiento del encamisado.

En las figuras 92 y 93 se muestran los modelos referidos a este modo de falla. Estos modelos esqueléticos corresponden a una configuración de mampostería simple de piezas macizas de arcilla, daño previo a la rehabilitación y una única diferencia que consiste en la relación de aspecto; la figura 92 corresponde a muros con una relación de aspecto $H/L \leq 1$, mientras que la figura 93 se considera una relación de aspecto $H/L > 1$. Es importante resaltar que para estos especímenes ya no se hizo una comparación respecto a las expresiones dadas por Riahi (2009), dado que estas son aplicables únicamente a sistemas de mampostería confinada.

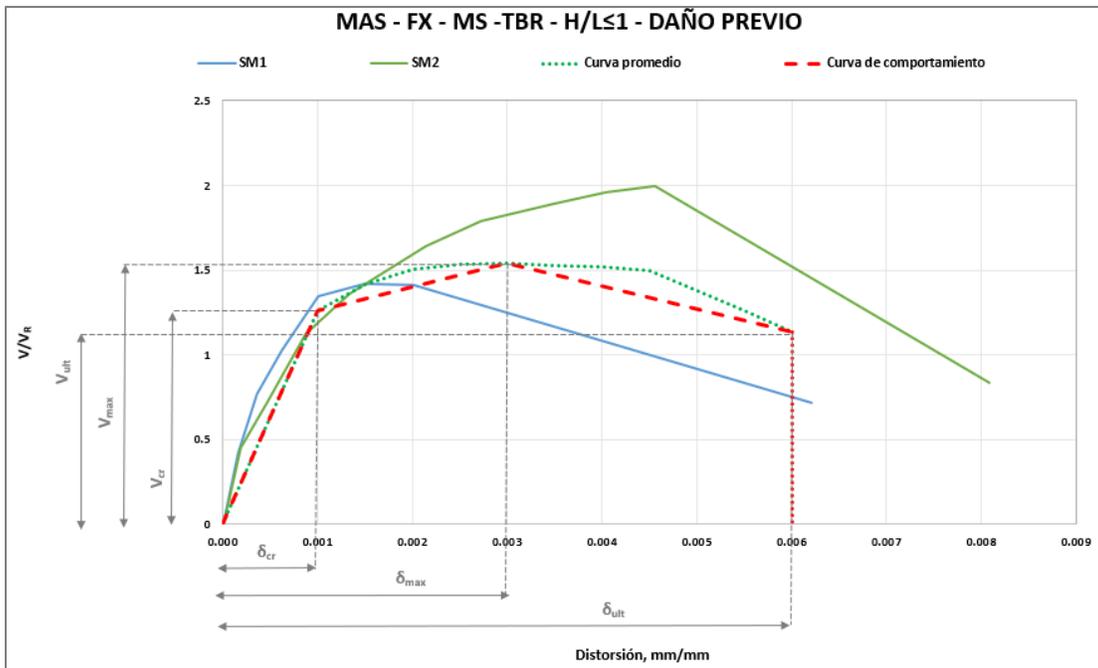


Figura 92. Curva esquelética para muros de mampostería simple con un modo de falla controlado por flexión, construido con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno y con daño previo.

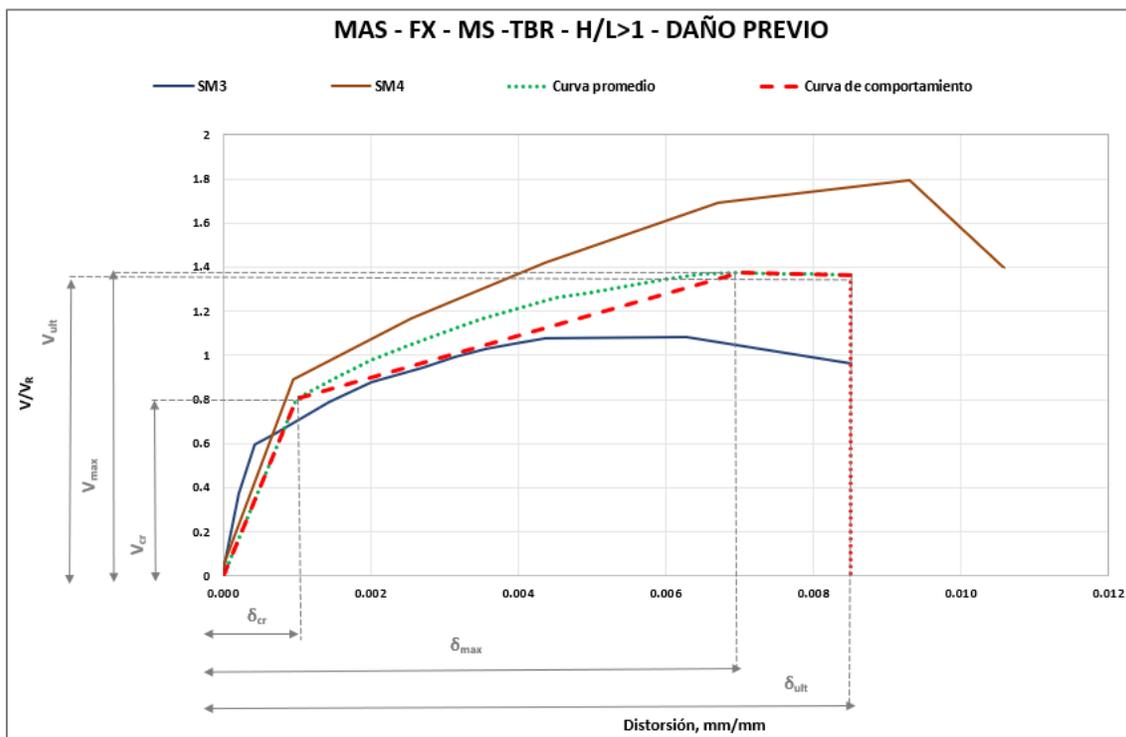


Figura 93. Curva esquelética para muros de mampostería simple con un modo de falla controlado por flexión, construido con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto mayor que uno y con daño previo.

5.4.1.4 Modelos para modo de falla controlado por aplastamiento

Para esta técnica se obtuvo únicamente un modelo, que considera una configuración de muro diafragma (en un marco de concreto) construido con piezas huecas de concreto y que posee una relación de aspecto $H/L \leq 1$, sin presencia de daño previo. Este modelo se presenta en la figura 94. Al igual que en los especímenes anteriores, se muestra, que el último tramo recto de la curva de comportamiento posee un cambio en el tipo de línea (línea de puntos), esto debido a que los especímenes no fueron sometidos a grandes deformaciones, por lo que se desconoce la continuación de las envolventes de respuesta de los especímenes.

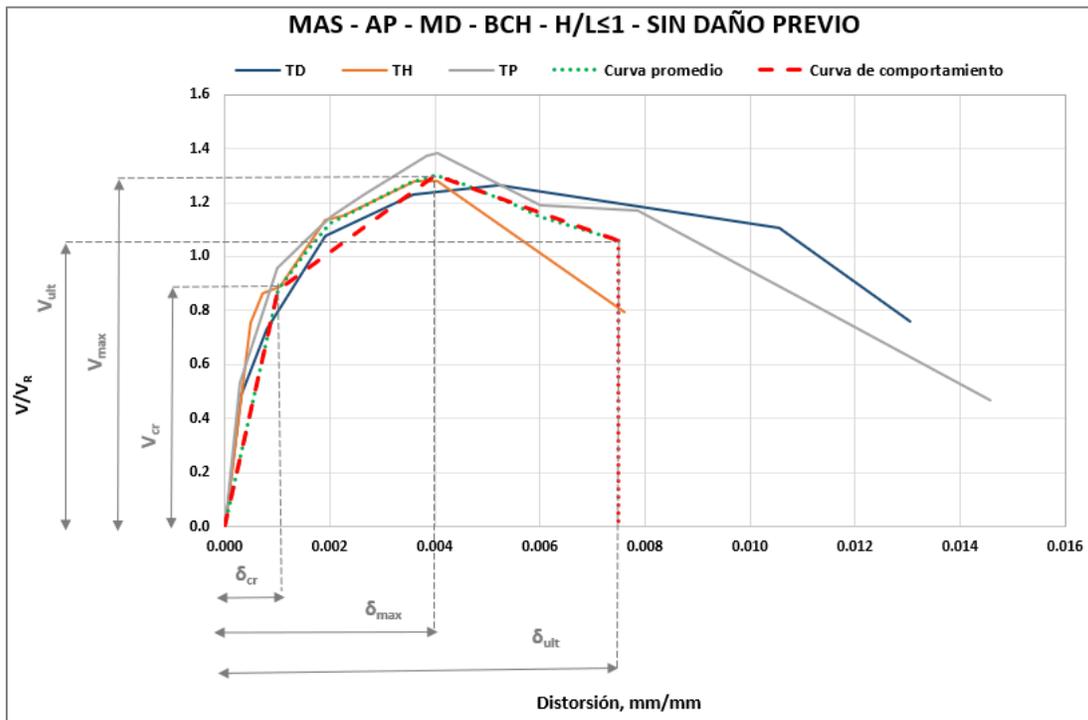


Figura 94. Curva esquelética para muros diafragma de mampostería con un modo de falla controlado por aplastamiento, construido con piezas huecas de concreto, con una relación de aspecto menor o igual que uno y sin daño previo.

5.4.1.5 Modelos para modo de falla controlado por deslizamiento

El primer modelo elaborado para este modo de falla es recomendable para muros de mampostería confinada, construidos con piezas macizas de arcilla, con una relación de aspecto $H/L \leq 1$ y con algún nivel de daño previo, el cual se presenta en la figura 95. Respecto a este modelo, es importante mencionar que se considera que el espécimen M6R considerado para la elaboración de este modelo no muestra de forma clara el comportamiento por deslizamiento, sin embargo, para este estudio se tomó el modo de falla que fue reportado por el autor, sin hacer una valoración crítica de su comportamiento real.

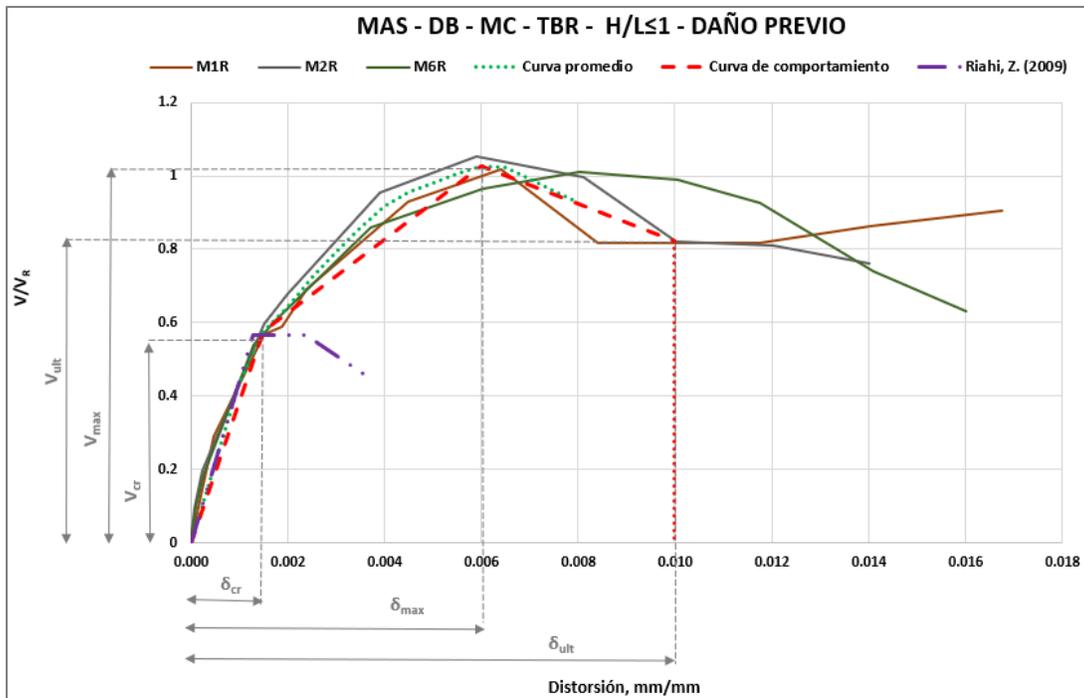


Figura 95. Curva esquelética para muros de mampostería confinada con un modo de falla controlado por deslizamiento, construido con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno y con daño previo.

Se proponen también para este modo de falla tres modelos más, los cuales se muestran en las figuras 96, 97, y 98. La figura 96 muestra el modelo sugerido para muros de mampostería confinada de piezas macizas, con relación de aspecto $H/L \leq 1$ y sin daño previo, en este modelo logró compararse la respuesta con respecto al modelo obtenido con las expresiones de Riahi (2009), de esta comparación se observa claramente el incremento tanto en resistencia como en capacidad de deformación del modelo que considera la rehabilitación. Por otra parte, se presenta en las figuras 97 y 98 dos modelos aplicables a muros construidos con piezas de concreto; por su parte el modelo de la figura 97 considera piezas huecas y un sistema de mampostería reforzada interiormente, así como la ausencia de daño previo. Para este modelo se aprecia una capacidad de deformación menor, respecto a otros modelos sin embargo se considera que esto es debido al tipo de configuración estructural de los especímenes.

Respecto al modelo de la figura 98, éste considera piezas macizas, un sistema de mampostería confinada, una relación de aspecto $H/L \leq 1$ y daño previo. Uno de los especímenes causó especial interés (MRA-2R) debido a la forma que adopta su envolvente de respuesta ya que se tienen dudas sobre el modo de falla real. El autor indica que la falla fue por deslizamiento en dos especímenes (MRA-1R y MRA-2R). Este modelo también fue comparado con Riahi (2009) y al igual que en los demás modelos, el incremento de resistencia y capacidad de deformación es evidente.

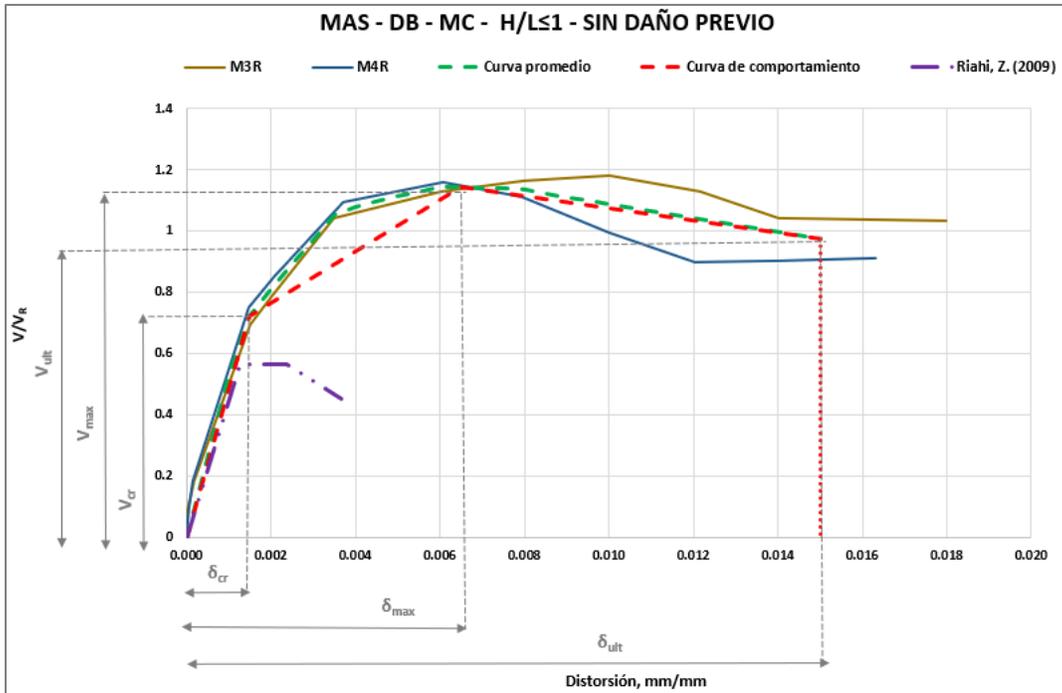


Figura 96. Curva esquelética para muros de mampostería confinada con un modo de falla controlado por deslizamiento, construido con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno y sin daño previo.

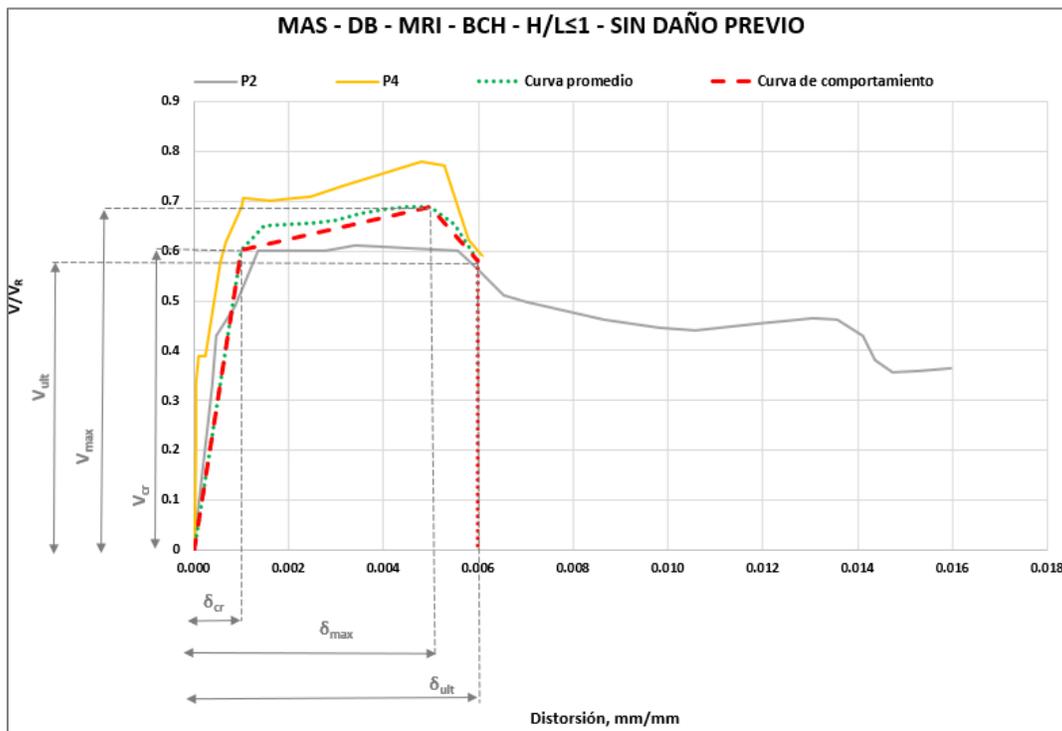


Figura 97. Curva esquelética para muros de mampostería reforzada interiormente con un modo de falla controlado por deslizamiento, construido con piezas huecas de concreto, una relación de aspecto menor o igual que uno y sin daño previo.

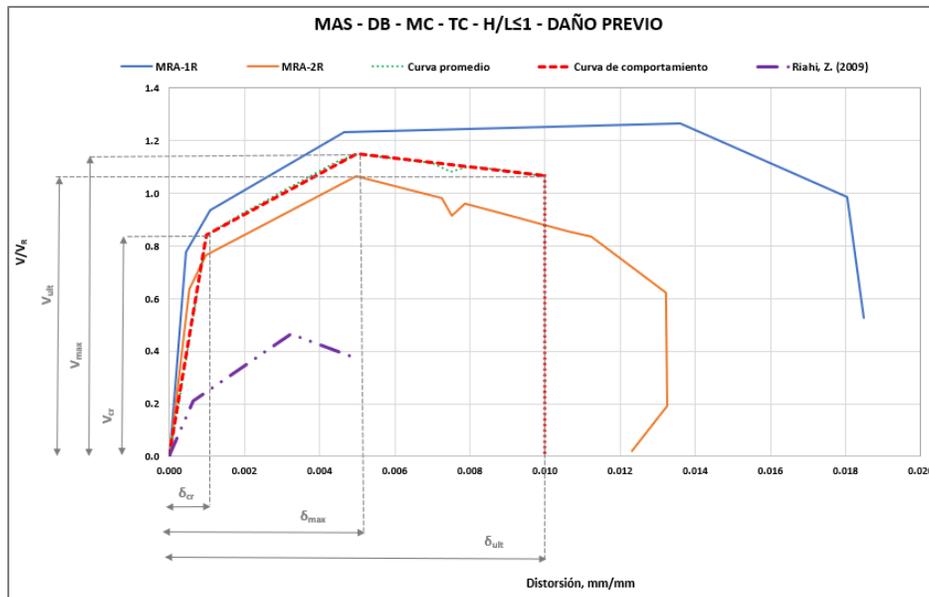


Figura 98. Curva esquelética para muros de mampostería confinada con un modo de falla controlado por deslizamiento, construido con piezas macizas de concreto, una relación de aspecto menor o igual que uno y con daño previo.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los valores obtenidos para cada modelo, estos valores se sugieren para su uso considerando un enfoque de diseño por desempeño.

Tabla 31. Parámetros de diseño para el encamisado mediante malla de alambre soldado obtenidos de los modelos de comportamiento

ENCAMISADO CON MALLA DE ALAMBRE SOLDADO RECUBIERTA CON MORTERO/CONCRETO									
CORTANTE									
Modalidad	Tipo de pieza	H/L	Daño previo	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Confinada	Hueca (arcilla)	≤ 1	Sí	0.001	0.003	0.006	0.75	1.13	0.94
TENSIÓN DIAGONAL									
Modalidad	Tipo de pieza	H/L	Daño previo	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Confinada	Maciza (arcilla)	≤ 1	Sí	0.001	0.006	0.010	0.33	0.69	0.51
		≤ 1	No	0.001	0.005	0.010	0.56	0.95	0.86
	Hueca (arcilla)	≤ 1	No	0.001	0.006	0.009	0.36	0.68	0.45
FLEXIÓN									
Modalidad	Tipo de pieza	H/L	Daño previo	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Simple	Maciza (arcilla)	≤ 1	Sí	0.001	0.003	0.006	1.26	1.54	1.14
		> 1	Sí	0.001	0.007	0.009	0.80	1.37	1.36
APLASTAMIENTO									
Modalidad	Tipo de pieza	H/L	Daño previo	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Diafragma	Maciza (concreto)	≤ 1	No	0.001	0.004	0.008	0.88	1.30	1.06
DESPLAZAMIENTO									
Modalidad	Tipo de pieza	H/L	Daño previo	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Confinada	Maciza (arcilla)	≤ 1	No	0.002	0.007	0.015	0.72	1.14	0.97
		≤ 1	Sí	0.002	0.006	0.01	0.58	1.03	0.82
	Maciza (concreto)	≤ 1	Sí	0.001	0.005	0.010	0.84	1.15	1.07
M. Reforzada interiormente	Maciza (concreto)	≤ 1	No	0.001	0.005	0.006	0.60	0.69	0.58

5.4.2 Modelos de comportamiento para encamisado mediante placas de acero

En esta técnica no se obtuvieron modelos de comportamiento para modos de falla como cortante o tensión diagonal, dado que los únicos datos de falla por corte fueron registrados en los elementos de concreto que integran el marco, no en la mampostería. A continuación, se presentan los modelos obtenidos para los modos de falla por flexión, aplastamiento y deslizamiento.

5.4.2.1 Modelos para modo de falla controlado por flexión

Para flexión se obtuvieron dos modelos, los cuales se muestran en las figuras 99 y 100, ambos modelos se ajustan a muros diafragma construidos con piezas de arcilla huecas, que poseen una relación de aspecto $H/L \leq 1$ y sin daño previo; la diferente entre ambos modelos consiste en que para el modelo de la figura 99, se considera el encamisado mediante placas de acero de 1 mm de espesor, con un esfuerzo especificado de fluencia de $3,500 \text{ kg/cm}^2$, mientras que para el modelo de la figura 100, aplican placas con espesor de 1.5 mm y un esfuerzo especificado de fluencia de $2,040 \text{ kg/cm}^2$. Se puede observar que a pesar de que el modelo de la figura 100 considera una placa de mayor espesor respecto al modelo de la figura 99, posee menos capacidad de deformación y resistencia, esto posiblemente debido al esfuerzo especificado de fluencia de la placa, que resulta menor que el del modelo de la figura 99.

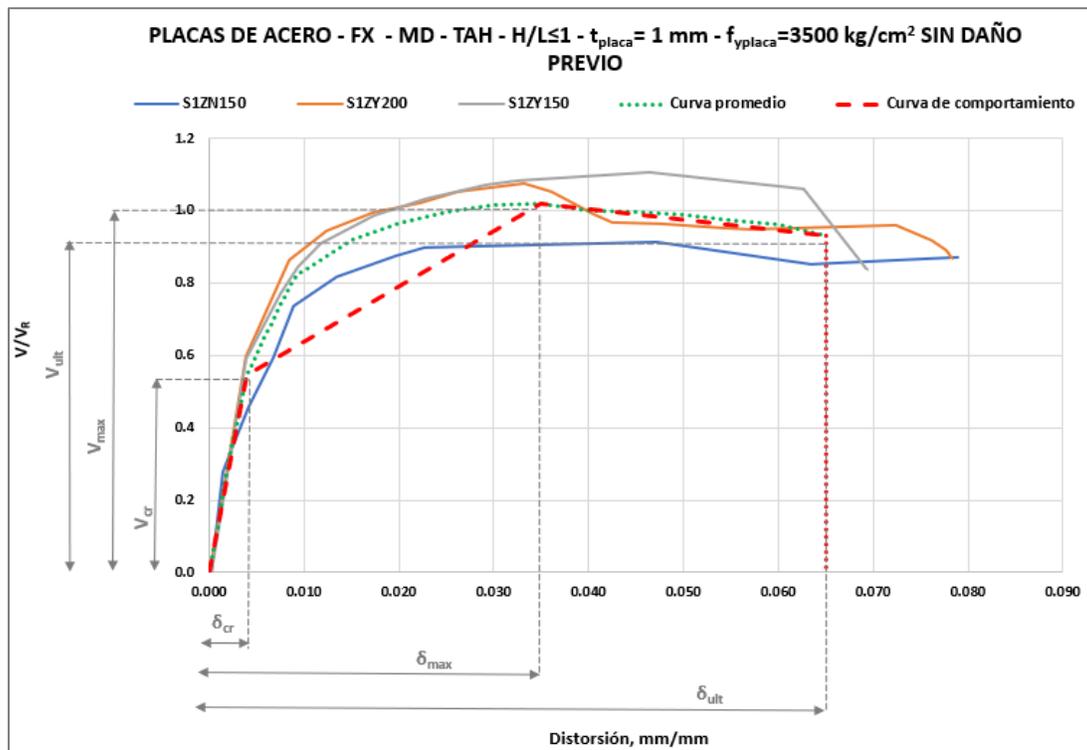


Figura 99. Curva esquelética para muros diafragma con un modo de falla controlado por flexión, construido con piezas huecas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno, una placa con $t_{placa}=1 \text{ mm}$, $f_y=3,500 \text{ kg/cm}^2$ y sin daño previo.

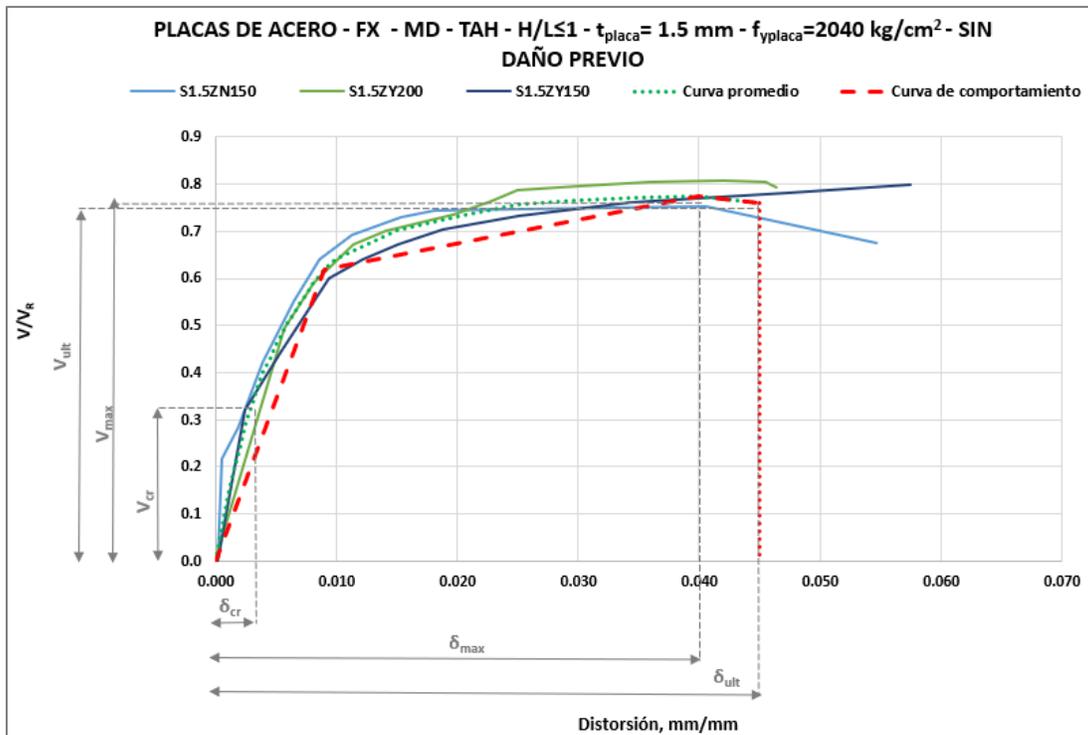


Figura 100. Curva esquelética para muros diafragma con un modo de falla controlado por flexión, construido con piezas huecas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno, una placa con $t_{placa} = 1.5 \text{ mm}$, $f_y = 2,040 \text{ kg/cm}^2$ y sin daño previo.

5.4.2.2 Modelos para modo de falla controlado por aplastamiento

Con relación a un modo de falla controlado por aplastamiento de la mampostería, se obtuvieron tres distintos modelos, los cuales tienen en común los siguientes parámetros: configuración a base de muros diafragma en marcos de acero, piezas huecas de arcilla, una relación de aspecto $H/L \leq 1$, una placa de acero con esfuerzo especificado de fluencia $f_y = 3,500 \text{ kg/cm}^2$ y ausencia de daño previo.

El primer modelo, mostrado en la figura 101, considera una placa con espesor $t_{placa} = 1.0 \text{ mm}$, se puede observar que para este modelo la curva de comportamiento adoptó una forma bilineal, además de una capacidad de deformación alta. Posteriormente, en la figura 102, se presenta un modelo para placas de espesor $t_{placa} = 0.5 \text{ mm}$ de espesor, sin embargo, debido a que las variaciones en la distribución de datos de las curvas son grandes se optó por establecer este modelo como indicativo, donde la curva roja marca únicamente la tendencia del comportamiento. Adicionalmente, se presenta un último modelo para aplastamiento, el cual es referido a placas de acero con un espesor $t_{placa} = 0.3 \text{ mm}$, de igual forma la curva de comportamiento adoptó una forma bilineal e incluso la resistencia y capacidad de deformación es mayor que en placas de 1 mm de espesor, este modelo se presenta en la figura 103. Se supuso que la causa de ese comportamiento se encuentra relacionada con la distribución de los conectores que unieron la placa a la mampostería, en el modelo de la figura 101 la separación y distribución de conectores fue menor respecto a la dada en los especímenes del modelo de la figura 102.

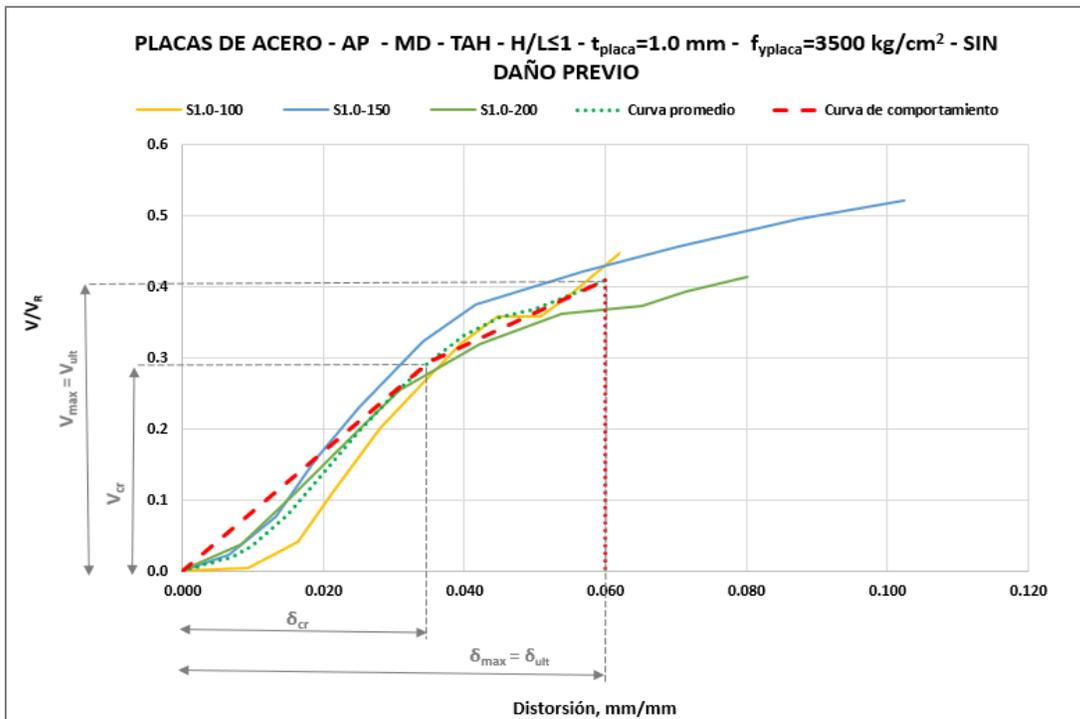


Figura 101. Curva esquelética para muros diafragma con un modo de falla controlado por aplastamiento, construido con piezas huecas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno, una placa con $t_{placa} = 1 \text{ mm}$, $f_y = 3,500 \text{ kg/cm}^2$ y sin daño previo.

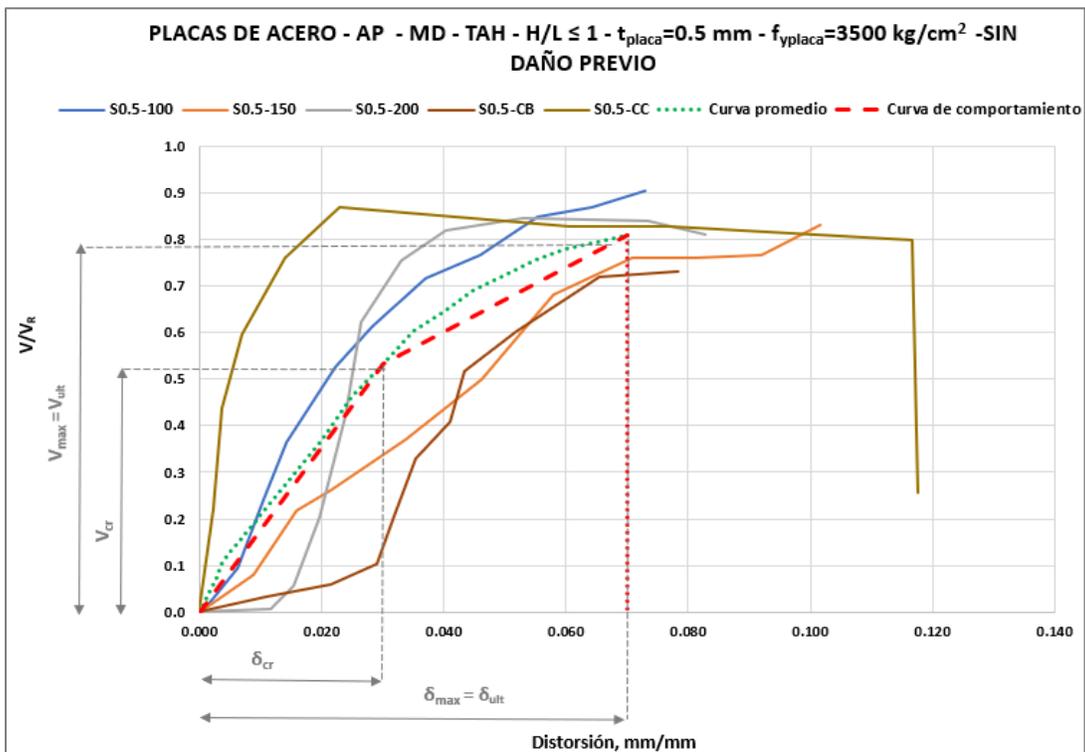


Figura 102. Curva esquelética para muros diafragma con un modo de falla controlado por aplastamiento, construido con piezas huecas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno, una placa con $t_{placa} = 0.5 \text{ mm}$, $f_y = 3,500 \text{ kg/cm}^2$ y sin daño previo.

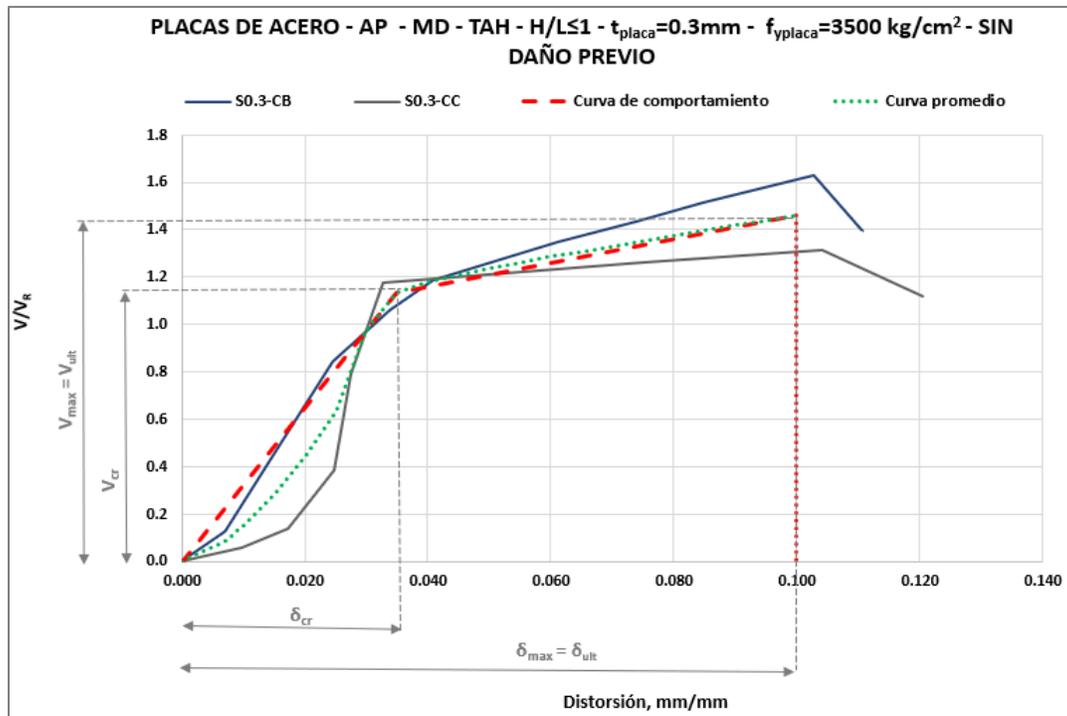


Figura 103. Curva esquelética para muros diafragma con un modo de falla controlado por aplastamiento, construido con piezas huecas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno, una placa con $t_{placa}=0.3\text{ mm}$, $f_y=3,500\text{ kg/cm}^2$ y sin daño previo.

5.4.2.3 Modelos para modo de falla controlado por deslizamiento

En la figura 104 se muestra el modelo obtenido para deslizamiento, que considera las siguientes variables: configuración de muros diafragma en marcos de acero construidos con piezas de arcilla huecas, una relación de aspecto $H/L \leq 1$, encamisados con una placa de acero con un esfuerzo especificado de fluencia $f_y= 3,500\text{ kg/cm}^2$ y sin daño previo. A través de este modelo se buscó conocer la posible influencia en el comportamiento dada por la presencia de placas de acero en forma de letra L colocadas en las esquinas de un muro. Por una parte, la curva de comportamiento propuesta muestra una capacidad de deformación alta, comparada con las obtenidas para otras técnicas, no obstante, dada la variación de datos que existe entre los dos especímenes estudiados para este modelo. Por lo anterior, se sugiere tomar esta curva de comportamiento como indicativa.

En la tabla 32 se agrupan los valores obtenidos a través de cada uno de los modelos propuestos para esta técnica. En color amarillo se resaltan los valores de los modelos establecidos como indicativos.

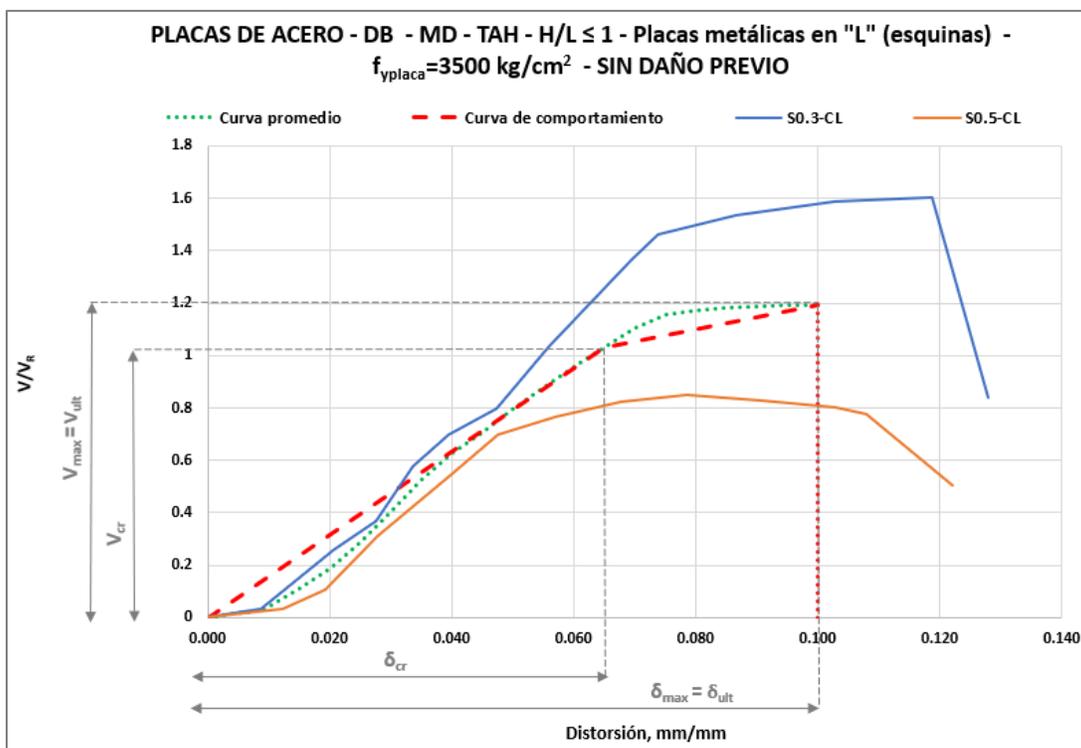


Figura 104. Curva esquelética para muros diafragma con un modo de falla controlado por deslizamiento, construido con piezas huecas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual a uno, placas metálicas en "L" a manera de anclaje, $f_y=3500 \text{ kg/cm}^2$ y sin daño previo.

Tabla 32. Parámetros de diseño para el encamisado mediante placas de acero obtenidos de los modelos de comportamiento

ENCAMISADO CON PLACAS DE ACERO											
FLEXIÓN											
Modalidad	Tipo de pieza	H/L	Daño previo	t_{placa} (mm)	$f_{y-placa}$ (kg/cm ²)	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Diafragma	Hueca (arcilla)	≤1	No	1	3500	0.004	0.035	0.065	0.55	1.02	0.93
				1.5	4200	0.009	0.040	0.045	0.62	0.77	0.76
APLASTAMIENTO											
Modalidad	Tipo de pieza	H/L	Daño previo	t_{placa} (mm)	$f_{y-placa}$ (kg/cm ²)	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Diafragma	Hueca (arcilla)	≤1	No	0.3	3500	0.035	0.100	0.100	1.13	1.46	1.46
				0.5	3500	0.030	0.070	0.070	0.53	0.81	0.81
				1	3500	0.035	0.060	0.060	0.29	0.41	0.41
DESPLAZAMIENTO											
Modalidad	Tipo de pieza	H/L	Daño previo	t_{placa} (mm)	$f_{y-placa}$ (kg/cm ²)	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Diafragma*	Hueca (arcilla)	≤1	No	0.3 - 0.5	3500	0.07	0.10	0.10	1.03	1.20	1.20

5.4.3 Modelos de comportamiento para encamisados mediante bandas de polipropileno

5.4.3.1 Modelo para modo de falla controlado por tensión diagonal

Para esta técnica de rehabilitación se obtuvo un modelo, el cual se muestra en la figura 105, este modelo se considera para un sistema de mampostería simple, hecho con piezas macizas de arcilla, con una relación de aspecto $H/L \leq 1$, sin daño previo y reforzado mediante bandas de polipropileno. Se sugiere tomar este modelo como indicativo, dado que, al normalizar la resistencia de cada uno de los especímenes, únicamente se consideró la contribución de la mampostería y no de las bandas de polipropileno, debido a que la literatura existente no contiene modelos que permitan conocer la contribución de las bandas de polipropileno a resistir la fuerza cortante.

En la tabla 33 se presentan los valores (indicativos) para el modelo obtenido en la figura 105.

Para esta técnica se recomienda llevar a cabo más programas experimentales que permitan conocer y estimar de forma más precisa su comportamiento.

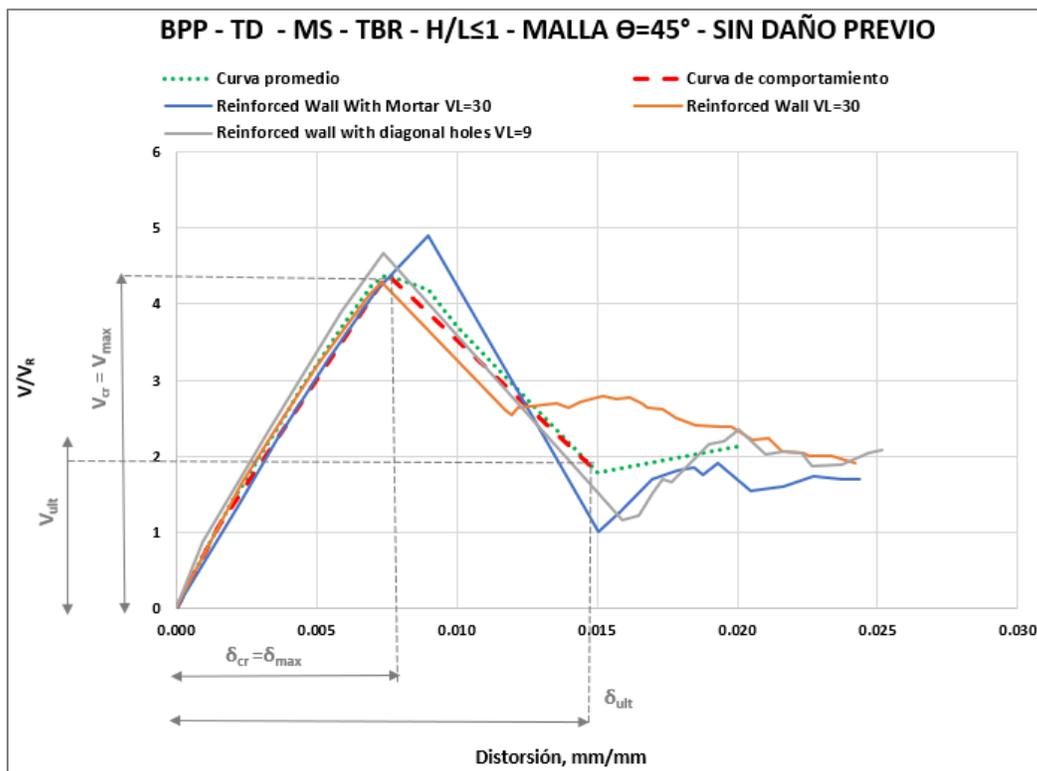


Figura 105. Curva esquelética para muros de mampostería simple con un modo de falla controlado por tensión diagonal, construido con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno, sin daño previo y rehabilitado con bandas de polipropileno dispuestas en una malla a 45° .

Tabla 33. Parámetros de diseño para el encamisado mediante bandas de polipropileno obtenidos de los modelos de comportamiento

ENCAMISADO CON BANDAS DE POLIPROPILENO										
TENSIÓN DIAGONAL										
Modalidad	Tipo de pieza	H/L	Disposición	Daño previo	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Simple	Maciza (arcilla)	≤ 1	Diagonal (45°)	No	0.002	0.008	0.015	1.07	4.39	1.78

5.4.4 Modelos de comportamiento para encamisados mediante bandas de PRF

Para esta técnica se elaboraron dos modelos que corresponden a un modo de falla controlado por tensión diagonal. Tomando en cuenta que en la base de datos se integraron pocos especímenes correspondientes a esta técnica y posteriormente, algunos no contaron con parámetros similares entre sí, con los que se pudiera analizar una tendencia de comportamiento.

5.4.4.1 Modelos para modo de falla controlado por tensión diagonal

Dos modelos fueron obtenidos para describir el comportamiento de esta técnica bajo una falla controlada por tensión diagonal. El primer modelo, mostrado en la figura 106 es aplicable a muros diafragma de piezas macizas, con una relación de aspecto $H/L > 1$ y sin daño previo, a su vez, este modelo considera una rehabilitación mediante bandas de fibra de carbono de módulo intermedio dispuestas en forma diagonal sobre la mampostería. En el modelo propuesto se incluyó la rama descendente (línea de puntos en color rojo) de la curva de comportamiento, considerando que a través de las envolventes de respuesta se marcó una tendencia que permitió conocer este comportamiento. El segundo modelo elaborado es el que se muestra en la figura 107, para este se considera su aplicación en muros de mampostería simple, con una relación de aspecto $H/L \leq 1$, sin daño previo y rehabilitados mediante fibra de vidrio, dispuesta en bandas verticales sobre la superficie de la mampostería. Cabe mencionar que para este modelo se incluyeron fibras de vidrio de alta resistencia a la tensión. No fue posible establecer un modelo para las fibras de baja resistencia a la tensión dado que la literatura no incluye las curvas de comportamiento histerético o las envolventes de respuesta de estos especímenes.

En la tabla 34 se presentan los valores obtenidos en los puntos de agrietamiento, resistencia máxima y resistencia última obtenidos en cada modelo para esta técnica.

Tabla 34. Parámetros de diseño para el encamisado mediante polímeros reforzados con fibras obtenidos de los modelos de comportamiento

ENCAMISADO CON POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS											
TENSIÓN DIAGONAL											
Modalidad	Tipo de fibra	Tipo de pieza	H/L	Disposición	Daño previo	δ_{cr}	δ_{max}	δ_{ult}	V_{cr}	V_{max}	V_{ult}
M. Diafragma	Carbono	Maciza (arcilla)	> 1	Diagonal	No	0.008	0.015	0.018	0.32	0.36	0.19
M. Simple	Vidrio		≤ 1	Vertical	No	0.001	0.0075	0.009	0.15	0.32	0.31

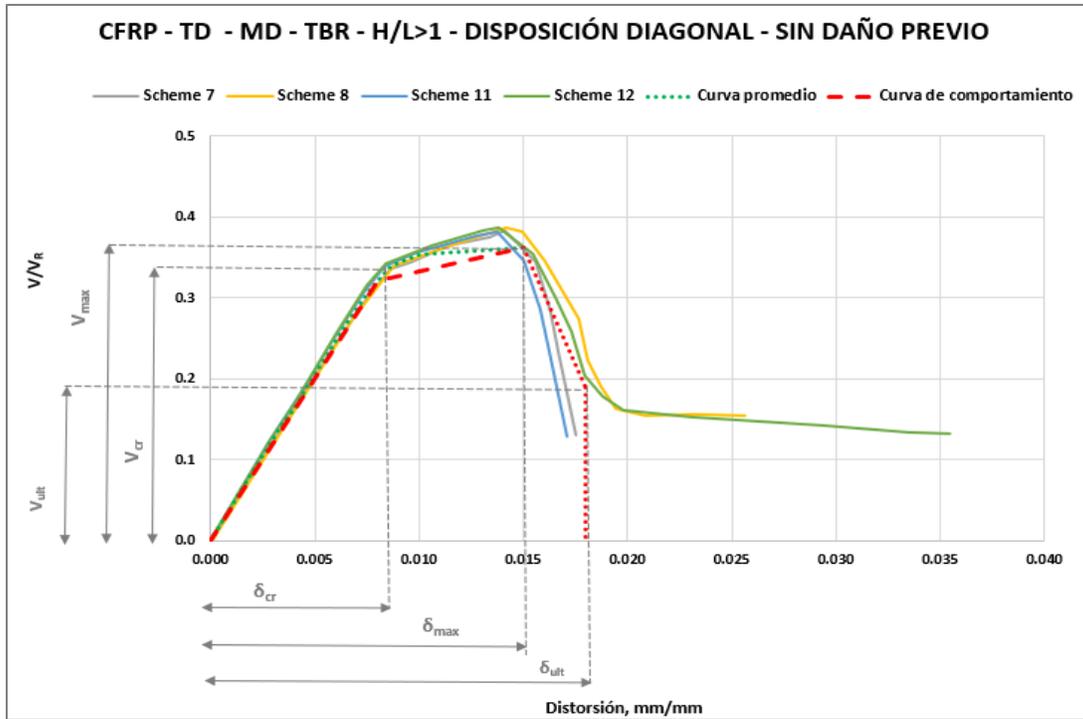


Figura 106. Curva esquelética para muros diafragma con un modo de falla controlado por tensión diagonal, construido con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto mayor que uno, sin daño previo y rehabilitado con bandas de fibra de carbono dispuestas en forma diagonal.

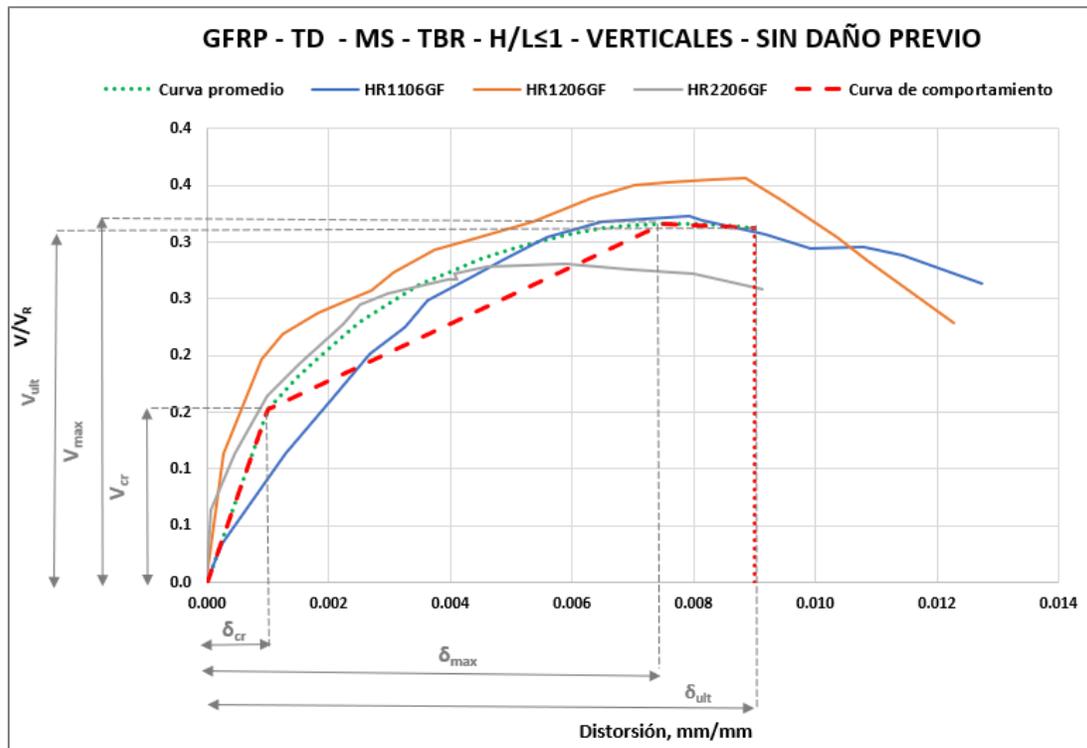


Figura 107. Curva esquelética para muros de mampostería simple con un modo de falla controlado por tensión diagonal, construido con piezas macizas de arcilla, una relación de aspecto menor o igual que uno, sin daño previo y rehabilitado con bandas de fibra de vidrio dispuestas de forma vertical.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los comentarios finales, conclusiones y recomendaciones a seguir respecto al estudio de las técnicas de rehabilitación de muros de mampostería tratadas en esta tesis.

6.2 BASE DE DATOS

Respecto a la elaboración de la base de datos, se considera que la cantidad de información encontrada respecto a ensayos en muros de mampostería bajo distintos esquemas de rehabilitación fue limitada. Aunado a la información limitada, el universo de especímenes incluidos en la base de datos fue reducido también, debido a la exclusión de especímenes en los que se consideró que su respuesta no sería significativa para los objetivos de este trabajo.

De los 94 especímenes rehabilitados que integraron la base de datos, 40% correspondieron a encamisados mediante malla de alambre soldado, mientras que 28%, 18%, 7%, 5% y 1% correspondieron a encamisado mediante bandas y placas de acero, encamisado con polímeros reforzados con fibras, al uso de bandas de polipropileno, el empleo de encamisados con morteros reforzados con fibras y al encamisado mediante textiles estructurales, respectivamente. Lo anterior denota la necesidad de llevar a cabo un mayor número de investigaciones y programas experimentales.

Para algunos especímenes existió una carencia importante de información, la cual tuvo que ser suplida con valores típicos que propone la normatividad mexicana. Esto es relevante, pues representa un sesgo en tanto en información estadística, como en datos que son empleados para la elaboración de modelos analíticos.

Se consideró relevante llevar a cabo un análisis de costos de las técnicas, puesto que, en general, la planeación de proyectos de rehabilitación considera no sólo la eficiencia estructural del proyecto, sino, la eficiencia y viabilidad económica para la realización de dicho proyecto. Este efecto se puede ver reflejado claramente en México, donde el encamisado mediante malla de alambre soldado es la técnica más utilizada, debido, además de sus buenos resultados en términos estructurales, a su bajo costo y a la asequibilidad de materiales. Otras técnicas, como el encamisado con bandas y placas de acero, o los encamisados con polímeros reforzados con fibras, a pesar de demostrar resultados favorables en el comportamiento de muros rehabilitados, pueden resultar costosas (comparadas con la construcción de un nuevo muro de mampostería, o rehabilitar con malla de alambre soldado o con bandas de polipropileno), lo que desalienta su uso y aplicación.

6.3 MODELOS PARA DISEÑO

De los 94 especímenes contenidos en la base de datos, se conservaron 52, los cuales fueron empleados para la elaboración de los modelos para diseño asociado a las técnicas de rehabilitación estudiadas en este documento, a excepción de las técnicas de encamisados textiles, encamisados mediante morteros reforzados con fibras y encamisados mediante bandas de acero. Estos especímenes no fueron excluidos del análisis dado que mostraron características similares y una tendencia en su comportamiento. No obstante, dado que no existieron suficientes datos para elaborar análisis estadísticos más detallados (regresiones múltiples, por ejemplo), las curvas de comportamiento fueron elaboradas con base en valores promedio de los especímenes agrupados en una misma clasificación.

Se identificó la necesidad de llevar a cabo un mayor número de programas experimentales con los que se puedan elaborar curvas de comportamiento más detalladas y precisas, además de que puedan estudiarse variables que no pudieron incluirse en los modelos propuestos en este trabajo (por ejemplo, que en cada técnica puedan tenerse modelos para cada modo de falla).

Para los casos en que se contó con poca información, y que además presentaron una dispersión de datos considerable, los modelos se recomendaron para ser considerados como indicativos.

En la literatura se identificaron diversos modelos propuestos para estimar la contribución de cada técnica de rehabilitación a la resistencia final de los muros de mampostería, sin embargo, no se encontró un modelo para la técnica de encamisado mediante bandas de polipropileno, por lo que para el modelo de esta técnica únicamente se consideró la aportación de la mampostería a la resistencia, lo que se traduce en un modelo muy conservador. Por lo anterior se optó por establecer ese modelo como indicativo.

Finalmente se desarrollaron 20 curvas de comportamiento, asociados a las técnicas de encamisado mediante malla de alambre soldado, encamisado mediante placas de acero, bandas de polipropileno y bandas de polímeros reforzados con fibras (PRF) las cuales se muestran en las figuras 88 a 107, y sus parámetros se presentan en las tablas 31 a 34. De las curvas de comportamiento desarrolladas, dos fueron propuestas como indicativas (figura 102 y 104) puesto que se consideró que, debido a que los escasos especímenes incluidos en la elaboración de esas curvas, existió un nivel considerable de dispersión en los datos. Al mismo tiempo, las curvas de comportamiento asociadas a sistemas de mampostería confinada se compararon respecto a una curva de comportamiento, obtenida a través de los valores promedio obtenidos mediante los modelos de Riahi (2009). En todos los casos (de curvas de comportamiento para mampostería confinada) se observó una mayor resistencia y capacidad de deformación, lo cual muestra el efecto que tienen las distintas técnicas de rehabilitación en los muros de mampostería. Las curvas desarrolladas pueden implantarse en esquemas de diseño basados en desempeño para la rehabilitación de estructuras de mampostería.

Se observó que las curvas obtenidas obedecen a “familias” o grupos definidos por variables como el modo de falla de los muros, el tipo de estructuración (mampostería confinada, mampostería reforzada interiormente, mampostería simple o muros diafragma), el tipo de pieza (macizas o huecas, de arcilla o concreto), la relación de aspecto (menor o

igual que uno o mayor a uno) y la presencia de daño previo a la rehabilitación, principalmente. Para ejemplificar lo anterior, se presentan las figuras 108, 109 y 110, que agrupan las curvas comportamiento asociadas a diversas técnicas de rehabilitación. La técnicas de rehabilitación integradas en las figuras 108, 109 y 110 corresponden al encamisado mediante malla de alambre soldado y al encamisado mediante bandas de polímeros reforzados con fibras (PRF). No se incluyeron las curvas correspondientes a las técnicas de encamisado mediante bandas de polipropileno y encamisado mediante placas de acero dado que en su mayoría se consideraron como curvas indicativas y su comportamiento dista respecto al de las curvas mostradas a continuación.

La nomenclatura empleada en las figuras hace referencia, en primer lugar, a la técnica de rehabilitación: MAS, para malla de alambre soldado y BPRR para bandas de polímeros reforzados con fibras; posteriormente al modo de falla: TD para tensión diagonal, FX para flexión y DB para deslizamiento. Posteriormente se incluye el tipo de estructuración: MC para mampostería confinada, MRI para mampostería reforzada interiormente, MS para mampostería simple y MD para muros diafragmas; se incluye también el tipo de pieza empleado: AM y CM para piezas macizas de arcilla y concreto, respectivamente; AH y CH para piezas huecas de arcilla y concreto, respectivamente. Se incluye también la relación de aspecto H/L y la presencia (DP) o ausencia (SDP) de daño previo.

En la figura 108 se presentan las curvas que corresponden a un modo de falla controlado por tensión diagonal, se observan las familias compuestas tanto por los muros de mampostería confinada, donde se presenta un mayor índice de resistencia respecto a las curvas para muros diafragma, donde la resistencia es menor, no obstante, cuentan con una mayor capacidad de deformación, donde particularmente la curva que presenta una mayor capacidad de deformación corresponde a muros con relación de aspecto mayor a uno. A su vez, es importante resaltar la curva en color anaranjado, la cual se relaciona con muros rehabilitados que presentaron daño previo; esta curva tiene un comportamiento similar a la curva en color amarillo, que corresponde a muros de piezas huecas.

La figura 109 corresponde a curvas asociadas a un modo de falla controlado por flexión, para este caso, se observa dispersión tanto en el índice de resistencia como en la capacidad de deformación, esta dispersión se asume que está dada por la relación de aspecto de ambas curvas, donde la capacidad de deformación es mayor para muros con relación de aspecto mayor a uno, y la resistencia es mayor para muros con relación de aspecto menor o igual que uno.

Finalmente, en la figura 110, se presentan las curvas asociadas a un modo de falla controlado por deslizamiento. En esta figura se observa como las curvas responden a familias principalmente formadas por la estructuración de los muros, donde las curvas para mampostería confinada responden a una mayor resistencia y capacidad de deformación respecto a la curva asociada a mampostería reforzada interiormente; para este caso no se observó de forma notable la influencia del tipo de pieza, considerando que todas las curvas se asocian a piezas macizas.

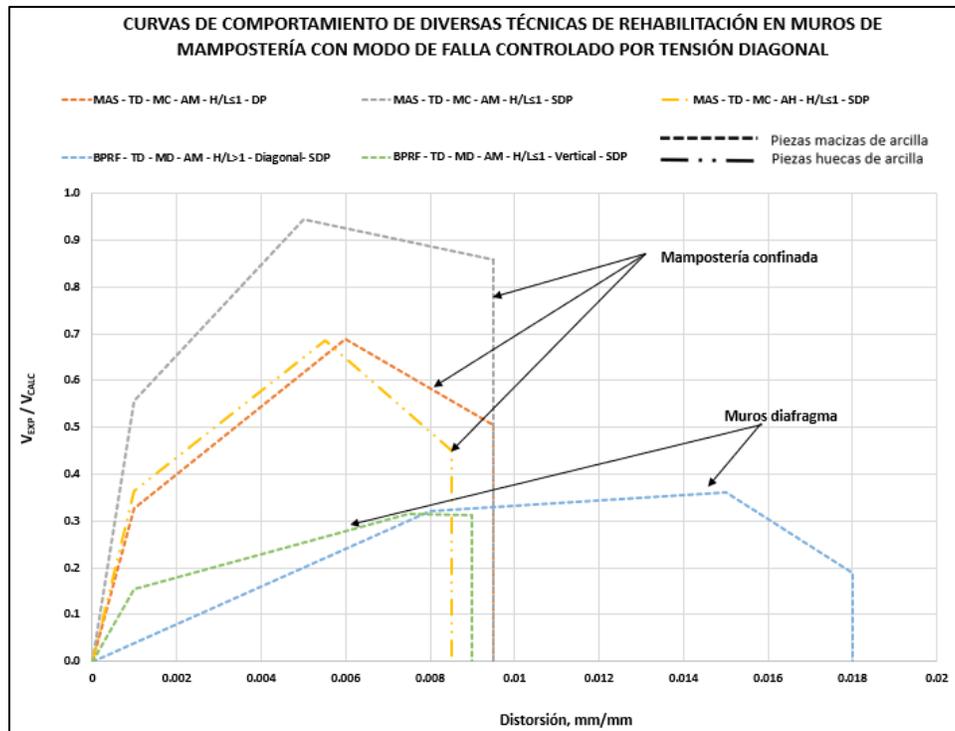


Figura 108. Curvas de comportamiento obtenidas para un modo de falla controlado por tensión diagonal.

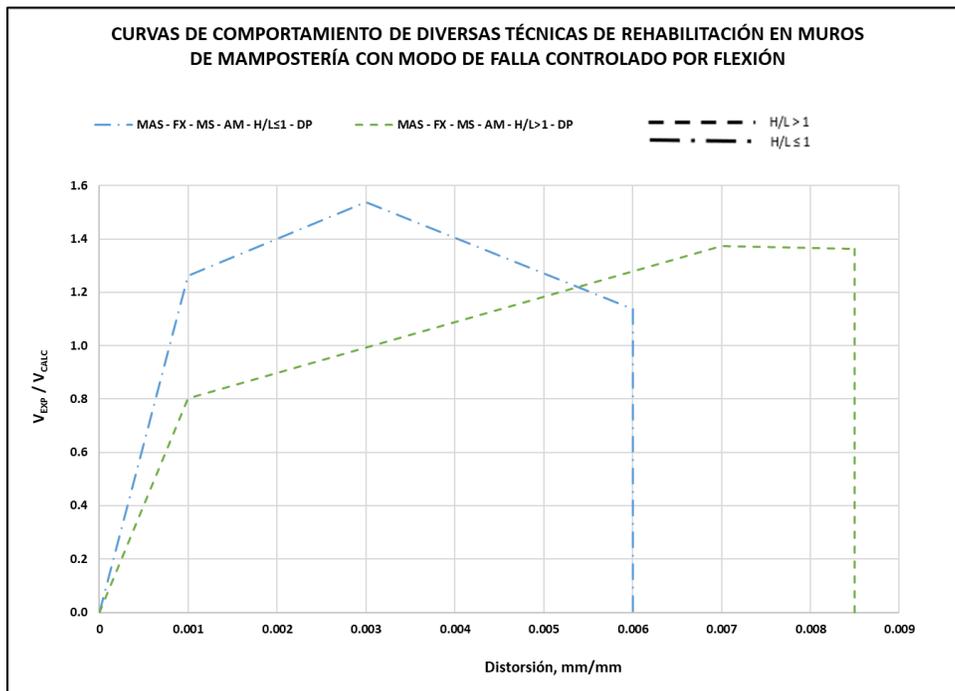


Figura 109. Curvas de comportamiento obtenidas para un modo de falla controlado por flexión.

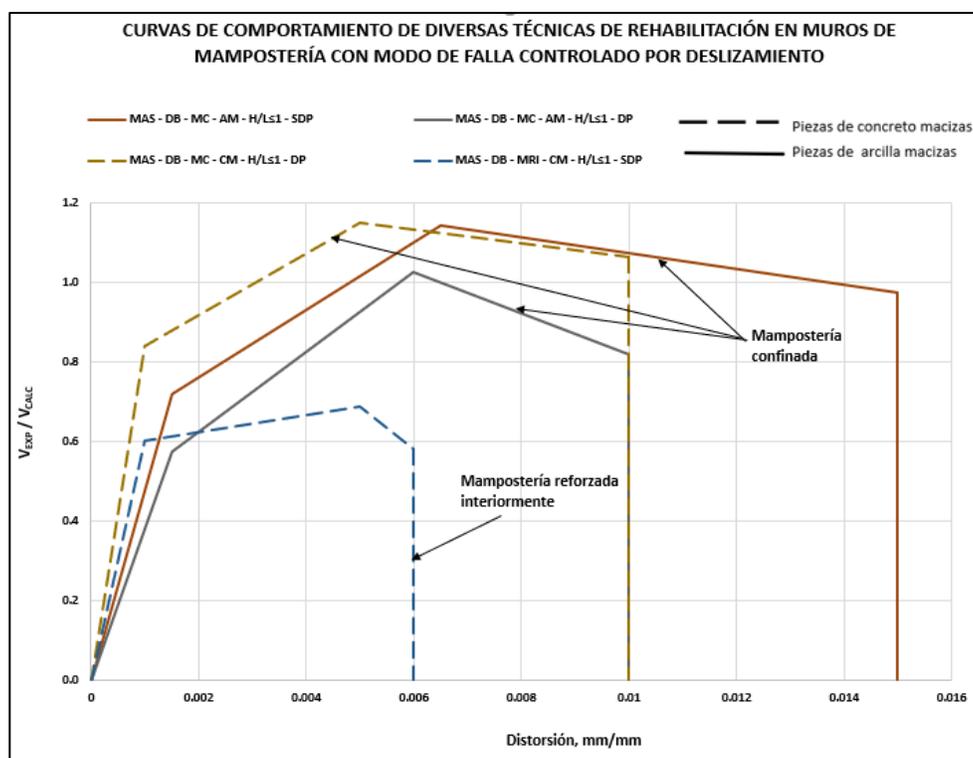


Figura 110. Curvas de comportamiento obtenidas para un modo de falla controlado por deslizamiento.

6.4 RECOMENDACIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

Considerando que los sistemas estructurales a base de mampostería han sido, y hasta la fecha, siguen siendo los más empleados en América Latina, y particularmente en México, donde gran parte del territorio nacional comprende zonas alta sismicidad, es necesario contar con guías, normas y manuales que establezcan los lineamientos detallados para el análisis, diseño, construcción y aseguramiento de la calidad del empleo de diversas técnicas, como las que se estudiaron en este trabajo. En la actualidad, la normatividad mexicana para estructuras de mampostería considera únicamente la técnica de encamisado de muros de mampostería mediante malla de alambre soldado, limitando la posibilidad de emplear otras técnicas, es por ello, que se sugiere considerar la inclusión de las técnicas presentadas en este documento en la normatividad futura.

Es recomendable el llevar a cabo un mayor número trabajos experimentales en técnicas como el encamisado mediante bandas de polipropileno, mediante textiles estructurales o morteros reforzados con fibras, puesto que además de existir poca investigación referente a estas técnicas, han mostrado tener resultados favorables en el comportamiento de muros rehabilitados y además un costo accesible.

Se considera que debe abundarse más el estudio del efecto que tienen los conectores en el comportamiento de los muros rehabilitados, en general, para todas las técnicas. Lo anterior debido a que se identificó que este tema fue pasado por alto varias veces en la literatura. Adicionalmente, la interacción entre la rehabilitación y los elementos que

confinan a la mampostería (castillos, columnas, dadas y trabes) ha sido poco abordada, por lo que se sugiere considerar estas variables de estudio.

Se recomienda cumplir con los requisitos de análisis, diseño, construcción y supervisión establecidos en el documento “Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica” (llamada Guía técnica en este artículo), elaborado por el II-UNAM para el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED, 2020).

Para los proyectos de rehabilitación en curso, se recomienda cumplir con los requisitos de análisis, diseño, construcción y supervisión establecidos en el documento “Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica” elaborado por el II-UNAM para el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED, 2020).

En conclusión, con objeto de que la rehabilitación de cualquier estructura, en especial las estructuras de mampostería, sea exitosa, es necesario planear y ejecutar el proyecto de rehabilitación, según las necesidades propias de las diversas estructuras de modo que brinde un nivel de certeza adecuado respecto a la seguridad estructural de los inmuebles que ocupa. El aseguramiento de la calidad de la ejecución de las diversas técnicas puede ser determinante en el desempeño de la estructura ante un futuro evento sísmico.

APÉNDICE A BASE DE DATOS

A.1 MALLA DE ALAMBRE SOLDADO

INFORMACIÓN GENERAL							Especímen		
ID	Autor/es	País	Año	Institución	Normatividad				
1	J. Ruiz, T. Sánchez, S. Alcocer	México	1995	CENAPRED / II UNAM	RDF - 1987	N1	Norte	Este	
	J. Ruiz, T. Sánchez, S. Alcocer	México	1995	CENAPRED / II UNAM	RDF - 1988		Oeste		
	J. Ruiz, T. Sánchez, S. Alcocer	México	1995	CENAPRED / II UNAM	RDF - 1989		Sur	Este	
	J. Ruiz, T. Sánchez, S. Alcocer	México	1995	CENAPRED / II UNAM	RDF - 1990		Oeste		
	J. Ruiz, T. Sánchez, S. Alcocer	México	1995	CENAPRED / II UNAM	RDF - 1991		Norte	Este	
	J. Ruiz, T. Sánchez, S. Alcocer	México	1995	CENAPRED / II UNAM	RDF - 1992		Oeste		
	J. Ruiz, T. Sánchez, S. Alcocer	México	1995	CENAPRED / II UNAM	RDF - 1993		Sur	Este	
J. Ruiz, T. Sánchez, S. Alcocer	México	1995	CENAPRED / II UNAM	RDF - 1994	Oeste				
2	J. Pineda, J. Zepeda, S. Alcocer	México	1996	CENAPRED / II UNAM / INFONAVIT	RDF - 1987			M-072	
	J. Pineda, J. Zepeda, S. Alcocer	México	1996	CENAPRED / II UNAM / INFONAVIT	RDF - 1988			M-147	
	J. Pineda, J. Zepeda, S. Alcocer	México	1996	CENAPRED / II UNAM / INFONAVIT	RDF - 1989			M-211	
3	L. Flores, J. Marcelino, G. Lazaide, S. Alcocer	México	1999	CENAPRED / AC-TELMEX	RDF-1995			TO	
	L. Flores, J. Marcelino, G. Lazaide, S. Alcocer	México	1999	CENAPRED / AC-TELMEX	RDF-1995			TP	
	L. Flores, J. Marcelino, G. Lazaide, S. Alcocer	México	1999	CENAPRED / AC-TELMEX	RDF-1995			TD	
	L. Flores, J. Marcelino, G. Lazaide, S. Alcocer	México	1999	CENAPRED / AC-TELMEX	RDF-1995			TH	
4	A. San Bartolomé, A. Castro	Perú	2003	Pontificia Universidad Católica del Perú	NTE E-030 SENSICO			M1	
	A. San Bartolomé, A. Castro	Perú	2003	Pontificia Universidad Católica del Perú	NTE E-030 SENSICO			M1R	
5	L. Flores, M. Rios, C. Reyes	México	2004	CENAPRED	NTC M - 2004			MV-1R	
	L. Flores, M. Rios, C. Reyes	México	2004	CENAPRED	NTC M - 2004			MV-2R	
6	J. Marcelino, S. Alcocer	México	2004	CENAPRED / II UNAM/ CONSTRUVAL	NTCM-2002			MRA-1	
	J. Marcelino, S. Alcocer	México	2004	CENAPRED / II UNAM/ CONSTRUVAL	NTCM-2002			MRA-2	
	J. Marcelino, S. Alcocer	México	2004	CENAPRED / II UNAM/ CONSTRUVAL	NTCM-2002			MRA-1R	
	J. Marcelino, S. Alcocer	México	2004	CENAPRED / II UNAM/ CONSTRUVAL	NTCM-2002			MRA-2R	
7	J. Solano, R. Acuña	Costa Rica	2009	Universidad de Costa Rica / CPCSCR	CSCR 2002 / ACI 530-08			P1	
	J. Solano, R. Acuña	Costa Rica	2009	Universidad de Costa Rica / CPCSCR	CSCR 2002 / ACI 530-08			P3	
	J. Solano, R. Acuña	Costa Rica	2009	Universidad de Costa Rica / CPCSCR	CSCR 2002 / ACI 530-08			P2	
	J. Solano, R. Acuña	Costa Rica	2009	Universidad de Costa Rica / CPCSCR	CSCR 2002 / ACI 530-08			P4	
	J. Solano, R. Acuña	Costa Rica	2009	Universidad de Costa Rica / CPCSCR	CSCR 2002 / ACI 530-08			P5 (P1 R)	
J. Solano, R. Acuña	Costa Rica	2009	Universidad de Costa Rica / CPCSCR	CSCR 2002 / ACI 530-08			P6 (P3 R)		
8	A. San Bartolomé, K. Barr, C. Pineda	Perú	2011	Pontificia Universidad Católica del Perú	Código de Mampostería Peruano E-070			M1	
	A. San Bartolomé, K. Barr, C. Pineda	Perú	2011	Pontificia Universidad Católica del Perú	Código de Mampostería Peruano E-070			M2	
9	L. Flores, M. Pacheco, J. Carrillo	México	2012	CENAPRED	NTC-2004			MES-R	
10	A. San Bartolomé, D. Quiñ, T. Araoz, J. Velezmore	Perú	2012	Pontificia Universidad Católica del Perú	Código de Mampostería Peruano E-070			W1	
	A. San Bartolomé, D. Quiñ, T. Araoz, J. Velezmore	Perú	2012	Pontificia Universidad Católica del Perú	Código de Mampostería Peruano E-070			W2	
11	S. Churilov, E. Dumova-Jovanoska	Macedonia	2013	Cyrl and Methodius University of Skopje	MKS Codes / Eurocode 6 / CSA S304.1-04 / PIOVSP			URM1	
	S. Churilov, E. Dumova-Jovanoska	Macedonia	2013	Cyrl and Methodius University of Skopje	MKS Codes / Eurocode 6 / CSA S304.1-04 / PIOVSP			URM2	
	S. Churilov, E. Dumova-Jovanoska	Macedonia	2013	Cyrl and Methodius University of Skopje	MKS Codes / Eurocode 6 / CSA S304.1-04 / PIOVSP			URM3	
	S. Churilov, E. Dumova-Jovanoska	Macedonia	2013	Cyrl and Methodius University of Skopje	MKS Codes / Eurocode 6 / CSA S304.1-04 / PIOVSP			URM4	
	S. Churilov, E. Dumova-Jovanoska	Macedonia	2013	Cyrl and Methodius University of Skopje	MKS Codes / Eurocode 6 / CSA S304.1-04 / PIOVSP			SM1	
	S. Churilov, E. Dumova-Jovanoska	Macedonia	2013	Cyrl and Methodius University of Skopje	MKS Codes / Eurocode 6 / CSA S304.1-04 / PIOVSP			SM2	
	S. Churilov, E. Dumova-Jovanoska	Macedonia	2013	Cyrl and Methodius University of Skopje	MKS Codes / Eurocode 6 / CSA S304.1-04 / PIOVSP			SM3	
S. Churilov, E. Dumova-Jovanoska	Macedonia	2013	Cyrl and Methodius University of Skopje	MKS Codes / Eurocode 6 / CSA S304.1-04 / PIOVSP			SM4		
12	D. Quiñ, P. Mamaní	Perú	2017	Pontificia Universidad Católica del Perú	Código de Mampostería Peruano E-070			WV-1	
	D. Quiñ, P. Mamaní	Perú	2017	Pontificia Universidad Católica del Perú	Código de Mampostería Peruano E-070			WV-2	
13	M. Díaz, C. Zavala, J. Gallardo, L. Lavado	Perú	2017	Universidad Nacional de Ingeniería	NTE-E030-2016 / NTE-E070-2006			MART	
	M. Díaz, C. Zavala, J. Gallardo, L. Lavado	Perú	2017	Universidad Nacional de Ingeniería	NTE-E030-2016 / NTE-E070-2007			MTUB	
	M. Díaz, C. Zavala, J. Gallardo, L. Lavado	Perú	2017	Universidad Nacional de Ingeniería	NTE-E030-2016 / NTE-E070-2008			MART-R	
	M. Díaz, C. Zavala, J. Gallardo, L. Lavado	Perú	2017	Universidad Nacional de Ingeniería	NTE-E030-2016 / NTE-E070-2009			MTUB-R	
14	S. Chellappa, R.N. Dubey	India	2017	Indian Institute of Technology Roorkee	IS:13935-2009			URM	
	S. Chellappa, R.N. Dubey	India	2017	Indian Institute of Technology Roorkee	IS:13935-2009			URM-R	
15	D. Escalante, A. Tatsuya	Perú	2018	Japan-Peru Center of Earthquake engineering research and disaster mitigation	FEMA 356 / Código Peruano			Original (0%)	
	D. Escalante, A. Tatsuya	Perú	2018	Japan-Peru Center of Earthquake engineering research and disaster mitigation	FEMA 356 / Código Peruano			Retrofit (50%)	
	D. Escalante, A. Tatsuya	Perú	2018	Japan-Peru Center of Earthquake engineering research and disaster mitigation	FEMA 356 / Código Peruano			Retrofit (100%)	
16	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017 / RCDP 2016			M1R	
	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017 / RCDP 2016			M2R	
	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017 / RCDP 2016			M3R	
	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017 / RCDP 2016			M4R	
	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017 / RCDP 2016			M5R	
	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017 / RCDP 2016			M11R	
	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017 / RCDP 2016			M12R	
H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017 / RCDP 2016			M13R		

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES GENERALES															
Clasificación	Pieza	Dimensiones de la pieza de mampostería			Juntas				Escala	Modelo 3D	Crujías	Niveles	Altura	Longitud	H/L
		Altura	Esesor	Longitud	Tipo	Proporcionami erito	kg/cm ²	MPa							
		cm											cm	cm	
MC	TBR	6.3	12.5	24	I	1:3	5D	5D	1:1	Sí	2	2	250	160	1.6
MC	TBR	6.3	12.5	24	I	1:3	5D	5D	1:1				250	240	1.0
MC	TBR	6.3	12.5	24	I	1:3	5D	5D	1:1		2	10	250	160	1.6
MC	TBR	6.3	12.5	24	I	1:3	5D	5D	1:1				250	240	1.0
MC	TBR	6.3	12.5	24	I	1:3	5D	5D	1:1		2	2	250	240	1.0
MC	TBR	6.3	12.5	24	I	1:3	5D	5D	1:1				250	160	1.6
MC	TBR	6.3	12.5	24	I	1:3	5D	5D	1:1		2	2	250	240	1.0
MC	TBR	6.3	12.5	24	I	1:3	5D	5D	1:1				250	160	1.6
MC	TBR	6	12.5	24	II	1:4	102	10.4	1:1	No	1	1	250	250	1.0
MC	TBR	6	12.5	24	II	1:4	102	10.4	1:1	No	1	1	250	250	1.0
MC	TBR	6	12.5	24	II	1:4	102	10.4	1:1	No	1	1	250	250	1.0
MD	BCH	19.6	14.8	39.7	I	5D	183	18.7	1:1	No	1	1	300	300	1.0
MD	BCH	19.6	14.8	39.7	I	5D	183	18.7	1:1	No	1	1	300	300	1.0
MD	BCH	19.6	14.8	39.7	I	5D	178	18.1	1:1	No	1	1	300	300	1.0
MD	BCH	19.6	14.8	39.7	I	5D	170	17.3	1:1	No	1	1	300	300	1.0
MC	TAMP	9	13	23	I	1:4	255	26.0	1:1	No	1	1	240	260	0.92
MC	TAMP	9	13	23	I	1:4	255	26.0	1:1	No	1	1	240	260	0.92
MC	TBR	5.3	11.9	23.6	II	1:1/4 : 3.75	93	9.12	1:1	No	1	1	250	315	0.79
MC	TBR	5.3	11.9	23.6	II	1:1/4 : 3.75	93	9.12	1:1	No	1	1	250	315	0.79
MC	TC	11	14	28	III	1:5-20	22.2	2.26	1:1	No	1	1	250	310	0.8
MC	TC	11	14	28	III	1:5-20	12.4	1.26	1:1	No	1	1	250	310	0.8
MC	TC	11	14	28	III	1:5-20	22.2	2.26	1:1	No	1	1	250	310	0.8
MC	TC	11	14	28	III	1:5-20	12.4	1.26	1:1	No	1	1	250	310	0.8
MRI	BCH	20	12	40	II	1:4	100	10.2	1:1	No	1	1	180	180	1
MRI	BCH	20	12	40	II	1:4	100	10.2	1:1	No	1	1	180	180	1
MRI	BCH	20	12	40	II	1:4	100	10.2	1:1	No	1	1	180	180	1
MRI	BCH	20	12	40	II	1:4	100	10.2	1:1	No	1	1	180	180	1
MRI	BCH	20	12	40	II	1:4	100	10.2	1:1	No	1	1	180	180	1
MRI	BCH	20	12	40	II	1:4	100	10.2	1:1	No	1	1	180	180	1
MC	TAMP	9	12.5	23	II	1:4	5D	5D	1:1	No	1	1	230	240	0.96
MC	TAMP	9	12.5	23	II	1:4	5D	5D	1:1	No	1	1	230	240	0.96
MC	TAH	13	12	23	II	1:3	91	9	1:1	No	1	1	250	424	0.59
MC	TAPH	9	11	23	II	1:4	5D	5D	1:1	No	1	1	220	220	1.00
MC	TAPH	9	11	23	II	1:4	5D	5D	1:1	No	1	1	220	220	1.00
MS	TBR	6.5	12	25	I	1:3	274.3	26.9	1:1	No	1	1	182	252	0.72
MS	TBR	6.5	12	25	I	1:3	274.3	26.9	1:1	No	1	1	182	146	1.25
MS	TBR	6.5	12	25	I	1:3	274.3	26.9	1:1	No	1	1	182	252	0.72
MS	TBR	6.5	12	25	I	1:3	274.3	26.9	1:1	No	1	1	182	146	1.25
MS	TBR	6.5	12	25	I	1:3	274.3	26.9	1:1	No	1	1	182	252	0.72
MS	TBR	6.5	12	25	I	1:3	274.3	26.9	1:1	No	1	1	182	146	1.25
MS	TBR	6.5	12	25	I	1:3	274.3	26.9	1:1	No	1	1	182	252	0.72
MS	TBR	6.5	12	25	I	1:3	274.3	26.9	1:1	No	1	1	182	146	1.25
MC	TAPH	9	11	22	II	1:4	5D	5D	1:1	No	1	1	220	220	1.00
MC	TAPH	9	11	22	II	1:4	5D	5D	1:1	No	1	1	220	220	1.00
MC	TBR	5D	11.7	5D	I	1:4	135	13.8	1:1	No	1	1	250	240	1.04
MC	TAMP	5D	11.1	5D	I	1:4	135	13.8	1:1	No	1	1	250	240	1.04
MC	TBR	5D	11.7	5D	I	1:4	135	13.8	1:1	No	1	1	250	240	1.04
MC	TAMP	5D	11.1	5D	I	1:4	135	13.8	1:1	No	1	1	250	240	1.04
MS	TBR	3.5	11.5	5.7	5D	1:4	5D	5D	1:1	Sí	1	1	200	225	0.89
MC	TBR	3.5	11.5	5.7	5D	1:4	5D	5D	1:1	Sí	1	1	200	225	0.89
MC	TAPH	9	12.5	23	II	1:4	5D	5D	1:1	Sí	2	2	5D	5D	5D
MC	TAPH	9	12.5	23	II	1:4	5D	5D	1:1	Sí	2	2	5D	5D	5D
MC	TAPH	9	12.5	23	II	1:4	5D	5D	1:1	Sí	2	2	5D	5D	5D
MC	TBR	5.5	12	23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92
MC	TBR	5.5	12	23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92
MC	TBR	5.5	12	23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92
MC	TBR	5.5	12	23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92
MC	TBR	5.5	12	23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92
MC	TBR	5.5	12	23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92
MC	TBR	5.5	12	23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92
MC	TBR	5.5	12	23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92
MC	TBR	5.5	12	23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92

SISTEMA ESTRUCTURAL: CASTILLOS CONFINAMIENTO EN ABERTURAS															
Longitudinal			Refuerzo transversal												
# Barras	ø		Grado del acero	f _y		ø		s [centro] [cm]	s [extremo] [cm]	f _t '	Dadas / Vigas	b [cm]	h [cm]	Grado del acero	f _t [kg/cm ²]
	#	mm		kg/cm ²	MPa	#	mm	cm	cm	kg/cm ²					
4	3	9.5	42	2200	215.8	2	6.35	20	7	210	Dalas	12.5	25	42	4200
4	3	9.5	42	2200	215.8	2	6.35	20	7	210	Dalas	12.5	25	42	4200
4	3	9.5	42	2200	215.8	2	6.35	20	7	210	Dalas	12.5	25	42	4200
4	3	9.5	42	2200	215.8	2	6.35	20	7	210	Dalas	12.5	25	42	4200
4	3	9.5	42	2200	215.8	2	6.35	20	7	210	Dalas	12.5	25	42	4200
4	3	9.5	42	2200	215.8	2	6.35	20	7	210	Dalas	12.5	25	42	4200
4	3	9.5	42	2200	215.8	2	6.35	20	7	210	Dalas	12.5	25	42	4200
4	3	9.5	42	2200	215.8	2	6.35	20	7	210	Dalas	12.5	25	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dalas	12	25	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dalas	12	25	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dalas	12	25	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	28	38	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	28	38	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	28	38	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	28	38	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	13	20	60	6000
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	13	20	60	6000
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	12	42	4990
3	3	9.5	42	2710	276.25	2	6.35	18	18	SD	Dala	12	12	42	4990
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dalas	11	20	60	6000
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dalas	11	20	60	6000
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dalas	11	20	60	6000
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dalas	11	20	60	6000
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	12	20	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	12	20	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	12	20	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	12	20	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	12	20	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	12	20	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	20	20	60	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	20	20	60	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	15	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	13	20	60	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	13	20	60	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Dala	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Dala	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Dala	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Dala	12	30	42	4200

TIETAS		REPARACIÓN / ADICIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO								Características de la m				
Resina epoxi	Rajuelo	Adición de castillos / columnas	Adición de dalas/vigas	Reparación de castillos /columnas	f _c '		Reparación de dalas / vigas	f _c '		No. caras encamadas	Calibre	Ø Alambre	A _{ch}	S _{ch}
					kg/cm ²	Tipo		kg/cm ²	Tipo					
No	Sí	No	No	Sí	250	I	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.24	150
No	Sí	No	No	Sí	250	I	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.24	150
No	Sí	No	No	Sí	250	I	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.24	150
No	Sí	No	No	Sí	250	I	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.24	150
No	Sí	No	No	Sí	250	I	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.24	150
No	Sí	No	No	Sí	250	I	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.24	150
No	Sí	No	No	Sí	250	I	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.24	150
No	Sí	No	No	Sí	250	I	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.24	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6/10-10	3.43	9.24	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6-6/6	4.88	18.7	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6/1/4-1/4	6.35	31.67	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	6x6-4/4	5.72	25.69	152.4
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	6x6-4/4	5.72	25.69	152.4
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	6x6-4/4	5.72	25.69	152.4
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
No	No	No	No	Sí	280	I	Sí	280	I	2	6x6-6/6	4.5	18.7	150
No	No	NA	NA	Sí	153	I	No	NA	NA	2	6x6/10-10	3.43	9.3	150
No	No	NA	NA	Sí	153	I	No	NA	NA	2	6x6/10-10	3.43	9.3	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
No	No	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	2	6x6-6/6	4.88	18.7	150
No	No	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	2	6x6-6/6	4.88	18.7	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.3	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.3	150
No	Sí	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.3	150
No	Sí	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	2	6x6/10-10	3.43	9.3	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6-6/6	4.5	18.7	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
No	Sí	NA	NA	Sí	200	II	No	NA	NA	1	6x6-6/6	4.88	18.7	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6-6/6	4.5	27	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
SD	SD	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6-5/8	4.2	13.26	100
SD	SD	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6-5/8	4.2	13.26	100
SD	SD	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6-5/8	4.2	13.26	100
SD	SD	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6-5/8	4.2	13.26	100
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6-4/4	5.72	25.69	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6-4/4	5.72	25.69	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
SD	SD	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	2	6x6/8-8	4.2	13.26	150
SD	SD	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	2	6x6/8-8	4.2	13.26	150
NA	NA	No	No	No	100	II	No	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	Sí	Sí	No	100	II	No	NA	NA	2	6x6-10/10	3.43	9.3	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
No	No	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	2	SD	SD	SD	SD
No	No	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	2	SD	SD	SD	SD
No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	2	6x6/10-10	3.43	9.3	150
NA	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	6x6/8-8	4.2	13.26	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	6x6/8-8	4.2	13.26	150
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2	6x6/10-10	3.43	9.3	150
No	NA	No	No	Sí	150	II	No	NA	NA	1	6x6/8-8	4.2	13.26	150
No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	6x6/8-8	4.2	13.26	150
No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	6x6/8-8	4.2	13.26	150
No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	6x6/8-8	4.2	13.26	150
No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	6x6/8-8	4.2	13.26	150
No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	6x6/10-10	3.43	9.3	150

ENCAMISADO CON MALLA DE ALAMBRE SOLDADA															
Malla				Anclaje											
Cuántia horizontal $P_h = P_v$	η	Grado del acero	f_y	Primer Tipo	Distribución	Separadores	Método de colocación	Longitud de anclaje		ϕ	Separación CARA 1	Separación CARA 2	Distribución	Segundo Tipo	
%			kg/cm ²		pas/m ²			mm	in	mm	cm	cm			
0.0005	0.67	50	5000	Clavo común	9	Corcholatas	Manual	50	1.96	SD	SD	SD	Tresbolillo	NA	
0.0005	0.67	50	5000	Clavo común	9	Corcholatas	Manual	50	1.96	SD	SD	SD	Tresbolillo	NA	
0.0005	0.67	50	5000	Clavo común	6	Corcholatas	Manual	50	1.96	SD	SD	SD	Tresbolillo	NA	
0.0005	0.67	50	5000	Clavo común	6	Corcholatas	Manual	50	1.96	SD	SD	SD	Tresbolillo	NA	
0.0005	0.67	50	5000	Clavo común	9	Corcholatas	Manual	50	1.96	SD	SD	SD	Tresbolillo	NA	
0.0005	0.67	50	5000	Clavo común	9	Corcholatas	Manual	50	1.96	SD	SD	SD	Tresbolillo	NA	
0.0005	0.67	50	5000	Clavo común	6	Corcholatas	Manual	50	1.96	SD	SD	SD	Tresbolillo	NA	
0.0005	0.67	50	5000	Clavo común	6	Corcholatas	Manual	50	1.96	SD	SD	SD	Tresbolillo	NA	
0.072	0.67	50	5000	Clavo común	SD	No	Manual	63.5	2.5	SD	30	45	Tresbolillo	NA	
0.147	0.67	50	5000	Clavo común	SD	No	Manual	63.5	2.5	SD	30	45	Tresbolillo	NA	
0.211	0.67	50	5000	Fijadores Hilti	SD	Arandela	Pistola de impacto	51	2	SD	45	45	Tresbolillo	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
0.00187	SD	50	5000	Alcayatas 90°	20 barras	No	Manual	60	2.36	1.27	40	NA	En marco	Alcayatas 90°	
0.00187	SD	50	5000	Alcayatas 90°	41 barras	No	Manual	60	2.36	1.27	40	NA	co y muro en tre	Alcayatas 90°	
0.00187	SD	50	5000	Fijadores Hilti	79 total	Arandela	Pistola de impacto	72	2.83	3.7	45	NA	Tresbolillo	Alcayatas 90°	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
0.0010	SD	50	5000	Alambre 1/8 pulg	SD	Alambre	Manual	130	5.11	3.175	45	45	Tresbolillo	NA	
0.0010	0.6	50	5000	Clavos	SD	Alambre	Manual	50	2	SD	45	45	Tresbolillo	NA	
0.0001	0.6	50	5000	Clavos	SD	Alambre	Manual	50	2	SD	45	45	Tresbolillo	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
0.0011	0.2	50	5000	Pasadores "U"	SD	No	Manual	750	29.52	9.5	45	45	Extremos	Pasadores "U"	
0.0011	0.2	50	5000	Pasadores "U"	SD	No	Manual	750	29.52	9.5	45	45	Extremos	Pasadores "U"	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
0.0005	SD	50	5000	Clavos	SD	No	Manual	SD	SD	SD	SD	SD	SD	NA	
0.0005	SD	50	5000	Clavos	SD	No	Manual	SD	SD	SD	SD	SD	SD	NA	
0.0005	SD	50	5000	Clavos	SD	No	Manual	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Barras No.6	
0.0005	SD	50	5000	Clavos	SD	No	Manual	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Barras No.6	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
0.0010	SD	50	5000	Alambre	SD	Alambre	Manual	125	4.92	3.175	45	NA	NA	NA	
0.0010	0.51	50	5000	Clavos	SD	No	Manual	SD	SD	SD	SD	SD	Tresbolillo	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
0.0016	SD	50	5500	Alambre	SD	No	Manual	110	4.33	3.175	45	45	Alineados	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
0.0011	SD	50	6432.37	Barras de acero	4	larras de acer	Manual	SD	SD	6	50	50	Tresbolillo	NA	
0.0011	SD	50	6432.37	Barras de acero	4	larras de acer	Manual	SD	SD	6	50	50	Tresbolillo	NA	
0.0011	SD	50	6432.37	Barras de acero	4	larras de acer	Manual	SD	SD	6	50	50	Tresbolillo	NA	
0.0011	SD	50	6432.37	Barras de acero	4	larras de acer	Manual	SD	SD	6	50	50	Tresbolillo	NA	
0.0016	SD	50	5000	Alambre	SD	No	Manual	110	4.33	3.175	45	45	Alineados	NA	
0.0016	SD	50	5000	Alambre	SD	No	Manual	110	4.33	3.175	45	45	Alineados	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
0.0008	SD	50	5000	Alambre	SD	SD	Manual	117	4.61	1.65	20	20	Tresbolillo	Taquetes	
0.0008	SD	50	5000	Alambre	SD	SD	Manual	111	4.37	1.65	20	20	Tresbolillo	Taquetes	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
0.00054	0.6	50	5000	Alambre	SD	No	Manual	60	2.32	4	45	45	Tresbolillo	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
SD	SD	SD	SD	Alambre	SD	No	Manual	SD	SD	SD	45	45	Tresbolillo	NA	
SD	SD	SD	SD	Alambre	SD	No	Manual	SD	SD	SD	45	45	Tresbolillo	NA	
0.00051667	0.6	50	5000	Clavos para concreto	SD	No	Manual	63.5	2.50	5	45	45	Tresbolillo	NA	
0.00073667	0.6	50	5000	Clavos para concreto	SD	No	Manual	63.5	2.50	5	45	NA	Tresbolillo	NA	
0.00073667	0.6	50	5000	Clavos para concreto	SD	No	Manual	63.5	2.50	5	45	NA	Tresbolillo	NA	
0.00051667	0.6	50	5000	Clavos para concreto	SD	No	Manual	63.5	2.50	5	45	45	Tresbolillo	NA	
0.00073667	0.6	50	5000	Alambrón	SD	No	Manual	63.5	2.50	5	45	NA	Tresbolillo	NA	
0.00073667	0.6	50	5000	Clavos para concreto	SD	No	Manual	63.5	2.50	5	45	NA	Tresbolillo	NA	
0.00073667	0.6	50	5000	Clavos para concreto	SD	No	Manual	63.5	2.50	5	45	NA	Tresbolillo	NA	
0.00051667	0.6	50	5000	Clavos para concreto	SD	No	Manual	63.5	2.50	5	45	NA	Tresbolillo	NA	

DESARROLLO EXPERIMENTAL													
Carga lateral aplicada			Carga vertical aplicada										
Aplicación	Magnitud		Tipo	Aplicación	Magnitud		σ		FR	v'm		σ	
	t	kN			t	kN	kg/cm ²	MPa		kg/cm ²	Mpa	kg/cm ²	
Cíclica alternada	100	980.67	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	100	980.67	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	100	980.67	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	100	980.67	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	200	1961.33	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	200	1961.33	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	200	1961.33	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	200	1961.33	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	200	1961.33	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	200	1961.33	Gravitacional	Constante	36	353.3	5	0.49	NA	1	3.5	0.34	5
Cíclica alternada	20	196.13	Grav. Gatos Hidr.	Constante	13	127.53	5	0.49	13	1	4.67	0.48	5
Cíclica alternada	20	196.13	Grav. Gatos Hidr.	Constante	13	127.53	5	0.49	13	1	4.67	0.48	5
Cíclica alternada	20	196.13	Grav. Gatos Hidr.	Constante	13	127.53	5	0.49	13	1	4.67	0.48	5
Por deformación /Cíclica	100	980.67	Esfuerzo sobre cols	Constante	37	127.53	3	0.29	37	1	3.5	0.34	3.5
Por deformación /Cíclica	100	980.67	Esfuerzo sobre cols	Constante	37	127.53	3	0.29	37	1	3.5	0.34	3.5
Por deformación /Cíclica	100	980.67	Esfuerzo sobre cols	Constante	37	127.53	3	0.29	37	1	3.5	0.34	3.5
Por deformación /Cíclica	100	980.67	Esfuerzo sobre cols	Constante	37	127.53	3	0.29	37	1	3.5	0.34	3.5
Por desplazamiento	12.5 mm	12.5 mm	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD
Por desplazamiento	10 mm	10 mm	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD
Reversible - Distorsión angular	0.6	0.6	Gravitacional	Constante	-	-	2.5	0.25	SD	1	1.44	0.14	2.5
Reversible - Distorsión angular	0.8	0.8	Gravitacional	Constante	-	-	2.5	0.25	SD	1	1.44	0.14	2.5
Por distorsión	100	980.67	Grav. Gatos Hidr.	Constante	50	490.5	3.5	0.34	11.93	1	1.7	0.16	3.5
Por distorsión	100	980.67	Grav. Gatos Hidr.	Constante	50	490.5	3.5	0.34	11.93	1	1.7	0.16	3.5
Por distorsión	100	980.67	Grav. Gatos Hidr.	Constante	50	490.5	3.5	0.34	11.93	1	1.7	0.16	3.5
Por distorsión	100	980.67	Grav. Gatos Hidr.	Constante	50	490.5	3.5	0.34	11.93	1	1.7	0.16	3.5
Cíclica	50	980.67	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	2.41
Cíclica	50	980.67	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	2.41
Cíclica	50	980.67	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	2.41
Cíclica	50	980.67	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	2.41
Monotónica	50	980.67	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	2.41
Cíclica	50	980.67	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	2.41
Por desplazamiento	20 mm	20 mm	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	0	1	7.2	0.71	SD
Por desplazamiento	20 mm	20 mm	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	0	1	7.2	0.71	SD
Reversible	desplazamiento	desplazamiento	Gravitacional	Constante	SD	SD	5	0.49	25.44	1	4.66	0.46	5
Por desplazamiento	20 mm	20 mm	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	9.28	0.91	0.33
Por desplazamiento	20 mm	20 mm	Peso propio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	9.28	0.91	0.33
Reversible	101.94	1000	Gravitacional	Constante	50.97	500	10.2	1	50.97	SD	SD	SD	10.2
Reversible	101.94	1000	Gravitacional	Constante	50.97	500	10.2	1	50.97	SD	SD	SD	10.2
Reversible	101.94	1000	Gravitacional	Constante	50.97	500	10.2	1	50.97	SD	SD	SD	10.2
Reversible	101.94	1000	Gravitacional	Constante	50.97	500	10.2	1	50.97	SD	SD	SD	10.2
Reversible	101.94	1000	Gravitacional	Constante	50.97	500	5.1	0.5	50.97	SD	SD	SD	5.1
Reversible	101.94	1000	Gravitacional	Constante	50.97	500	5.1	0.5	50.97	SD	SD	SD	5.1
Reversible	101.94	1000	Gravitacional	Constante	50.97	500	5.1	0.5	50.97	SD	SD	SD	5.1
Reversible	101.94	1000	Gravitacional	Constante	50.97	500	5.1	0.5	50.97	SD	SD	SD	5.1
Por desplazamiento	20 mm	20 mm	Gravitacional	Constante	11	108	SD	SD	SD	1	8.97	0.88	SD
Por desplazamiento	20 mm	20 mm	Gravitacional	Constante	16	157	SD	SD	SD	1	8.97	0.88	SD
Sobre viga	101.94	1000	Peso propio	Constante	20.39	200	7.24	0.71	20.39	SD	SD	SD	SD
Sobre viga	101.94	1000	Peso propio	Constante	10.19	100	3.87	0.38	10.19	SD	SD	SD	SD
Sobre viga	101.94	1000	Peso propio	Constante	20.39	200	5.2	0.51	20.39	SD	SD	SD	SD
Sobre viga	101.94	1000	Peso propio	Constante	10.19	100	2.75	0.27	10.19	SD	SD	SD	SD
Mesa vibradora	5.98 cm/s	5.98 cm/s	Ninguna	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD
Mesa vibradora	26.89 cm/s	26.89 cm/s	Ninguna	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5
Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5
Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5
Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5
Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5
Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5
Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5
Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5
Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5

V _a teórico		Ciclos positivos										Ciclos negativos				
		V _{ap}					V _{mb}					V _{ap}				
		t	kN	t	kN	Dist %	Desp mm	TMG mm	t	kN	Dist %	Desp mm	t	kN	Dist %	Desp mm
66.9	655.9	35.6	349.2	0.2	SD	1.2	63.9	626.9	0.94	3.46	36.1	354.1	SD	SD	1.1	68.8
66.9	655.9	35.6	349.2	0.2	SD	5	63.9	626.9	0.94	3.46	36.1	354.1	SD	SD	21	68.8
66.9	655.9	35.6	349.2	0.2	SD	1.2	63.9	626.9	0.94	3.46	36.1	354.1	SD	SD	1.1	68.8
66.9	655.9	35.6	349.2	0.2	SD	5	63.9	626.9	0.94	3.46	36.1	354.1	SD	SD	21	68.8
66.9	655.9	35.6	349.2	0.21	SD	1.2	63.9	626.9	0.75	4.5	36.1	354.1	SD	SD	1.1	68.8
66.9	655.9	35.6	349.2	0.21	SD	5	63.9	626.9	0.75	4.5	36.1	354.1	SD	SD	21	68.8
66.9	655.9	35.6	349.2	0.21	SD	1.2	63.9	626.9	0.75	4.5	36.1	354.1	SD	SD	1.1	68.8
66.9	655.9	35.6	349.2	0.21	SD	5	63.9	626.9	0.75	4.5	36.1	354.1	SD	SD	21	68.8
31.1	304.98	28.7	281.5	0.21	0.51	3	42.4	415.9	0.6	1.5	32.4	317.8	0.29	0.51	3	SD
42.4	415.82	29.7	291.4	0.21	0.51	1.1	38.2	374.7	0.38	0.93	26.4	259.0	0.17	0.51	0.8	37.8
57.8	566.82	36.8	361.0	0.2	0.49	0.2	52.4	514.0	0.58	1.42	35.6	349.2	0.18	4.41	0.1	51.3
12.1	119	11.4	112	0.05	SD	1.1	27.9	273.699	0.15	SD	12.4	122	0.1	SD	1	23.65
69.7	684	58.8	577	0.1	SD	3	84.5	826	0.4	SD	64.3	631	0.2	SD	3	82.8
69.7	684	49	481	0.1	SD	5	77.4	759	0.52	SD	52.7	517	0.1	SD	5	77.3
69.7	684	52.4	514	0.071	SD	17	78.3	768	0.4	SD	55.1	541	0.13	SD	17	40
SD	SD	18.7	183.45	SD	SD	10	20.76	203.66	SD	9	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	14.5	142.25	SD	SD	Figuras	29.12	285.67	SD	15	SD	SD	SD	SD	SD	SD
23	226	9.92	97	0.053	SD	1.5	30	294	0.62	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
23	226	11.02	108	0.069	SD	0.3	27.02	265	0.61	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
6.41	62.9	7.3	71.6	0.05	SD	2.5	9.1	89.3	0.15	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
6.41	62.9	11.7	114.8	0.05	SD	2.5	14.75	144.7	0.18	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
13.9	136.4	29.5	289.4	0.12	SD	0.8	53.1	520.9	1.27	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
13.9	136.4	25	244.8	0.1	SD	0.6	45	441.5	0.53	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
4.31	42.28	4.12	40.42	SD	SD	10	4.64	45.52	SD	25.6	SD	SD	SD	SD	SD	4.3
5.85	57.39	4.97	48.76	SD	SD	15	5.06	49.64	SD	21.8	SD	SD	SD	SD	SD	5.42
7.73	75.83	4.45	43.65	SD	SD	14.4	4.53	44.44	SD	31.8	SD	SD	SD	SD	SD	4.49
9.27	90.94	SD	SD	SD	SD	15	5.71	56.02	SD	11.4	3.63	35.61	SD	10	15	3.63
3.42	33.55	5.6	54.94	SD	SD	30	8.57	84.07	SD	18.2	SD	SD	SD	SD	SD	5.07
6.84	67.10	SD	SD	SD	SD	SD	7.27	71.32	SD	14.5	6.81	66.81	SD	17.55	SD	7.92
10.8	105.91	14.1	138.27	SD	SD	5	14.85	145.63	0.5	12.5	-12.6	123.56	SD	5	16	SD
16	156.91	16.2	158.87	SD	SD	7.5	21.96	215.35	0.5	12.5	-17.6	172.6	SD	7.5	11	SD
23.235	228	19.95	195.64	0.073	SD	SD	38.84	380.89	0.403	SD	14.95	146.61	0.043	SD	SD	33.55
13.27	130.13	12.48	122.39	SD	SD	5	15.181	148.87	SD	5.028	SD	SD	SD	SD	SD	-20.054
19.31	189.27	19.8	194.17	SD	SD	5	19.065	285.03	SD	12.869	SD	SD	SD	SD	SD	-24.034
16.46	161.48	10.22	100.23	0.03	0.54	SD	19.28	189.14	0.21	3.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD
7.53	73.9	2.62	25.69	0.03	0.58	SD	9.03	88.54	0.38	6.88	SD	SD	SD	SD	SD	SD
13.77	135.1	5.30	51.96	0.04	0.7	SD	16.04	157.35	0.45	8.14	SD	SD	SD	SD	SD	SD
5.89	57.79	3.29	32.24	0.04	0.8	SD	6.67	65.46	0.39	7.09	SD	SD	SD	SD	SD	SD
37.10	363.96	21.13	207.31	0.02	0.45	SD	49.32	483.79	0.15	2.76	SD	SD	SD	SD	SD	SD
17.50	171.65	8.49	83.28	0.04	0.81	SD	23.16	227.18	0.46	8.42	SD	SD	SD	SD	SD	SD
33.29	326.54	16.38	160.67	0.04	0.68	SD	37.22	365.15	0.46	8.23	SD	SD	SD	SD	SD	SD
17.25	169.21	4.46	43.8	0.04	0.66	SD	21.27	208.62	0.94	17.19	SD	SD	SD	SD	SD	SD
21.31	209	32.73	321	0.65	15	0.7	32.73	321	0.65	15	SD	SD	SD	SD	SD	SD
22.43	220	42.22	414	0.65	15	1.3	42.22	414	0.65	15	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	8.16	80	SD	0.8	SD	19.17	188	0.36	8.4	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	9.59	94	SD	1.1	SD	13.15	129	0.15	3.6	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	26	255	SD	2.2	SD	40.58	398	0.67	15.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	17.23	169	SD	1.2	SD	34.06	334	0.36	8.5	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	7	5	SD	SD	SD	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	10.19	SD	SD	SD	SD	17	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	90.59	888.7	1.06	1.37	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	94.12	923.3	0.45	0.78	SD	SD	SD	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	102.74	1007.9	0.34	0.64	SD	SD	SD	SD	SD	SD
14.83	145.48	SD	SD	SD	SD	1.6	28.5	279.59	1.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
15.94	156.37	SD	SD	SD	SD	1.25	30.65	300.68	1.6	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
15.94	156.37	SD	SD	SD	SD	0.2	34.5	338.45	2.0	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
14.83	145.48	SD	SD	SD	SD	1.5	34.2	335.50	1.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
14.1	138.32	SD	SD	SD	SD	2	14.7	144.21	2.0	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
19.6	192.28	SD	SD	SD	SD	2.5	34.05	334.03	1.9	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
10.12	99.28	SD	SD	SD	SD	6	30.9	303.13	2.0	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
14.83	145.48	SD	SD	SD	SD	5	28.2	276.64	0.9	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

				Clasificación del daño	Mecanismo de falla observado			Calidad de la información	
Carga teórica		Final Experimental							Dist
kN	t	kN	%						
655.9	68.8	674.9	0.94	Severo	CT	-	-	MUY BUENA	
655.9	68.8	674.9	0.94	Severo	CT	-	-		
655.9	68.8	674.9	0.94	Severo	CT	-	-		
655.9	68.8	674.9	0.94	Severo	CT	-	-		
655.9	68.8	674.9	0.75	Severo	CT	-	-		
655.9	68.8	674.9	0.75	Severo	CT	-	-		
655.9	68.8	674.9	0.75	Severo	CT	-	-		
304.98	42.4	415.944	0.6	Grave	TD	-	-	MUY BUENA	
415.02	38.2	374.742	0.4	Ligero	TD	AP	-		
566.82	52.4	514.044	0.58	Moderado	RV	SC	-		
119	27.9	274	0.6	Severo	DPM	AP	CT	BUENA	
684	84.5	829	0.41	Moderado	AP	CT			
684	77.4	759	0.52	Severo	AP	CT			
684	78.3	768	0.4	Severo	DESA	AP	CT		
SD	20.76	203.66	SD	Severo	CT			BUENA	
SD	29.12	285.67	SD	Severo	FX				
226	30	294	0.62	Severo	TD			BUENA	
226	27.02	265	0.61	Severo	TD				
62.8	9.1	89.3	0.15	Moderado	CT			MUY BUENA	
62.8	14.8	145.2	0.18	Moderado	CT				
136.4	53.1	520.9	1.27	Moderado	DB				
136.4	45	440.5	0.53	Moderado	DB				
42.28	4.64	45.52	SD	Moderado				MALA	
57.39	5.06	49.64	SD	Muy grave					
75.83	4.54	44.54	SD	Ligero	DB				
90.94	5.71	56.02	SD	Ligero	DB				
33.55	8.57	84.07	SD	Ligero	DB	DESA	AP		
67.10	7.28	71.42	SD	Ligero	DB	DESA	AP		
105.91	14.85	145.63	0.5	Severo	CT	AP			
145.63	21.96	215.35	0.5	Moderado	FX	SC			
228	38.84	380.89	SD	Muy grave	DB			BUENA	
130.13	15.181	148.87	SD	Moderado	CT	AP		MUY BUENA	
189.27	29.065	285.03	SD	Moderado	FX	DB			
161.48	19.28	189.14	0.21	Severo	CT			MUY BUENA	
73.9	9.03	88.54	0.38	Severo	CT				
135.1	16.04	157.35	0.45	Severo	CT				
57.79	6.67	65.46	0.39	Severo	CT				
363.96	49.32	483.79	0.15	Moderado	FX	AP			
171.65	23.16	227.18	0.46	Moderado	FX	AP			
326.54	37.22	365.15	0.46	Moderado	FX	AP			
169.21	21.27	208.62	0.94	Moderado	FX	AP			
209	32.73	321	0.65	Muy grave	TD	DB	AP		
220	42.22	414	0.65	Muy grave	TD	DB	AP		
SD	19.17	188	0.36	SD	SD			MALA	
SD	13.15	129	0.15	SD	SD				
SD	40.58	398	0.67	SD	CT				
SD	34.06	334	0.36	SD	CT				
SD	SD	SD	SD	Severo	FX			MALA	
SD	SD	SD	SD	Ligero	NA				
SD	90.59	888.7	1.06	SD	CT			MUY MALA	
SD	94.12	923.3	0.45	SD	CT				
SD	102.74	1007.9	0.34	SD	CT				
145.48	28.5	279.59	1.0	Moderado	DB	FCC		MUY BUENA	
156.37	30.65	300.68	1.0	Moderado	DB	FCC			
156.37	34.5	338.45	1.0	Ligero	DB	FCC			
145.48	34.2	335.50	1.0	Moderado	DB	FCC			
138.32	14.7	144.21	1.0	Muy grave	DB	FCC			
192.28	34.05	334.03	1.0	Muy grave	DB	FCC			
99.28	30.9	303.13	1.0	Moderado	DB	FCC			
145.48	28.2	276.64	1.0	Moderado	DB	FCC			

Resistencia						Clasificación del daño	Mecanismo de falla observado	Calidad de la información
Dist	Final Teórica		Final Experimental		Dist			
%	t	kN	t	kN	%			
SD	4.69	46	6.57	64.5	0.8	Muy grave	DB	
SD	4.69	46	36.19	355	1	Moderado	DB	
SD	4.69	46	12.24	120	1	Muy grave	CT	AP
SD	4.69	46	46.49	456	1	Moderado	CT	
SD	9.89	97	11.42	112	1.3	Muy grave	TD	
SD	16.31	160	16.41	161	10.2	Moderado	AP	
SD	16.31	160	15.60	153	10.2	Moderado	AP	
SD	18.86	185	23.14	227	10.5	Moderado	AP	
SD	22.63	222	16.82	165	10.2	Moderado	AP	
SD	22.63	222	21.51	211	10.5	Moderado	AP	
SD	27.73	272	25.79	253	10.5	Moderado	AP	
SD	13.76	135	18.35	180	10.2	Moderado	AP	
SD	16.31	160	14.88	146	10.2	Moderado	AP	
SD	13.56	133	16.41	161	9.1	Moderado	DB	
SD	17.84	175	16.51	162	9.8	Moderado	DB	
SD	13.76	135	14.07	138	7	Moderado	AP	
SD	16.31	160	17.74	174	7.1	Moderado	AP	
SD	SD	SD	12.23	120	1.6	Muy grave	CT COL	AP
SD	4.89	48	16.21	159	5	Moderado	CT COL	
SD	20.18	198	20.29	199	7	Moderado	FX	
SD	21.41	210	23.65	232	7.3	Moderado	FX	
SD	21.41	210	23.75	233	6.1	Moderado	FX	
SD	23.04	226	23.24	228	7.5	Moderado	FX	
SD	23.04	226	23.65	232	6.8	Moderado	FX	
SD	24.67	242	24.57	241	5.2	Moderado	FX	
SD	24.67	242	23.75	233	5.8	Moderado	FX	
SD	SD	SD	18.86	185	7.2	Moderado	CT COL	
SD	SD	SD	21.20	208	7.5	Moderado	CT COL	
SD	SD	SD	22.32	219	7.5	Moderado	CT COL	
SD	SD	SD	22.02	216	7.5	Moderado	CT COL	

A.3 BANDAS DE POLIPROPILENO

INFORMACIÓN GENERAL						Especimen	Clasificación	Tipo
ID	Autor/es	País	Año	Institución	Normatividad			
1	P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2003	The University of Tokyo	SD	Bare wall	MS	TBR
	P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2003	The University of Tokyo	SD	Bare wall w/holes	MS	TBR
	P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2003	The University of Tokyo	SD	Bare wall w/mortar	MS	TBR
	P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2003	The University of Tokyo	SD	Reinforced wall	MS	TBR
	P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2003	The University of Tokyo	SD	Reinforced wall w/holes	MS	TBR
	P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2003	The University of Tokyo	SD	Reinforced wall w/mortar	MS	TBR
	P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2003	The University of Tokyo	SD	Reinforced wall	MS	TBR
	P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2003	The University of Tokyo	SD	Reinforced wall w/diagonal holes	MS	TBR
2	N. Sathiparan, P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2012	The University of Tokyo	SD	A-NR-X	MS	TBR
	N. Sathiparan, P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2012	The University of Tokyo	SD	A-RE-X	MS	TBR
	N. Sathiparan, P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2012	The University of Tokyo	SD	A-NR-P	MS	TBR
	N. Sathiparan, P. Mayorca, K. Meguro	Japón	2012	The University of Tokyo	SD	A-RE-P	MS	TBR

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO																
Dimensiones de la mampostería			Juntas de mortero				Escala	Modelo 3D	Crujías	Niveles	Altura	Largo	Relación de aspecto (H/L)	Aberturas - Ventanas		
Altura	Espesor	Longitud	Tipo	Proporciónamiento	kg/cm ²	MPa								Existencia	Cantidad	Ancho
cm										cm	cm				cm	
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA
SD	10	SD	SD	1.4.5	SD	SD	1.4	No	1	1	107.2	98.5	0.92	No	NA	NA

SD	5	SD	III	1.3	SD	SD	1.4	Sí	1	1	72	93.3	0.77	Sí	1	48.5
SD	5	SD	III	1.3	SD	SD	1.4	Sí	1	1	72	93.3	0.77	Sí	1	48.5
SD	5	SD	III	1.3	SD	SD	1.4	Sí	1	1	72	93.3	0.77	Sí	1	48.5
SD	5	SD	III	1.3	SD	SD	1.4	Sí	1	1	72	93.3	0.77	Sí	1	48.5

Aberturas - Puertas								Modo de falla esperado
Alto	Confinamiento	Existencia	Cantidad	Ancho	Alto	Confinamiento		
cm				cm	cm			

SISTEMA ESTRUCTURAL: CASTILLOS CONFINAMIENTO									
Castillos / Columnas	b	h	Grado del acero	Reinuerzo longitudinal		# Barras	Ø	#	mm
				f _y					
	cm	cm		kg/cm ²	MPa				

NA	NA	No	NA	NA	NA	NA	CT	NA								
NA	NA	No	NA	NA	NA	NA	CT	NA								
NA	NA	No	NA	NA	NA	NA	CT	NA								
NA	NA	No	NA	NA	NA	NA	CT	NA								
NA	NA	No	NA	NA	NA	NA	CT	NA								
NA	NA	No	NA	NA	NA	NA	CT	NA								
NA	NA	No	NA	NA	NA	NA	CT	NA								
NA	NA	No	NA	NA	NA	NA	CT	NA								
24.3	No	Sí	1	32.5	24.5	No	CT	NA								
24.3	No	Sí	1	32.5	24.5	No	CT	NA								
24.3	No	Sí	1	32.5	24.5	No	CT	NA								
24.3	No	Sí	1	32.5	24.5	No	CT	NA								

REINFORZAMIENTO DE ESQUINAS / COLUMNAS							
Grado del acero	Reinuerzo transversal		Ø	s (centro) [cm]	s (extrem) [cm]	f _t '	
	f _y						
	kg/cm ²	MPa	#	mm	cm	cm	kg/cm ²

SISTEMA ESTRUCTURAL: CASTILLOS CONFINAMIENTO									
b	h	Grado del acero	Reinuerzo longitudinal		# Barras	Ø	Grado del acero		
			f _y						
cm	cm		kg/cm ²	MPa		#	mm		

NA																
NA																
NA																
NA																
NA																
NA																
NA																
NA																

NA																
NA																
NA																
NA																

CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDAS																
Tipo 1	Anclaje								Conexión entre bandas				Continuidad de banda			
	Diámetro		Longitud		Tipo 2	Diámetro		Longitud		Soldadura	Tipo	Otro	Tipo	Extensión a castillos	# Castillos con extensión	
	mm	in	mm	in		mm	in	mm	in							
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Alambre	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	SI	Plástico	NA	NA	NA	NA	
Alambre	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	SI	Plástico	NA	NA	NA	NA	
Alambre	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	SI	Plástico	NA	NA	NA	NA	
Alambre	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	SI	Plástico	NA	NA	NA	NA	
Alambre	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	SI	Plástico	NA	NA	NA	NA	
Alambre	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	SI	Plástico	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Alambre	SD	SD	160	6.29	NA	NA	NA	NA	NA	SI	Plástico	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Alambre	SD	SD	160	6.29	NA	NA	NA	NA	NA	SI	Plástico	NA	NA	NA	NA	

Extensión a las bandas	RECURRIMIENTO ADICIONAL						PROPIEDADES MECÁNICAS								
	Aplanado						Modulo de elasticidad E_m								
	Material	Método de aplicación	f_f / t_c		Espesor CARA 1	Espesor CARA 2	$f_{máx}$		Teórico		Experimental		Teórico		Experimental
kg/cm ²			MPa	cm			cm	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa		
NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	Mortero	Manual	SD	0.8	0.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	Mortero	Manual	SD	SD	0.8	0.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	Mortero	Manual	SD	SD	0.8	0.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	Mortero	Manual	SD	SD	0.8	0.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	Mortero	Manual	SD	SD	0.8	0.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	Mortero	Manual	SD	SD	0.8	0.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	Mortero	Manual	SD	SD	0.8	0.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	Mortero	Manual	SD	SD	1	1	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	Mortero	Manual	SD	SD	1	1	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

DESARROLLO EXPERIMENTAL														
Material	V_m				Módulo de cortante G_m				Carga lateral aplicada					
	Teórico		Experimental		Teórico		Experimental		Tipo	Aplicación	Magnitud		Tipo	
MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	t			kN			
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	20 mm	ensión diagon	Pre-compresión
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	2	19.61	Ninguna
SD	SD	SD	SD	0.0581	0.0057	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	2	19.61	Ninguna
SD	SD	SD	SD	0.0693	0.0068	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	2	19.61	Ninguna
SD	SD	SD	SD	0.0622	0.0061	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	2	19.61	Ninguna
SD	SD	SD	SD	0.0571	0.0056	SD	SD	SD	SD	Lateral cíclica	Reversible	2	19.61	Ninguna

RESULTADOS TEÓRICOS - MODELOS															
Carga vertical aplicada					Resistencia al cortante lateral										
Aplicación	Magnitud		σ		Carga axial "pr"	FR	v_m		σ	V_{ult}		V_{band}		V_c	
	t	kN	kg/cm ²	MPa			t	kg/cm ²		Mpa	kg/cm ²	t	kN	t	kN
9e barras diag	0.9	9	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
9e barras diag	0.9	9	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
9e barras diag	0.9	9	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
9e barras diag	0.9	9	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
9e barras diag	0.9	9	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
9e barras diag	3	30	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
9e barras diag	3	30	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
9e barras diag	3	30	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

Aberturas - Puertas							SISTEMA ESTRUCTURAL: CASTILLOS CONFINAMIENTO DE ESQUINAS / COLUMNAS										
Confinamiento	Existencia	Cantidad	Ancho	Alto	Confinamiento	Modo de falla esperado	Castillos / Columnas	b	h	Grado del acero	f _y		# Barras	Ø		Grado del acero	f _y
			cm	cm				cm	cm		kg/cm ²	MPa		#	mm		

NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	16	24	SD	3875	380	4	12	12	SD	3467	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	16	24	SD	3875	380	4	12	12	SD	3467	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	16	24	SD	3875	380	4	12	12	SD	3467	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	Columnas	45	45	SD	3670	360	8	22	SD	SD	2650	

NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											
NA	No	NA	NA	NA	NA	TD	NA											

Refuerzo transversal						SISTEMA ESTRUCTURAL: CASTILLOS CONFINAMIENTO EN ABERTURAS												
f _y	Ø			s [centro] [cm]	s [extremo] [cm]	f _y	b	h	Grado del acero	f _y		# Barras	Ø		Grado del acero	f _y		#
	MPa	#	mm	cm	cm	kg/cm ²				kg/cm ²	MPa		#	mm		kg/cm ²	MPa	

NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
340	6	6	13	13	201.9	NA												
340	6	6	13	13	204.65	NA												
340	6	6	13	13	198.81	NA												
340	6	6	13	13	208.02	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												
260	6	SD	20	20	250	NA												

NA																		
NA																		
NA																		
NA																		
NA																		
NA																		
NA																		
NA																		
NA																		
NA																		
NA																		
NA																		

s	s (centro) [cm]	s (extremo) [cm]	f _r
mm	cm	cm	kg/cm ²

SISTEMA ESTRUCTURAL: DALIAS / VIGAS																							
Dalias / Vigas	b cm	h cm	Refuerzo longitudinal						Refuerzo transversal														
			Grado del acero		f _r		# Barras		Ø		Grado del acero		f _r		Ø								
			kg/cm ²	MPa	#	mm	#	mm	kg/cm ²	MPa	#	mm											

NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	24	24	SD	3875	380	6	12	12	SD	3467	340	6	6	6	6	6	6	6
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	24	24	SD	3875	380	6	12	12	SD	3467	340	6	6	6	6	6	6	6
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	24	24	SD	3875	380	6	12	12	SD	3467	340	6	6	6	6	6	6	6
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	24	24	SD	3875	380	6	12	12	SD	3467	340	6	6	6	6	6	6	6
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	Vigas	20	50	SD	3670	360	6	25	SD	SD	2650	260	10	SD	SD	SD	SD	SD	SD

NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							
NA																							

s (centro) [cm]	s (extremo) [cm]	f _r
cm	cm	kg/cm ²

SISTEMA ESTRUCTURAL: REFUERZO INTERIOR												
Refuerzo vertical						Refuerzo horizontal						f _r relleno kg/cm ²
# Barras	Ø	s	# Barras	Ø	s	# Barras	Ø	s	# Barras	Ø	s	
	#	mm	cm	#	mm	cm	#	mm	cm	#	mm	cm

DAÑO PREVIO					
Grietas en mampostería previas al ensaye	TMG	Grietas en castillos/cols previas al ensaye	TMG	Grietas en dalias/vigas previas al ensaye	TMG
	mm		mm		mm

NA	NA	NA	2	15 M	16	50	NA	NA	NA	NA	91.77	No	NA	No	NA	No	NA
NA	NA	NA	2	15 M	16	50	NA	NA	NA	NA	91.77	No	NA	No	NA	No	NA
13	13	201.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
13	13	204.65	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
13	13	196.81	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
13	13	208.02	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA
20	20	250	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	NA	No	NA	No	NA

NA	SI	SD	NA																				
NA	SI	SD	NA																				
NA	SI	SD	NA																				
NA	No	SD	NA																				
NA	SI	SD	NA																				
NA	SI	22	NA																				
NA	SI	38	NA																				
NA	No	SD	NA																				
NA	No	SD	NA																				
NA	No	SD	NA																				
NA	No	SD	NA																				
NA	No	SD	NA																				
NA	No	SD	NA																				

Clasificación del daño previo a la prueba	REPARACIÓN DE GRIETAS					REPARACIÓN / ADICIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO						Material				No. Caras encamiciadas	Presencia
	Preparación/Limpieza del muro	Inyección		Rajoleo	Adición de castillos / columnas	Adición de dalas/vigas	Reparación de castillos / columnas	f'c	Reparación de dalas / vigas	f'c	Material	E _{mp}		No. Caras encamiciadas			
		Presencia	Proporción									kg/cm ²	Mpa				

NA	CFRP	2345347.29	230000	1	No													
NA	CFRP	2345347.29	230000	2	Sí													
NA	CFRP	2345347.29	230000	2	Sí													
NA	CFRP	2488107	244000	2	Sí													
NA	CFRP	2488107	244000	2	Sí													
NA	CFRP	2488107	244000	2	Sí													
NA	CFRP	2488107	244000	2	Sí													
NA	CFRP	2488107	244000	2	Sí													
NA	CFRP	2488107	244000	2	Sí													
NA	CFRP	2488107	244000	2	Sí													

Muy grave	No	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	GFRPLR	124507	12210	1	No
Muy grave	No	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Muy grave	No	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	GFRPLR	124507	12210	1	No
NA	No	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Muy grave	No	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	GFRPLR	124507	12210	1	No
Muy grave	No	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Muy grave	No	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	No	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	GFRPLR	124507	12210	1	No
NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	MAS	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	GFRPHR	949359	93100	1	No
NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	GFRPHR	949359	93100	1	No
NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	GFRPHR	949359	93100	2	No
NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	No	NA	NA	NA	NA	NA	GFRPHR	949359	93100	2	No

CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDAS																		
Banda diagonal		Bandas verticales				Bandas horizontales				Anclaje								
Ancho	Espesor	Presencia	Ancho	Espesor	Presencia	Ancho	Espesor	Tipo 1	Diámetro		Longitud		Tipo 2	Diámetro		Longitud		Extensión a castillos / col
mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	in	mm	in		mm	in	mm	in	

NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	No	NA	NA	Sí	Hojas	1	Anclas FRP	SD	SD	100	4	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
300	0.166	No	NA	NA	No	NA	NA	Anclas FRP	100	3.9	120	4.7	Clavos	100	3.9	70	2.75	Sí
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
300	0.166	No	NA	NA	No	NA	NA	Anclas FRP	100	3.9	120	4.7	Clavos	100	3.9	70	2.75	Sí
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
778.4	0.167	No	NA	NA	No	NA	NA	Pasadores	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	
778.4	0.167	No	NA	NA	No	NA	NA	Pasadores	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
778.4	0.167	No	NA	NA	No	NA	NA	Pasadores	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	
778.4	0.167	No	NA	NA	No	NA	NA	Pasadores	SD	SD	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	

NA	NA	Sí	900	0.13	No	NA											
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	Sí	900	0.13	No	NA											
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	Sí	900	0.13	No	NA											
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	Sí	600	0.169	No	NA											
NA	NA	Sí	600	0.169	No	NA											
NA	NA	Sí	600	0.169	No	NA											
NA	NA	Sí	600	0.169	No	NA											

Unidad de bandas						RECUBRIMIENTO ADICIONAL						f _m			
# Castillos con extensión	Extensión a dalas / vigas	Presencia	Tipo	E		Material	Método de aplicación	f _t / f _c		Espesor CARA 1	Espesor CARA 2	f _m		f _m	
				kg/cm ²	MPa			kg/cm ²	MPa			kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa

NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	166.77	17	SD	SD	166.77	17
NA	NA	SI	Epóvica	SD	SD	NA	NA	NA	NA	NA	NA	166.77	17	SD	SD	166.77	17

NA	NA	NA	NA	35690	3500	NA	NA	NA	NA	NA	NA	156.02	15.3	SD	SD	156.02	15.3
2	SI	SI	Epóvica	35690	3500	Yeso	Manual	56	5.5	10	10	156.02	15.3	SD	SD	156.02	15.3
NA	NA	NA	NA	35690	3500	NA	NA	NA	NA	NA	NA	156.02	15.3	SD	SD	156.02	15.3
2	SI	SI	Epóvica	35690	3500	Yeso	Manual	56	5.5	10	10	156.02	15.3	SD	SD	156.02	15.3

2	No	No	NA	101.972	10	NA	NA										
2	SI	No	NA	101.972	10	NA	NA										
2	No	No	NA	101.972	10	NA	NA										
2	No	No	NA	101.972	10	NA	NA										
2	SI	No	NA	101.972	10	NA	NA										
NA	No	No	NA	101.972	10	NA	NA										
2	No	No	NA	101.972	10	NA	NA										
2	No	No	NA	101.972	10	NA	NA										
2	SI	No	NA	101.972	10	NA	NA										
NA	No	No	NA	101.972	10	NA	NA										
2	No	No	NA	101.972	10	NA	NA										

NA	NA	SI	Epóvica	SD	SD	Ninguno	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	SI	Epóvica	SD	SD	Ninguno	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	SI	Epóvica	SD	SD	Ninguno	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	SI	Epóvica	SD	SD	Ninguno	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	Mortero	Manual	14.88	1.46	4	4	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	SI	Epóvica	SD	SD	Ninguno	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	Ninguno	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	SI	Epóvica	SD	SD	Ninguno	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD
NA	NA	NA	NA	NA	NA	Ninguno	NA	NA	NA	NA	NA	SD	SD	100	10	SD	SD

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA												DE					
Módulo de elasticidad E _m						V _m		Módulo de cortante G _m				Carga lateral aplicada					
Teórico		Experimental		Teórico		Experimental		Teórico		Experimental		Tipo		Aplicación		Magnitud	
kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa			t	kN

SD	Lateral cíclica	Reversible	10.19	100													
SD	Lateral cíclica	Reversible	10.19	100													

SD	Lateral cíclica	Reversible	50	500													
SD	Lateral cíclica	Reversible	50	500													
SD	Lateral cíclica	Reversible	50	500													
SD	Lateral cíclica	Reversible	50	500													

22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE
22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE
22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE
22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE
22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE
22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE
22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE
22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE
22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE
22943.61	2250	NA	NA	SD	SD	NA	NA	SD	SD	NA	NA	Triangular invertida	Lateral	E.LIMITE	E.LIMITE

SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									
SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									
SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									
SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									
SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									
SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									
SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									
SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									
SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									
SD	SD	18426.27	1807	SD	Lateral cíclica	70 % de Pu	Desplaz	Desplaz									

V _{res}			Ciclos negativos										Rigidez					
			V _{ap}				V _{res}						Inicial Teórica (Original)		Inicial Experimental (Original)		Final Teórica	
kN	Dist %	Desp mm	t	kN	Dist %	Desp mm	TMG mm	t	kN	Dist %	Desp mm	t/cm	kN/cm	t/cm	kN/cm	t/cm	kN/cm	t/cm

SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
174	1	SD																

152.4	7.6	34	SD	31.82	312	40.77															
339.8	3.6	40	SD	42.52	417	47.91															
66.3	6.6	33	SD	15.7	154	13.05															
94	12.6	120	SD	17.03	167	13.56															

SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				
SD																				

247	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
423	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
573	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
363	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
402	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
341	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
482	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
370	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
350	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
300	SD	7.4	SD																	
330	SD	9.1	SD																	
430	SD	12.8	SD																	
480	SD	12.4	SD																	

Resistencia											Clasificación del daño	Mecanismo de falla observado	Calidad de la información
Experimental	Inicial Teórica (Original)		Inicial Experimental (Original)		Dist	Final Teórica		Final Experimental		Dist			
	kN/cm	t	kN	t		kN	%	t	kN		t	kN	%

SD	SD	SD	SD	SD	SD	-	-	12.23	120	0.8	Muy grave	TD			REGULAR
SD	SD	SD	SD	SD	SD	12.23	120	17.74	174	1	Moderado	AP			REGULAR

400	SD	SD	SD	SD	SD	13.6	133.4	15.54	152.4	7.6	Muy grave	AP	CT V Y C		BUENA
470	SD	SD	SD	SD	SD	25.35	248.6	34.64	339.8	3.6	Muy grave	AP	DESA		BUENA
128	SD	SD	SD	SD	SD	5.67	55.6	6.76	66.3	6.6	Moderado	AP	FX		BUENA
133	SD	SD	SD	SD	SD	10.65	104.4	9.59	94	12.6	Moderado	AP	DESA		BUENA

SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	SD	SD	0.041	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	SD	SD	0.044	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	96.87	950.2947	0.026	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	101.97	1000.3257	0.04	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	SD	SD	0.041	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	SD	SD	0.041	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	132.56	1300.4136	0.0168	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	134.6	1320.426	0.04	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	SD	SD	0.04	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	SD	SD	0.041	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	132.56	1300.4136	0.0168	NA				MALA
SD	SD	SD	SD	SD	0.0166	SD	SD	127.46	1250.3826	0.026	NA				MALA

SD	SD	SD	SD	SD	-	7.75	76	25.18	247	SD	Severo	TD	RUP GPFR		BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	14.37	141	43.12	423	SD	Moderado	TD			BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	15.60	153	58.41	573	SD	Severo	TD	RUP GPFR		BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	12.95	127	37	363	SD	Moderado	TD			BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	18.86	185	40.97	402	SD	Severo	TD	RUP GPFR		BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	9.68	95	34.76	341	SD	Moderado	FFP			BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	11.82	116	49.13	482	SD	Moderado	DB			BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	25.99	255	37.73	370	SD	Severo	TD	AP		BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	25.99	255	56.08	550	SD	Moderado	TD			BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	25.99	255	30.59	300	SD	Severo	TD			BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	25.99	255	38.74	380	SD	Severo	TD			BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	25.99	255	43.84	430	SD	Severo	TD			BUENA
SD	SD	SD	SD	SD	-	25.99	255	48.94	480	SD	Severo	DB			BUENA

A.5 TEXTILES ESTRUCTURALES

INFORMACIÓN GENERAL											Especimen	Clasificación		Tipo																			
ID	Autor/es	País	Año	Institución	Normatividad	Dimensiones de la mampostería		Juntas de mortero				Escala	Modelo 3D	Crujias	Niveles	Altura	Largo	Relación de aspecto (H/L)	Existencia	Cantidad	Ancho	Alto											
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm											
1	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017 / RCDF 2016																												
CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO											SISTEMA ESTRUCTURAL: CASTILLOS CONFINAMIENTO DE ESQUINAS / COLUMNAS																						
Aberturas - Puertas			Modo de falla esperado				Referencia longitudinal																										
Confinamiento	Existencia	Cantidad	Ancho	Alto	Confinamiento	Modo de falla esperado	Castillos / Columnas	b	h	Grado del acero	f_y	# Barras	ϕ	Grado del acero	f_y	#	mm	Grado del acero	f_y	#	mm	Grado del acero	f_y										
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	kg/cm ²	MPa	#	mm	kg/cm ²	MPa	#	mm	kg/cm ²	MPa	#	mm	kg/cm ²	MPa										
NA	No	NA	NA	NA	NA	CT	Castillos	12	20	42	4200	412	4	4	12.7	SD	2530																
SISTEMA ESTRUCTURAL: CASTILLOS CONFINAMIENTO EN ABERTURAS											SISTEMA ESTRUCTURAL: DALAS / VIGAS																						
Refruerzo transversal						Refruerzo longitudinal						Refruerzo transversal																					
f_c'	ϕ	s (centro)	s (extremo)	f_c'	b	h	Grado del acero	f_y	# Barras	ϕ	Grado del acero	f_y	#	mm	Grado del acero	f_y	#	mm	Grado del acero	f_y	#	mm											
kg/cm ²	mm	cm	cm	kg/cm ²	cm	cm	kg/cm ²	MPa	#	mm	kg/cm ²	MPa	#	mm	kg/cm ²	MPa	#	mm	kg/cm ²	MPa	#	mm											
250	2	6.3	15	150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA											
SISTEMA ESTRUCTURAL: REFUERZO INTERIOR											DAÑO PREVIO																						
Refruerzo vertical			Refruerzo horizontal			f_c' relleno		Grietas en mampostería previas al ensaye					TMG	Grietas en castillos/cobos previas al ensaye		TMG	Grietas en dalas/vigas previas al ensaye																
# Barras	ϕ	s	# Barras	ϕ	s	f_c' relleno	Grietas en mampostería previas al ensaye	TMG	Grietas en castillos/cobos previas al ensaye	TMG	Grietas en dalas/vigas previas al ensaye																						
#	mm	cm	#	mm	cm	kg/cm ²	Si	mm	Si	mm	Si																						
15	15	150	NA	NA	NA	NA	Si	11	Si	3	Si																						
REPARACIÓN DE GRIETAS											REPARACIÓN / ADICIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO																						
TMG		Clasificación del daño previo a la prueba		Preparación / Limpieza del muro			Inyección			Rajueleo			Adición de castillos / columnas			Adición de dalas / vigas			Reparación de castillos / columnas			f_c'		Reparación de dalas / vigas		f_c'		No. Caras encamizadas		Mortero / Concreto		Tipo	
mm																																	
5	Moderado			Si	Si	1:3	No	NA	No	No	No	NA	No	NA	1	Mortero	Industrializado																
CARACTERÍSTICAS DEL REFUERZO											PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA																						
Características del mortero / concreto				Características de la malla textil				Anclaje			f_m'				f_m'				Modulo de elasticidad														
f_y / f_c'	espa primer (espeso recubrimiento)	espa	espa	Tipo de fibra	Tipo	Cantidad	Separación	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'	f_m'				
kg/cm ²	MPa	cm	cm				cm	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa				
SD	SD	0.5	0.5	Vidrio	Fibra de vidrio	4	100	47.66	4.67	24.78	2.43	34.36	3.36	20442	2004.67																		
DESARROLLO EXPERIMENTAL											DESARROLLO EXPERIMENTAL																						
Módulo de cortante G_m						Carga lateral aplicada						DESARROLLO EXPERIMENTAL																					
Experimental		Teórico		Experimental		Teórico		Experimental		Tipo		Aplicación		Magnitud		Tipo																	
kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa																
20616	2021.74	7.88	0.77	5.98	0.58	4088.4	400.93	4123.2	404.35	Lateral cíclica	Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional																			

Carga vertical aplicada					RESULTADOS TEÓRICOS - MODELOS												
Aplicación	Magnitud		σ		Carga axial "p"	FR	Resistencia al cortante lateral								Resistencia		
	t	kN	kg/cm ²	MPa			v'm	σ	V_{te}		V_c		V_R			FR	
Constante	SD	SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5	9.43	92.47	NC	NC	13.54	132.78	1	
Resistencia a cortante por flexión		Resistencia a flexocompresión			Resistencia a cargas verticales		Ciclos positivos										
M_b		P_u	M_R		P_R		V_{agr}					V_{nda}					
t-m	kN-m	t	t-m	kN-m	t	kN	t	kN	Dist %	Desp mm	TMG mm	t	kN	Dist %	kN	Dist %	
50.78	497.98	15	55.41	543.39	61.22	600.36	19.97	195.84	SD	SD	SD	SD	SD	2	24.8	243.2	1.7
Ciclos negativos										Rigidez							
V_{agr}					V_{nda}					Inicial Teórica (Original)		Inicial Experimental (Original)		Final Teórica		Final Experimental	
Desp mm	t	kN	Dist %	Desp mm	TMG mm	t	kN	Dist %	Desp mm	t/cm	kN/cm	t/cm	kN/cm	t/cm	kN/cm	t/cm	kN/cm
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	32.5	318.72	70	686.7	SD	SD	75	735.75
Resistencia										Clasificación del daño	Mecanismo de falla observado	Calidad de la información					
Inicial Teórica (Original)		Inicial Experimental (Original)		Dist	Final Teórica		Final Experimental		Dist								
t	kN	t	kN	%	t	kN	t	kN	%	Moderado	DB	TD	MUY BUENA				
9.43	92.47	SD	SD	SD	19.97	195.84	24.8	243.2	1.7								

A.6 MORTEROS REFORZADOS CON FIBRAS

INFORMACIÓN GENERAL											Especimen	Clasificación	Tipo	Dimensiones de la muestra	
ID	Autor/es	País	Año	Institución	Normatividad	Altura	Espesor								
								cm	cm						
1	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017	M5R	MC	TBR	5.5	12					
	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017	M7R	MC	TBR	5.5	12					
	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017	M11R	MC	TBR	5.5	12					
	H. Guerrero, C. Lubin	México	2021	CENAPRED. Instituto de Ingeniería UNAM	NTC-2017	M12R	MC	TBR	5.5	12					
2	L. Flores, M. Pacheco, J. Carrillo	México	2012	CENAPRED	NTC-2004	ME11-R	MC	TAH	13	12					

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES GENERALES DEL MODELO																	
Longitud	Juntas de mortero				Escala	Modelo 3D	Crujidas	Niveles	Altura	Largo	Relación de aspecto (H/L)	Aberturas - Ventanas					
	Tipo	Proporciónamiento	kg/cm ²	MPa								Existencia	Cantidad	Ancho	Alto	Confinamiento	Existencia
23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92	No	NA	NA	NA	NA	No
23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92	No	NA	NA	NA	NA	No
23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92	No	NA	NA	NA	NA	No
23.5	I	1:3	132.4	12.98	1:1	No	1	1	230	250	0.92	No	NA	NA	NA	NA	No
23	II	1:3	62	6	1:1	No	1	1	250	418	0.60	No	NA	NA	NA	NA	No

SISTEMA ESTRUCTURAL: CASTILLOS CONFINAMIENTO DE ESQUINAS / COLUMNAS																	
Aberturas - Puertas					Modo de falla esperado	Castillos / Columnas	b	h	Refuerzo longitudinal				Refuerzo transversal				
Cantidad	Ancho	Alto	Confinamiento	Grado del acero					f _y	# Barras	Ø	Grado del acero	f _y	#	Grado del acero	f _y	#
NA	NA	NA	NA	CT	Castillos	12	20	42	4200	412	4	4	12.7	SD	2530	250	2
NA	NA	NA	NA	CT	Castillos	12	20	42	4200	412	4	4	12.7	SD	2530	250	2
NA	NA	NA	NA	CT	Castillos	12	20	42	4200	412	4	4	12.7	SD	2530	250	2
NA	NA	NA	NA	CT	Castillos	12	20	42	4200	412	4	4	12.7	SD	2530	250	2
NA	NA	NA	NA	CT	Castillos	12	15	42	4200	412	4	4	12.7	SD	2100	210	2

SISTEMA ESTRUCTURAL: CASTILLOS CONFINAMIENTO EN ABERTURAS																	
Espesor	s (centro)	s (extremo)	f _c	b	h	Refuerzo longitudinal				Refuerzo transversal							
						Grado del acero	f _y	# Barras	Ø	Grado del acero	f _y	#	s (centro)				
6.3	15	15	150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
6.3	15	15	150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
6.3	15	15	150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
6.3	15	15	150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
6.3	18	18	200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

SISTEMA ESTRUCTURAL: DALAS / VIGAS																	
s (extremo)	f _c	Dalas / Vigas	b	h	Refuerzo longitudinal				Refuerzo transversal								
					Grado del acero	f _y	# Barras	Ø	Grado del acero	f _y	#	s (centro)					
NA	NA	Dala	12	30	42	4200	412	4	3	9.5	SD	2530	250	2	6.3	15	15
NA	NA	Dala	12	30	42	4200	412	4	3	9.5	SD	2530	250	2	6.3	15	15
NA	NA	Dala	12	30	42	4200	412	4	3	9.5	SD	2530	250	2	6.3	15	15
NA	NA	Dala	12	30	42	4200	412	4	3	9.5	SD	2530	250	2	6.3	15	15
NA	NA	Dala	12	15	42	4200	412	4	3	9.5	SD	2100	210	2	6.3	18	18

SISTEMA ESTRUCTURAL: REFUERZO INTERIOR										DAÑO PREVIO							
f _c	Refuerzo vertical				Refuerzo horizontal				f _c relleno	Grietas en mampostería previas al ensayo	TMG	Grietas en castillos/cols previas al ensayo	TMG	Grietas en dalas/vigas previas al ensayo	TMG	Clasificación del daño previo a la prueba	
	# Barras	Ø	s	# Barras	Ø	s	#	mm									mm
150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Si	7	Si	SD	No	SD	Moderado
150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Si	9	Si	SD	No	SD	Moderado
150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Si	7.2	Si	SD	Si	SD	Moderado
150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Si	8.1	Si	SD	Si	SD	Moderado
200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Si	100	Si	100	No	NA	Severo

REPARACIÓN DE GRIETAS					REPARACIÓN / ADICIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO										Características del mortero			
Preparación/ Limpieza del mur	Inyección				Adición de casillitos / columnas	Adición de dalas/vigas	Reparación de casillitos /columnas	f'_c		Reparación de dalas / vigas	f'_c		No. Caras encamisadas	Material empleado	Método de aplicación	f _y kg/cm ²		
	Presencia	Proporción	Resina epoxi	Rajuelo				kg/cm ²	Tipo		kg/cm ²	Tipo						
SI	SI	1:3	No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	Mortero	Manual	155.9		
SI	SI	1:3	No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	Mortero	Manual	155.9		
SI	SI	1:3	No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	Mortero	Manual	155.9		
SI	SI	1:3	No	NA	No	No	No	NA	NA	No	NA	NA	1	Mortero	Manual	155.9		
SI	SI	1:3	No	SI	NA	NA	SI	200	II	No	NA	NA	1	Mortero	Manual	93		

CARACTERÍSTICAS DEL REFUERZO							PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA										
/ concreto			Características de la fibra			Características del encamisado		f_{max}		f_m				Modulo de elasticidad E_m			
f'_c	Tipo / Clase	Proporción	Fibra	Dosisificación fibra kg/m ³	Espesor CARA 1 cm	Espesor CARA 2 cm	f_{max}		Teórico		Experimental		Teórico		Experimental		
							kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	
15.28	I	1:3	Metálica	30	2.5	NA	47.66	4.67	24.78	2.43	34.36	3.36	20442	2004.67	20616	2021.74	
15.28	I	1:3	intéticas (vidri	15	2.5	NA	47.66	4.67	24.78	2.43	34.36	3.36	20442	2004.67	20616	2021.74	
15.28	I	1:3	intéticas (vidri	15	0.5	NA	47.66	4.67	24.78	2.43	34.36	3.36	20442	2004.67	20616	2021.74	
15.28	I	1:3	Metálica	30	0.5	NA	47.66	4.67	24.78	2.43	34.36	3.36	20442	2004.67	20616	2021.74	
9.1	II	1:3	Metálica	40	3	NA	102	10	60	5.88	75	7.35	36000	3670	49259	4830	

MPOSTERÍA								DESARROLLO EXPERIMENTAL							
V_{max}				Módulo de cortante G_m				Carga lateral aplicada				Carga vertical aplicada			
Teórico		Experimental		Teórico		Experimental		Tipo	Aplicación	Magnitud		Tipo	Aplicación	Magnitud	
kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa			t	kN				t
7.88	0.77	5.98	0.58	4088.4	400.93	4133.2	404.35	Lateral cíclica	Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	
7.88	0.77	5.98	0.58	4088.4	400.93	4133.2	404.35	Lateral cíclica	Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	
7.88	0.77	5.98	0.58	4088.4	400.93	4133.2	404.35	Lateral cíclica	Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	
7.88	0.77	5.98	0.58	4088.4	400.93	4133.2	404.35	Lateral cíclica	Reversible	Distorsión	Distorsión	Gravitacional	Constante	SD	
5.5	0.53	5.5	0.53	7200	734	11253	1103.54	Lateral cíclica	Reversible	(desplazamiento)	(desplazamiento)	Gravitacional	Constante	SD	

RESULTADOS TEÓRICOS - MODELOS																
Carga axial			Resistencia al cortante lateral										Resistencia a cortante por flexión			
Magnitud	σ		FR	v_m		σ	V_{max}		V_c		V_R		FR	M_b		
	kN	kg/cm ²		MPa	kg/cm ²		MPa	t	kN	t	kN	t		kN	t-m	kN-m
SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5	9.43	92.47	NC	NC	13.54	132.78	1	50.78	497.98
SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5	9.43	92.47	NC	NC	13.54	132.78	1	50.78	497.98
SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5	9.43	92.47	NC	NC	13.54	132.78	1	50.78	497.98
SD	SD	SD	15	1	5.98	0.58	5	9.43	92.47	NC	NC	13.54	132.78	1	50.78	497.98
SD	5	0.49	25.44	1	5.47	0.54	5	21.24	208.29	12.1	119	22.72	222	SD	SD	SD

Resistencia a flexocompresión		Resistencia a cargas verticales		Ciclos positivos														
P_u	M_R	P_R		V_c teórico		V_{gr}						V_{max}						
t	t-m	kN-m	t	kN	t	kN	t	kN	Dist %	Desp mm	TMG mm	t	kN	Dist %	Desp mm	t	kN	
15	55.41	543.39	61.22	600.36	19.55	191.79	SD	SD	SD	SD	SD	6	25	245.25	1.8	SD	SD	SD
15	55.41	543.39	61.22	600.36	19.6	192.28	SD	SD	SD	SD	SD	10	30	294.30	1.8	SD	SD	SD
15	55.41	543.39	61.22	600.36	19.6	192.28	SD	SD	SD	SD	SD	2.5	34.05	334.03	1.9	SD	SD	SD
15	55.41	543.39	61.22	600.36	10.12	99.28	SD	SD	SD	SD	SD	6	30.9	303.13	2.0	SD	SD	SD
SD	SD	SD	SD	SD	22.72	222	17.5	171.62	0.033	SD	SD	41	402.07	0.28	SD	15	147.1	

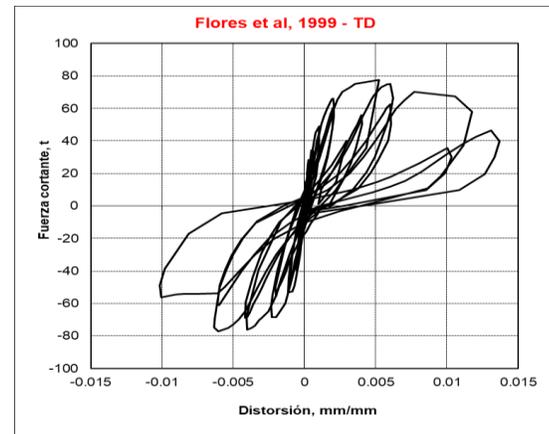
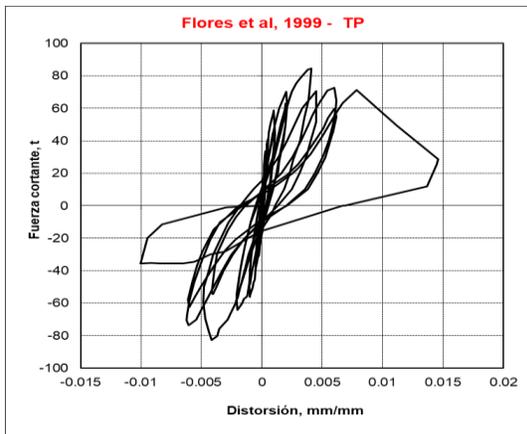
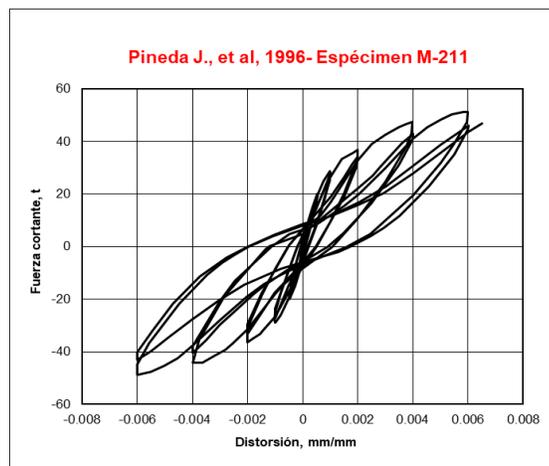
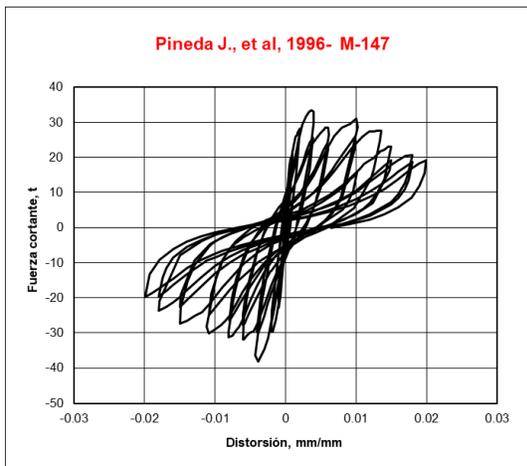
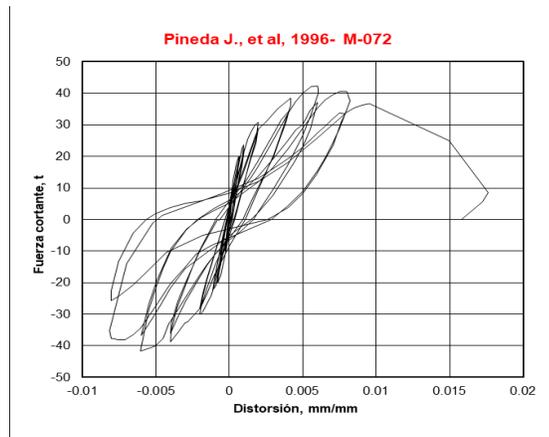
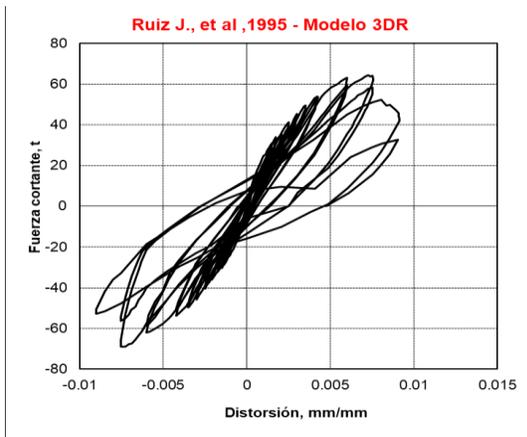
Ciclos negativos								Rigidez											
V_{gr}				V_{max}				Inicial Teórica (Original)		Inicial Experimental (Original)		Final Teórica		Final Experimental		Inicial Teórica (Original)		Inicial Exp (Original)	
Dist %	Desp mm	TMG mm	t	kN	Dist %	Desp mm	t/cm	kN/cm	t/cm	kN/cm	t/cm	kN/cm	t/cm	kN/cm	t	kN	t		
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	32.5	318.72	70	686.7	SD	SD	95	931.95	9.43	92.47	SD		
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	32.5	318.72	65	637.65	SD	SD	100	981	9.43	92.47	SD		
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	32.5	318.72	125	1226.25	SD	SD	130	1274.86	9.43	92.47	SD		
SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	32.5	318.72	80	784.8	SD	SD	120	1176.8	9.43	92.47	SD		
0.05	SD	SD	34.65	339.8	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	315.9	3089.1	SD	SD	SD	SD	35	

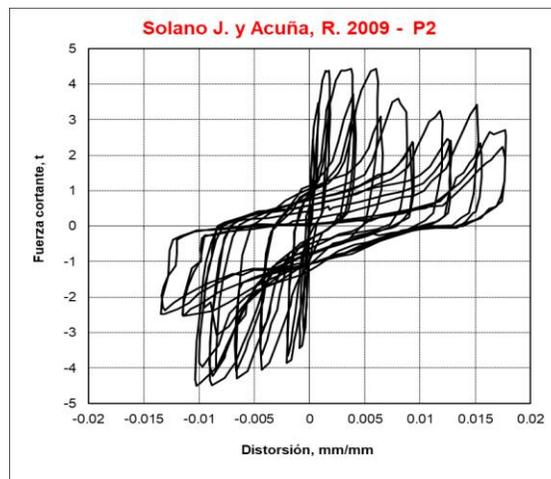
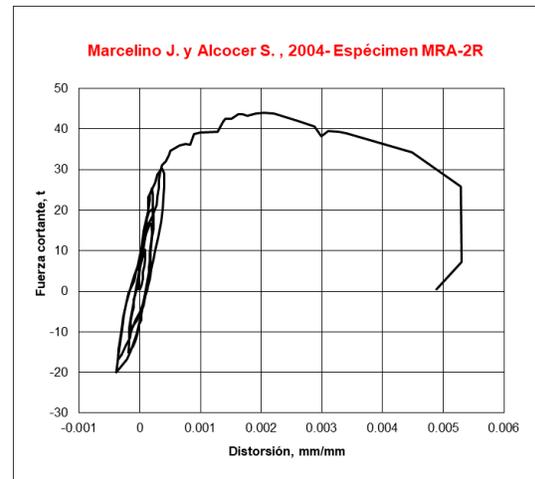
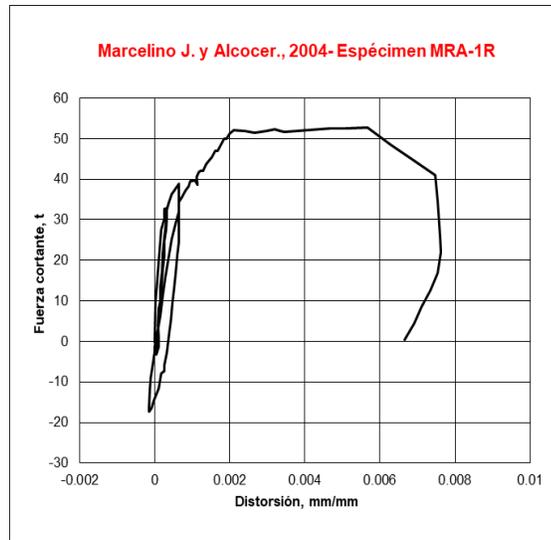
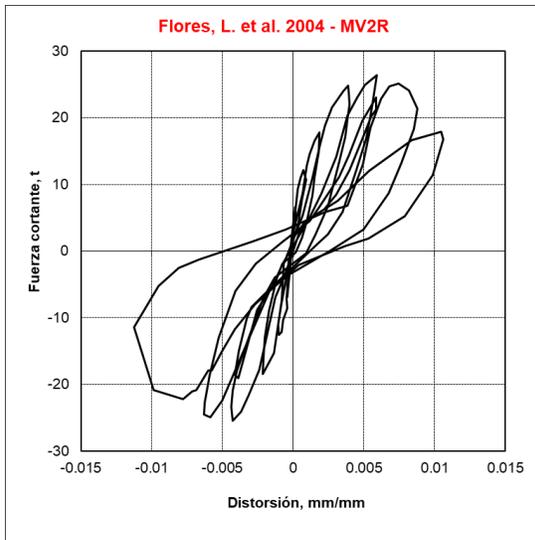
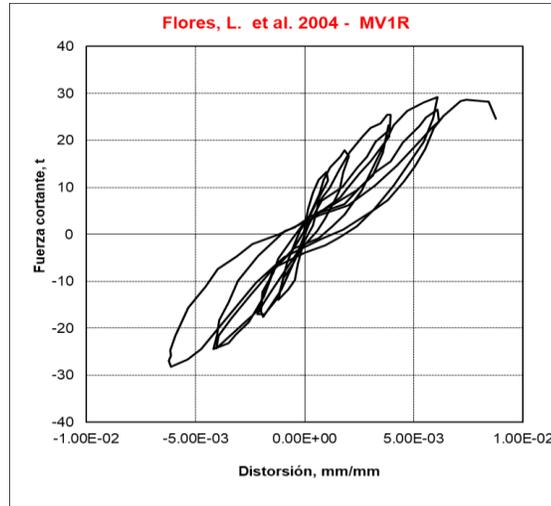
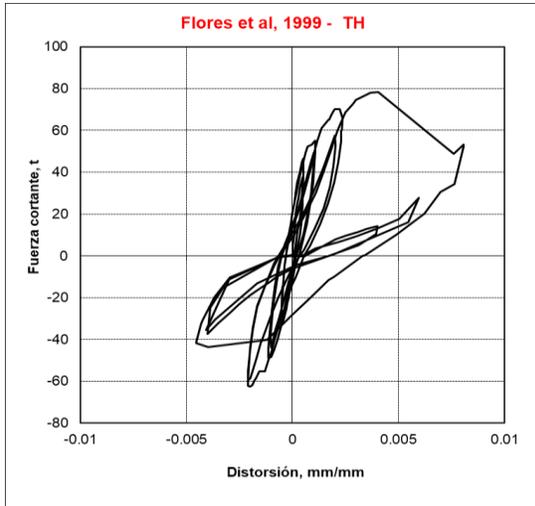
Resistencia										Calificación del daño	Mecanismo de falla observado	Calidad de la información
Experimental (Final)	Dist	Final Teórica		Final Experimental		Dist						
kN	%	t	kN	t	kN	%						
SD	SD	19.55	191.79	25	245.25	1.8	Muy grave	DB	FCC	CT		
SD	SD	19.6	192.28	30	294.30	1.8	Severo	DB	FCC	TD		
SD	SD	19.6	192.28	34.05	334.03	1.9	Muy grave	DB	FCC			MUY BUENA
SD	SD	10.12	99.28	30.9	303.13	2.0	Moderado	DB	FCC			
343.23	0.35	22.72	222	41	402.07	0.28	Muy grave	CT				BUENA

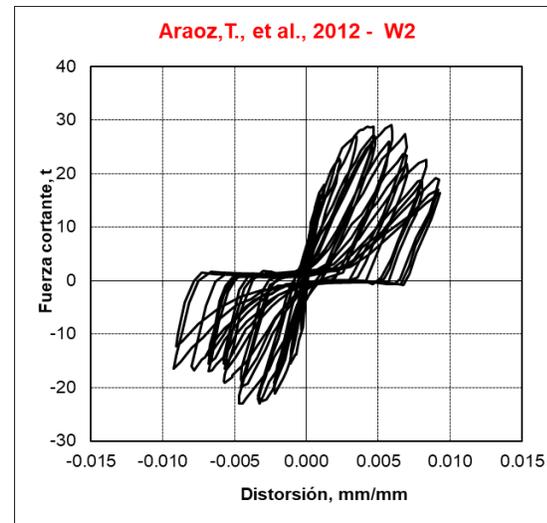
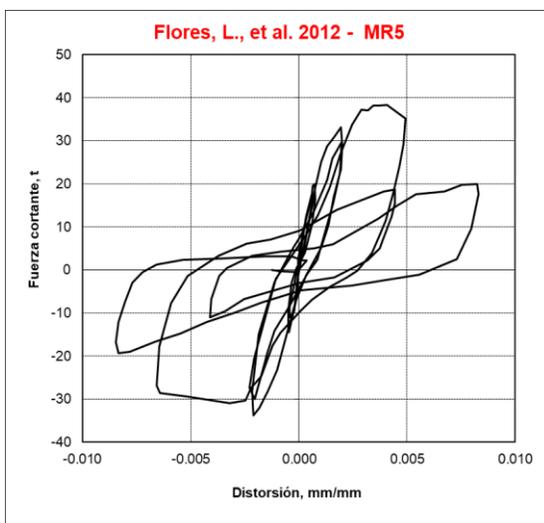
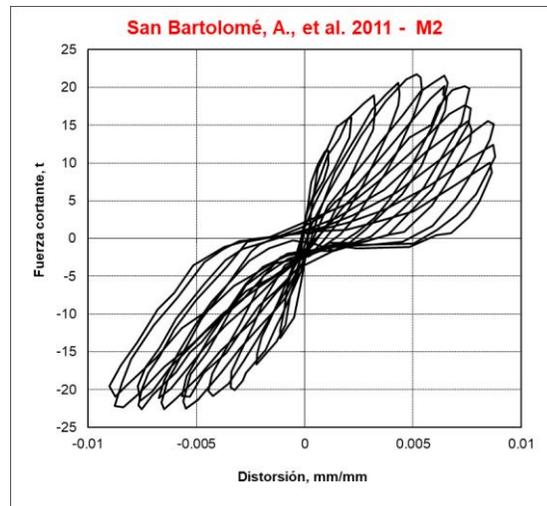
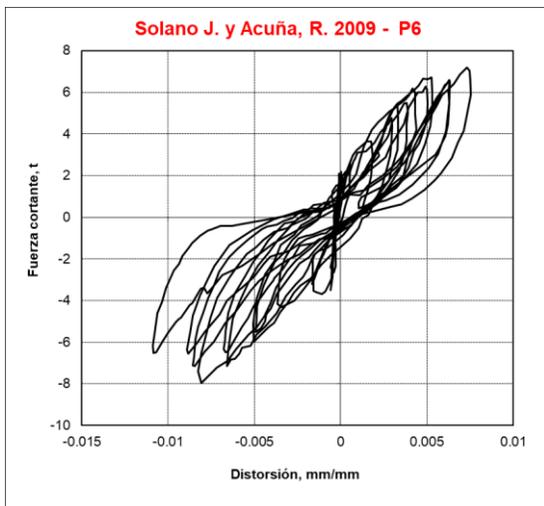
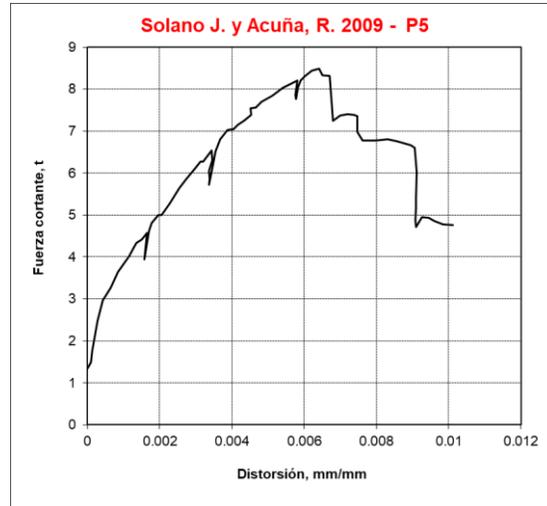
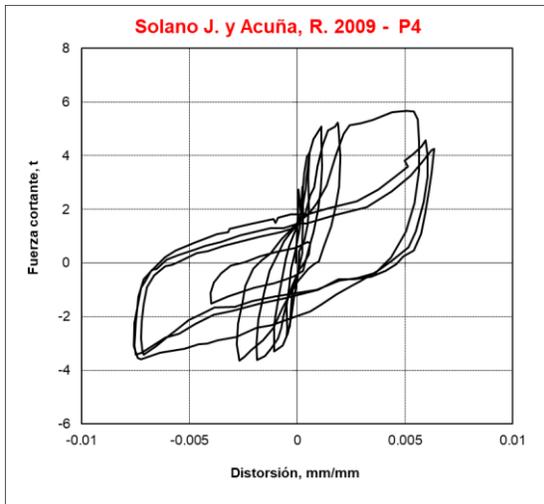
APÉNDICE B

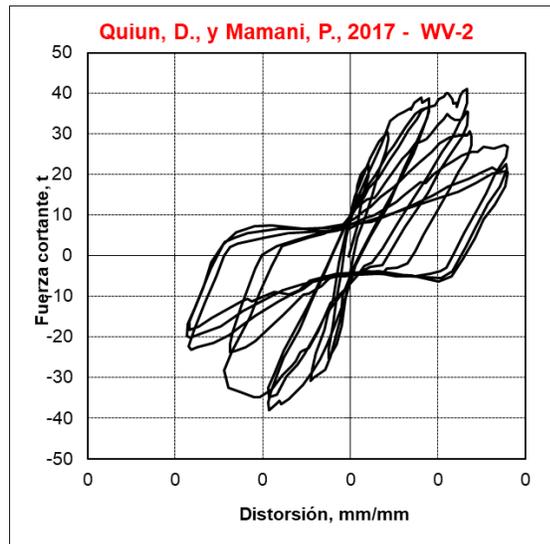
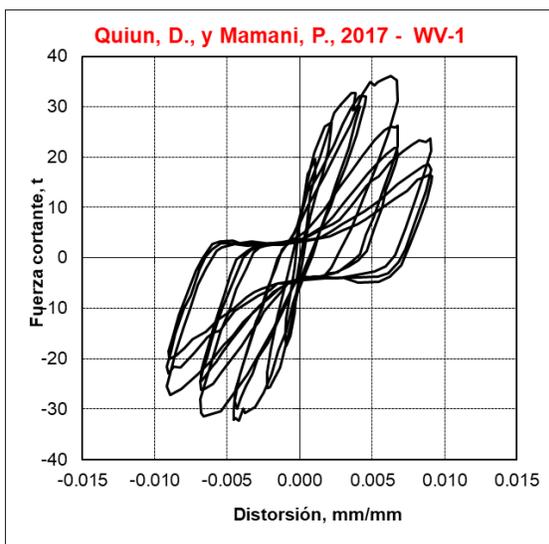
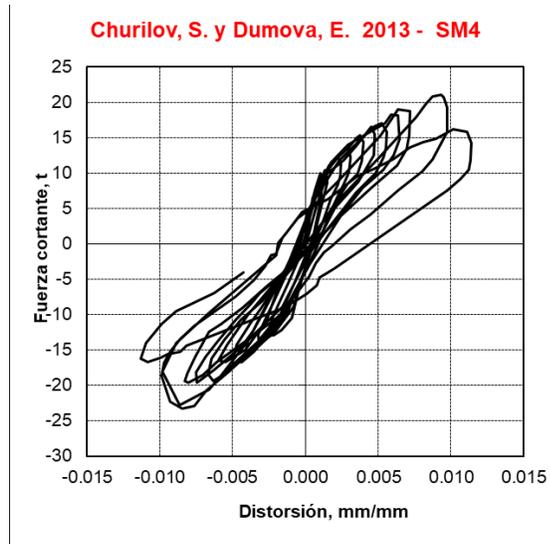
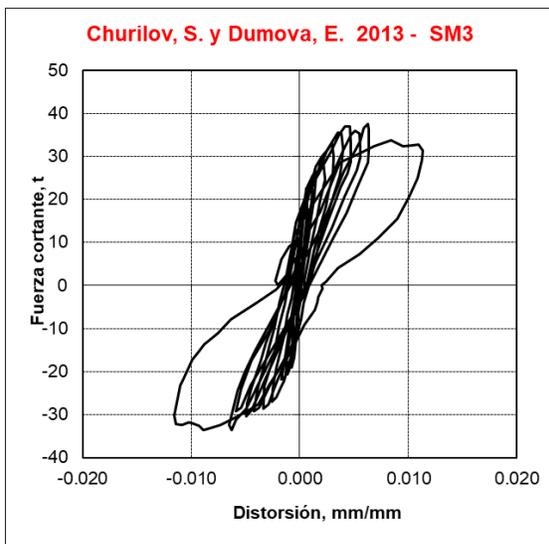
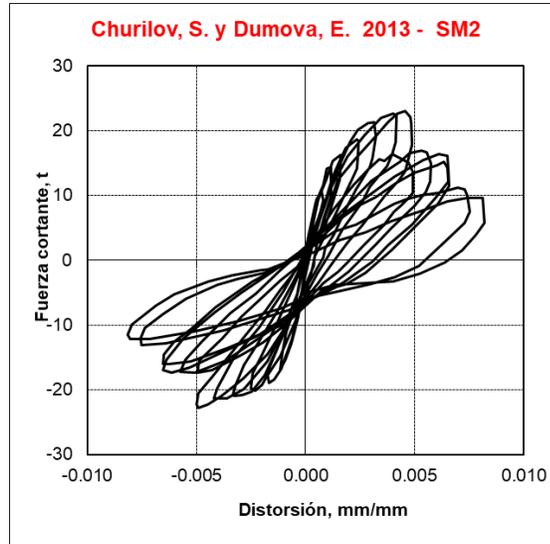
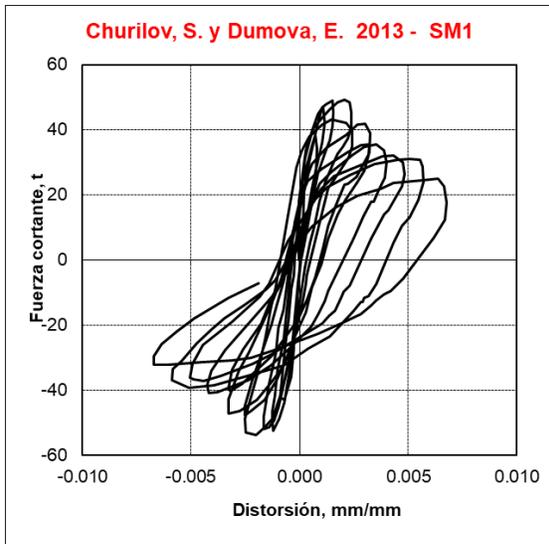
CURVAS DE COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO DE LOS ESPECÍMENES INCLUIDOS EN LA BASE DE DATOS

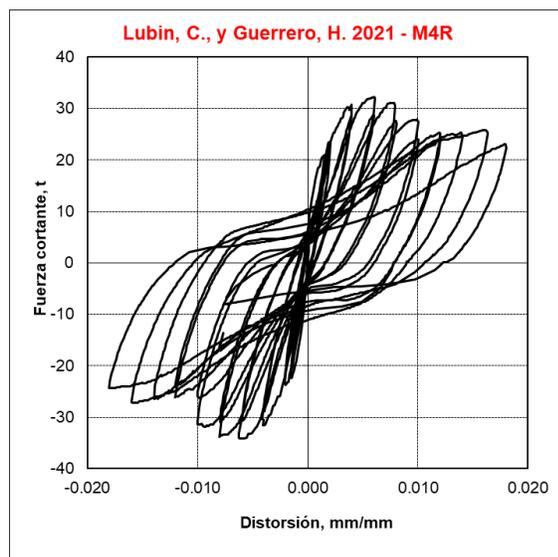
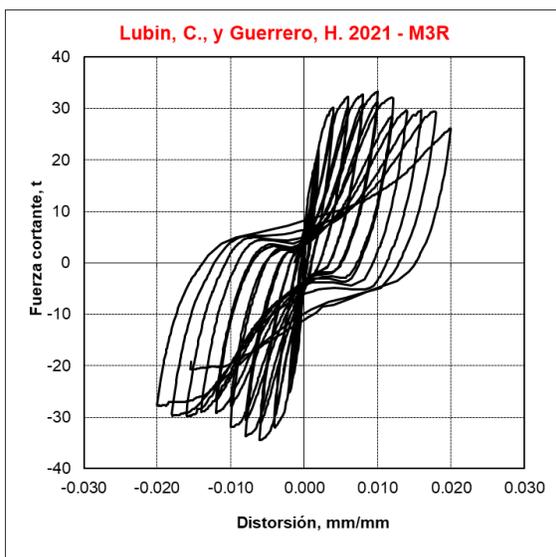
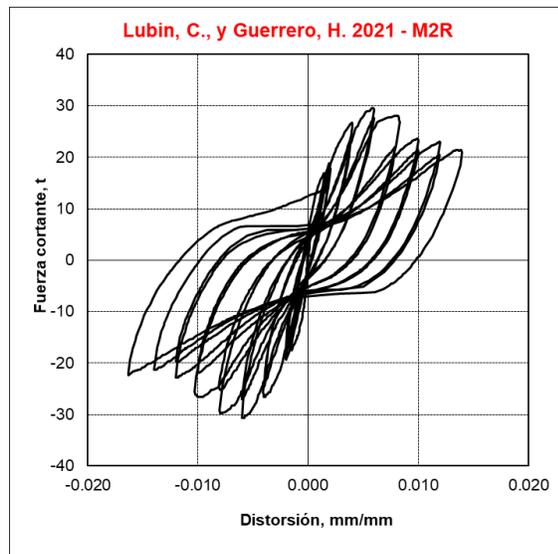
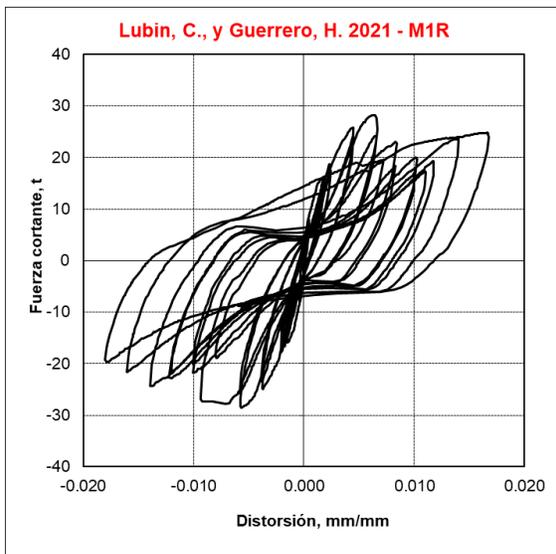
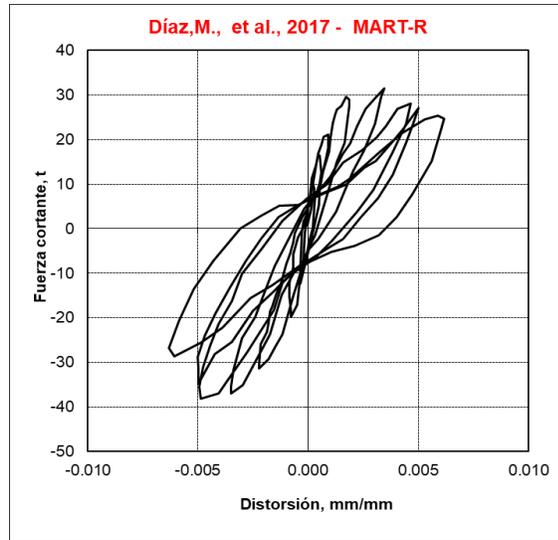
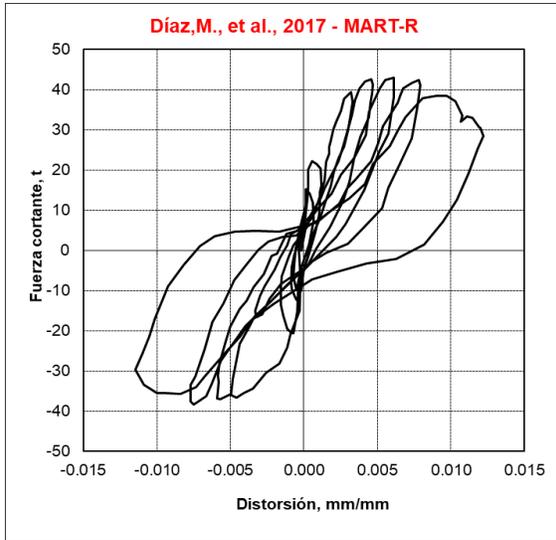
ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE ENCAMISADO CON MALLA DE ALAMBRE SOLDADO

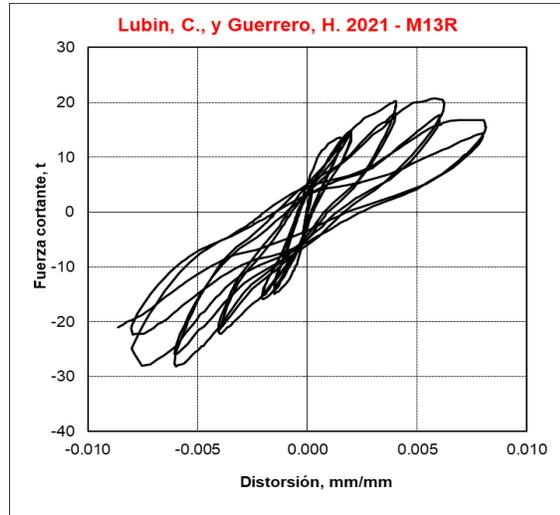
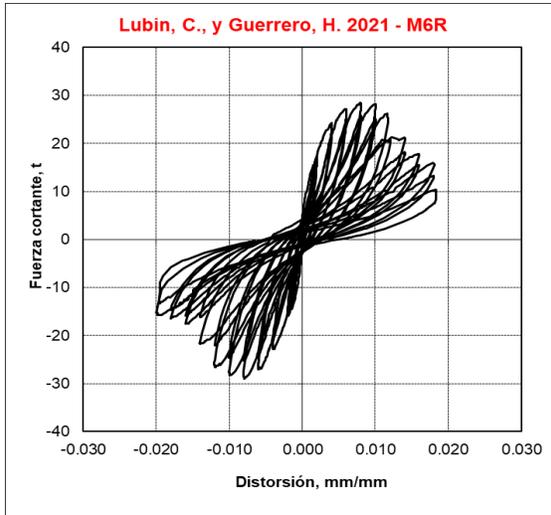




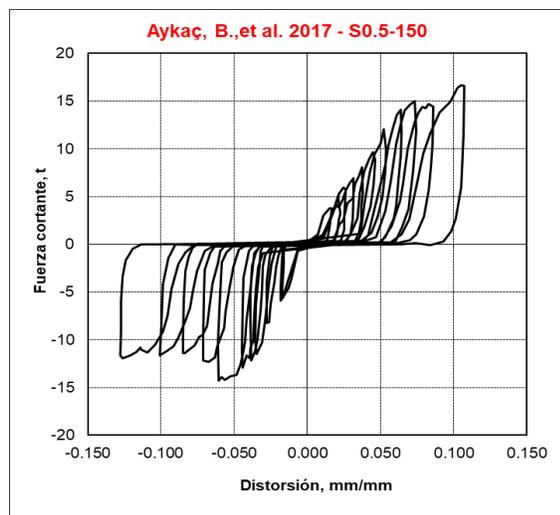
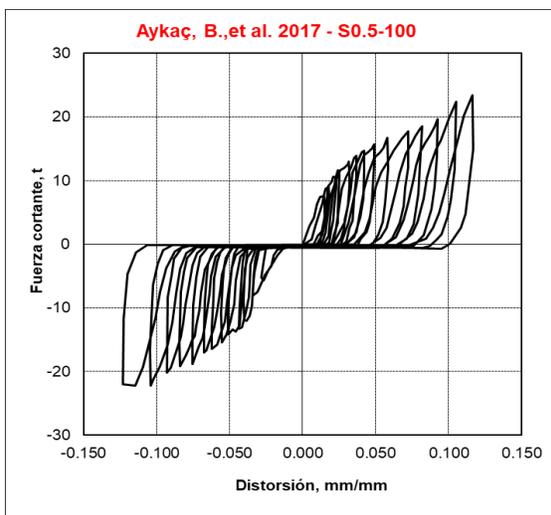
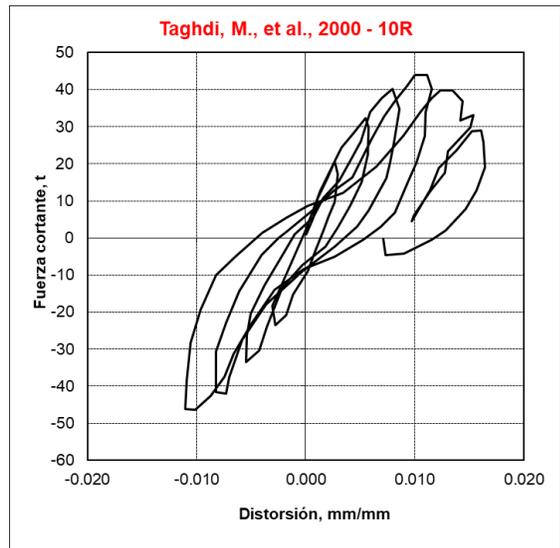
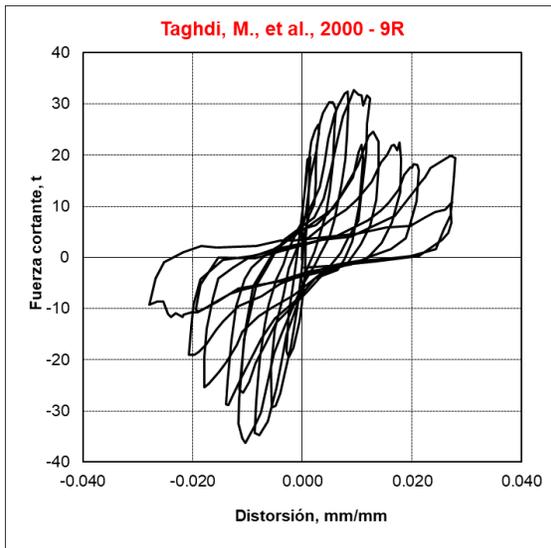


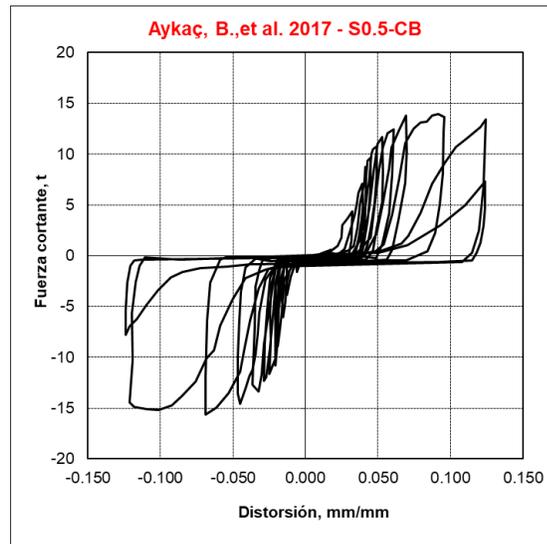
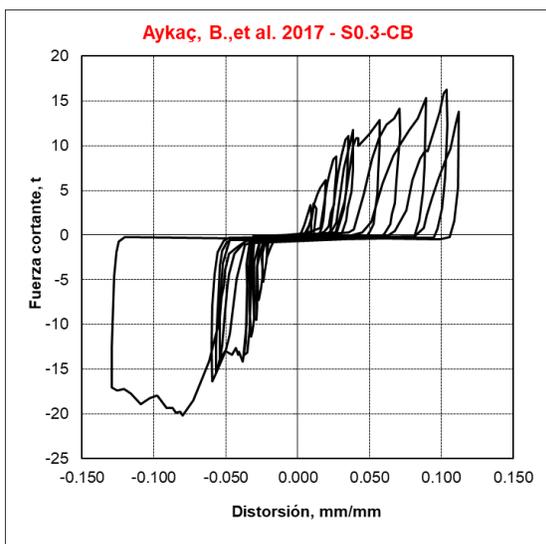
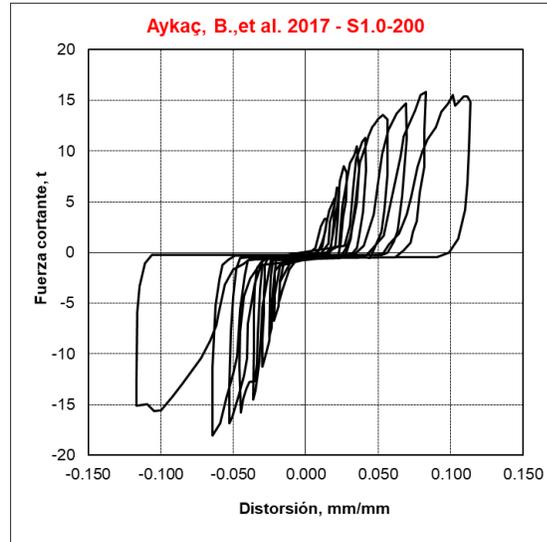
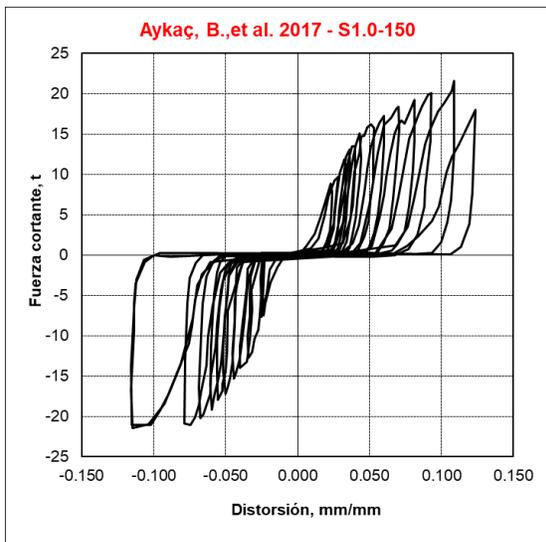
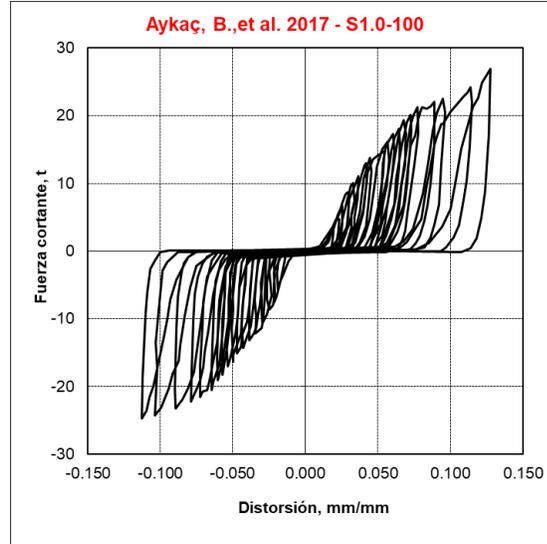
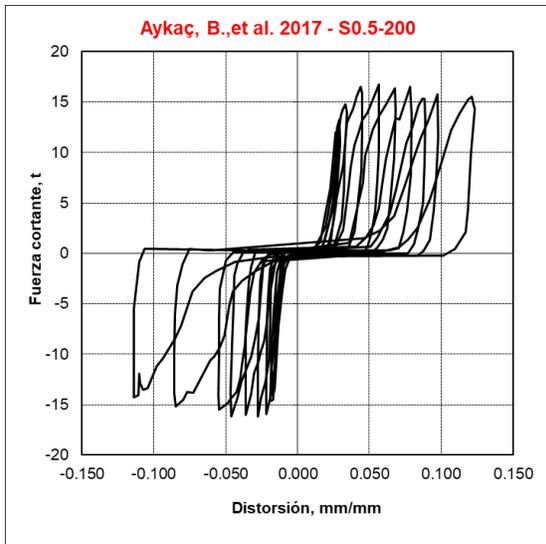


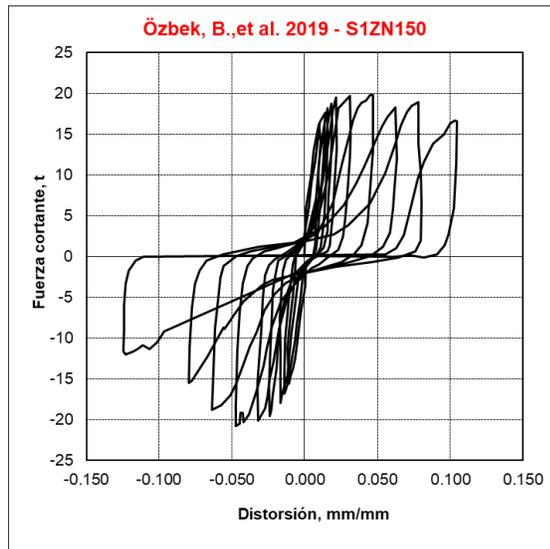
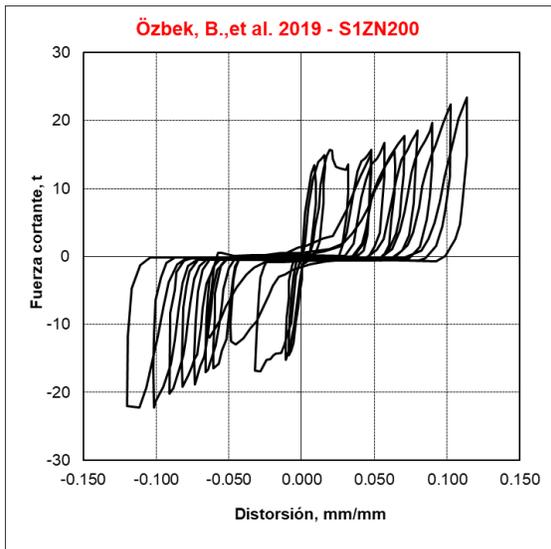
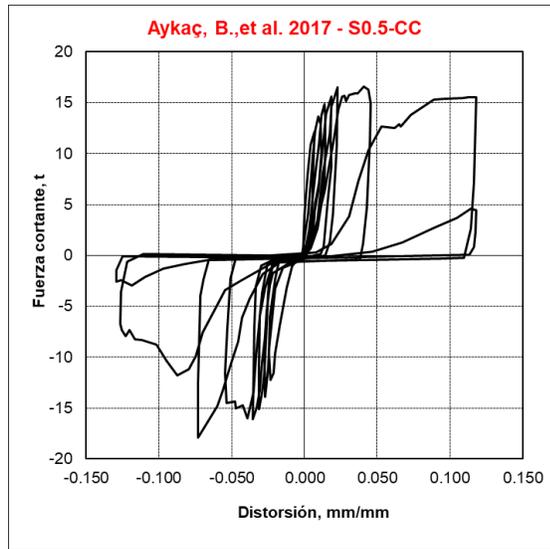
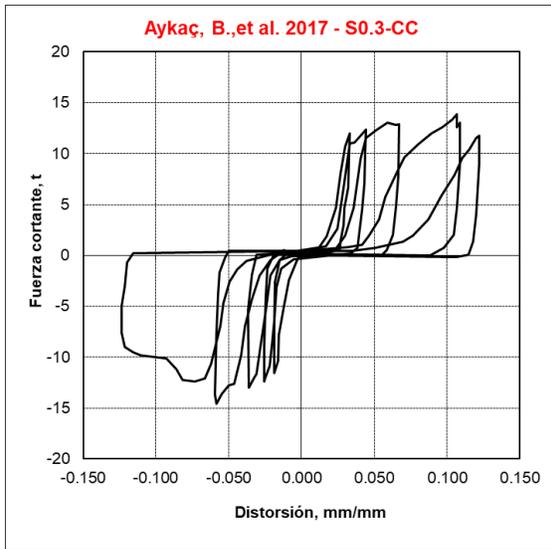
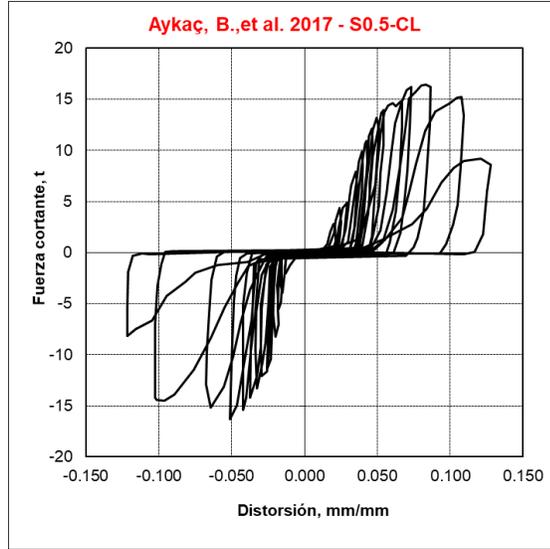
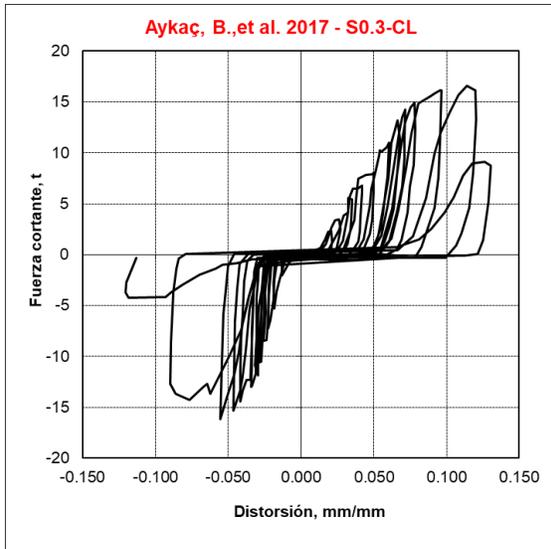


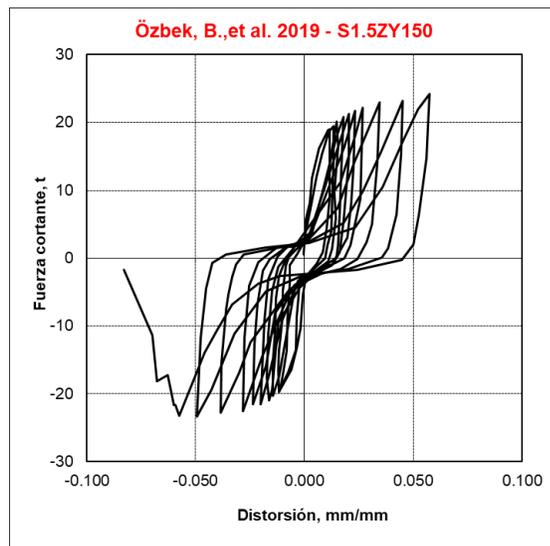
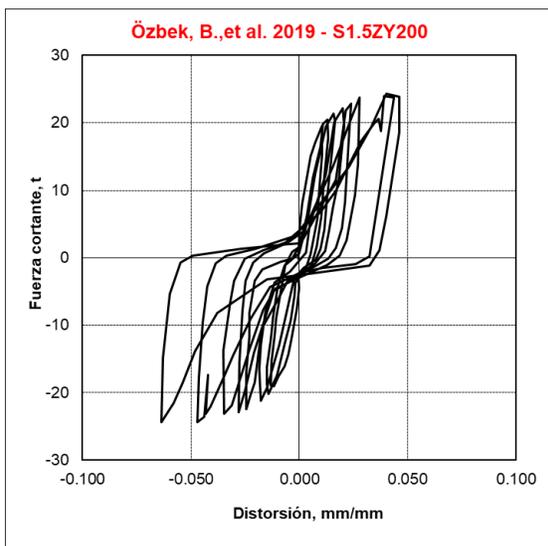
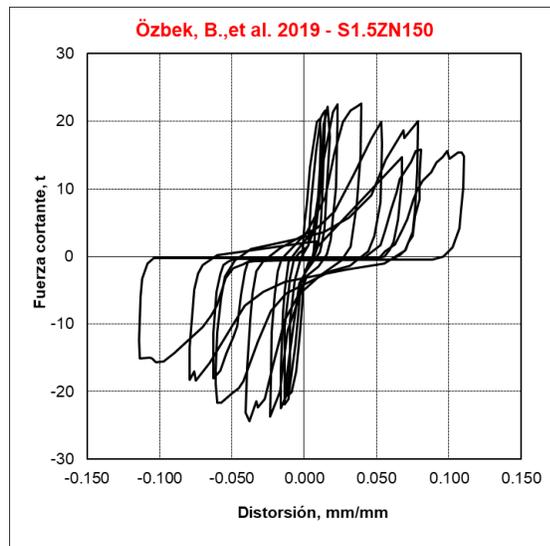
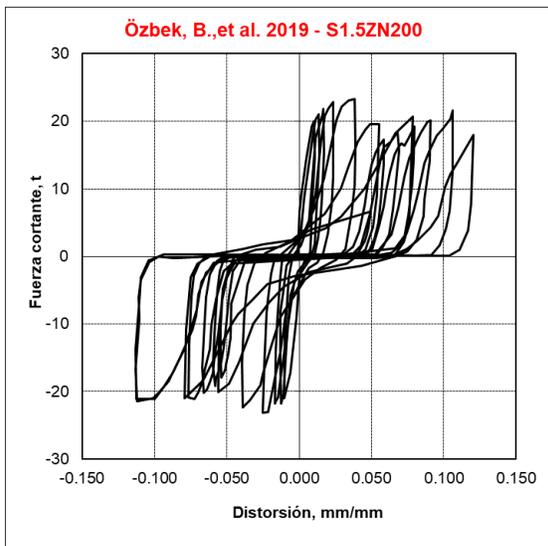
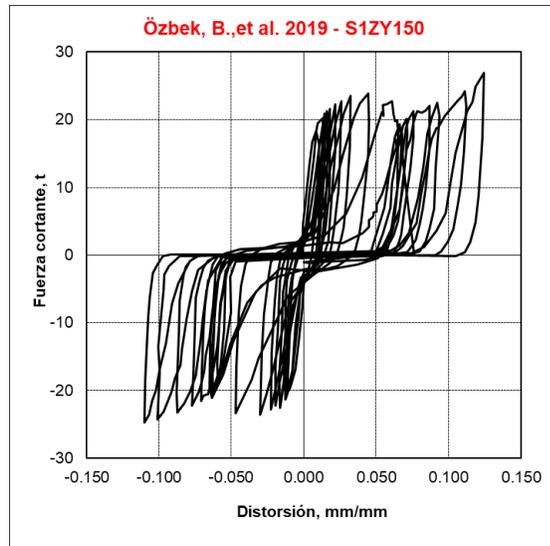
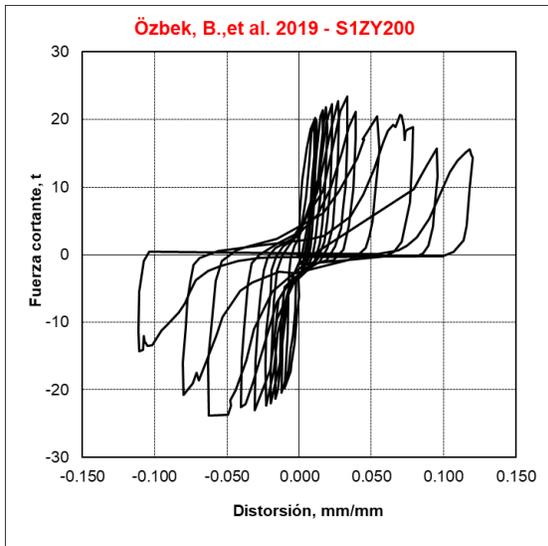


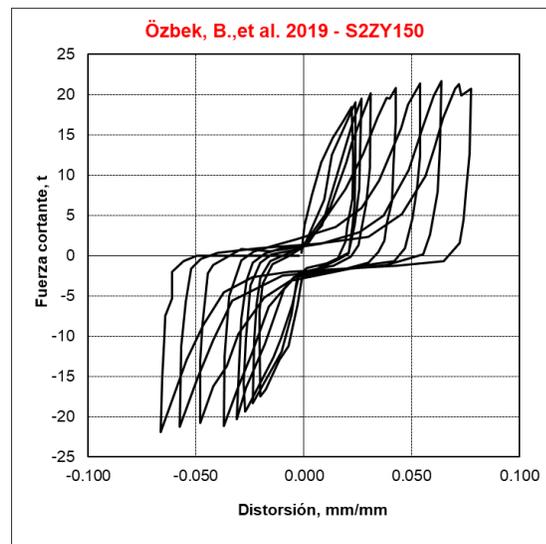
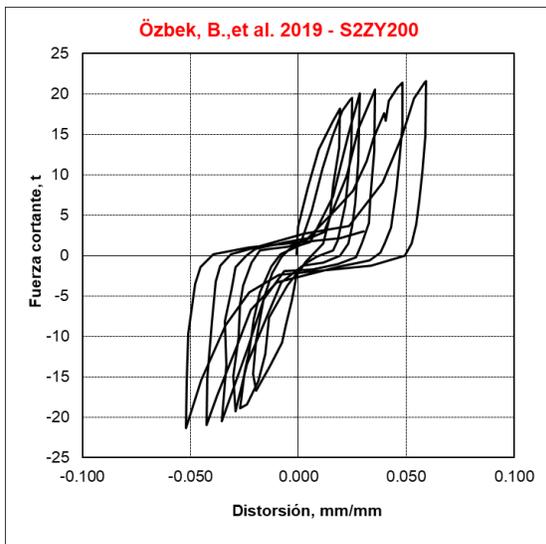
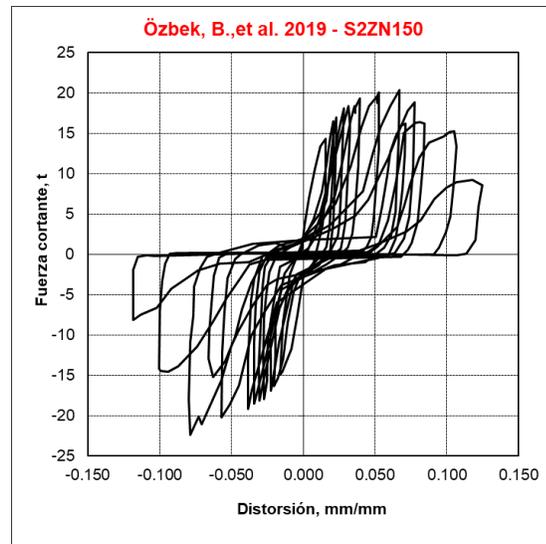
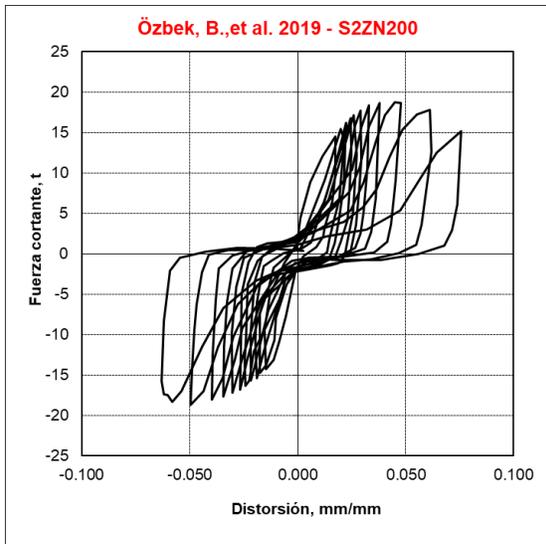
ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE ENCAMISADO CON BANDAS Y PLACAS DE ACERO



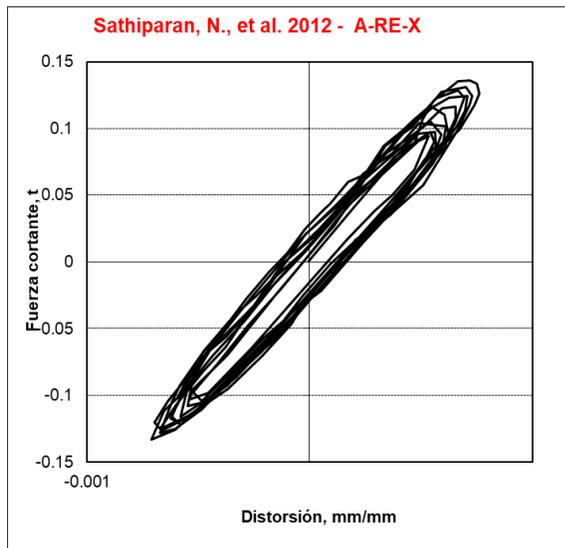
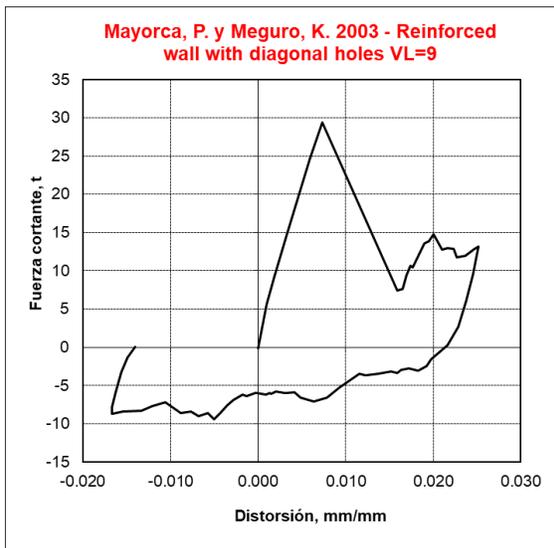
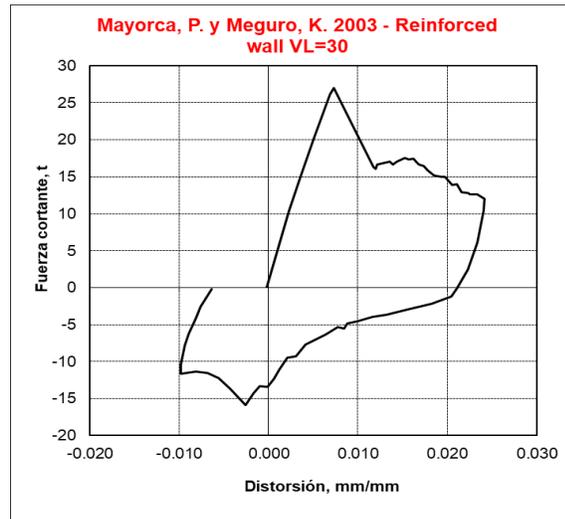
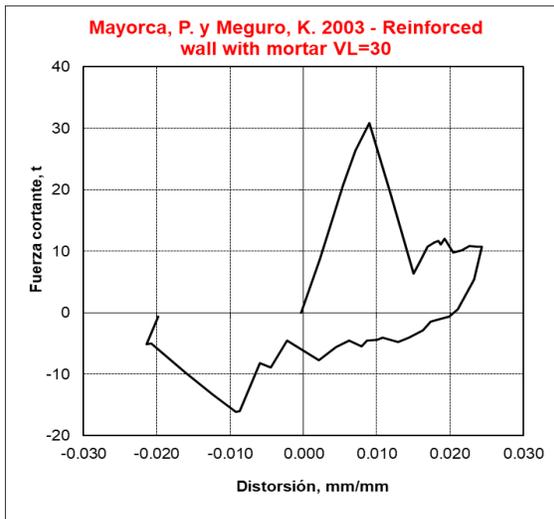
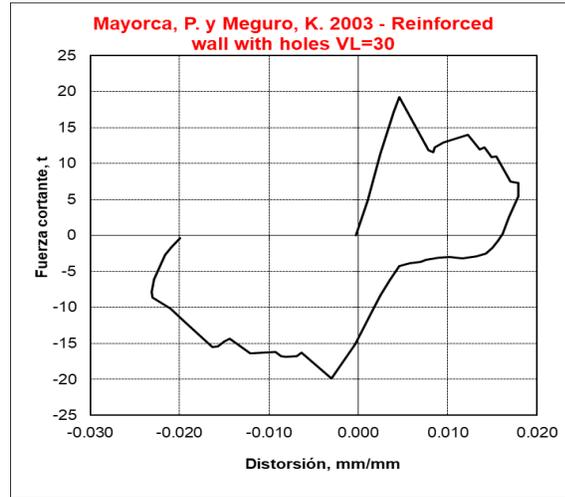
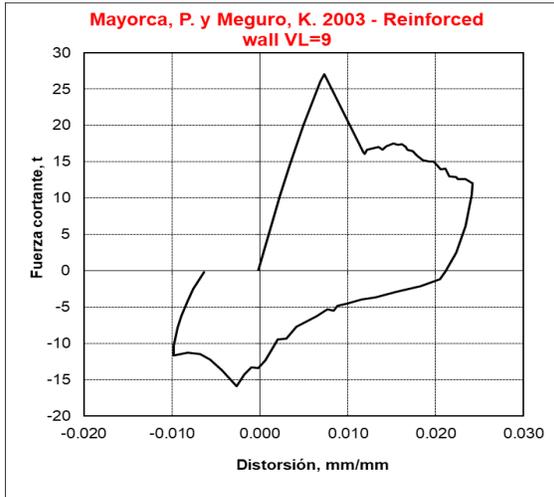




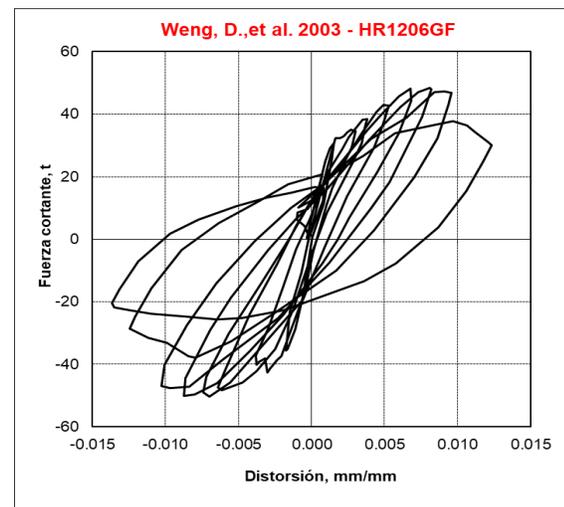
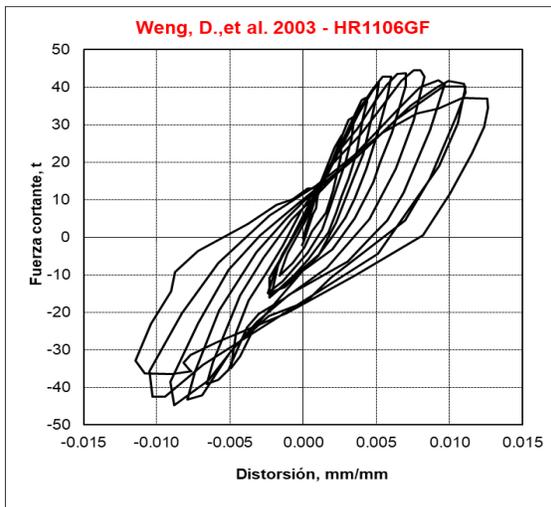
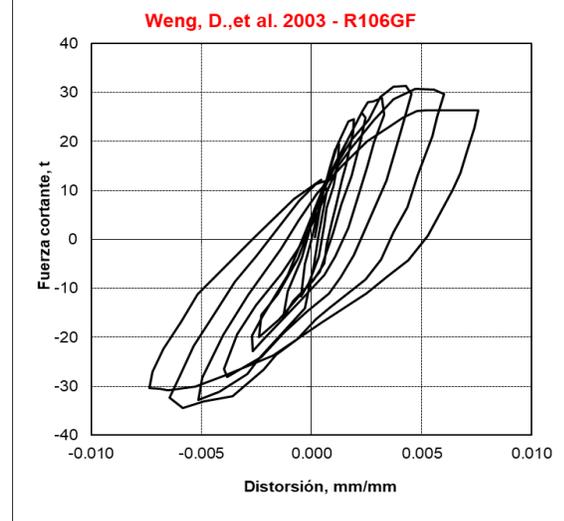
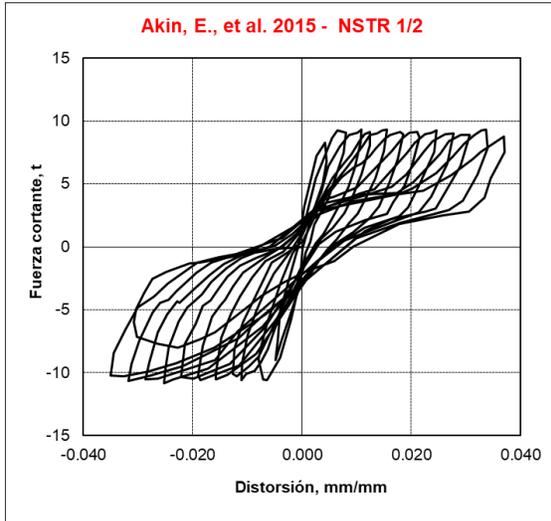
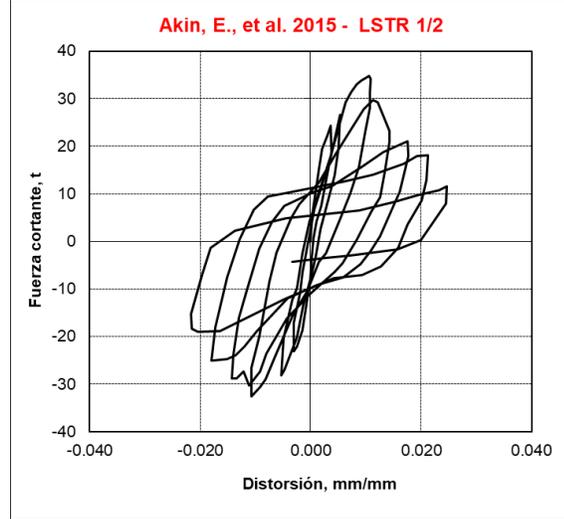
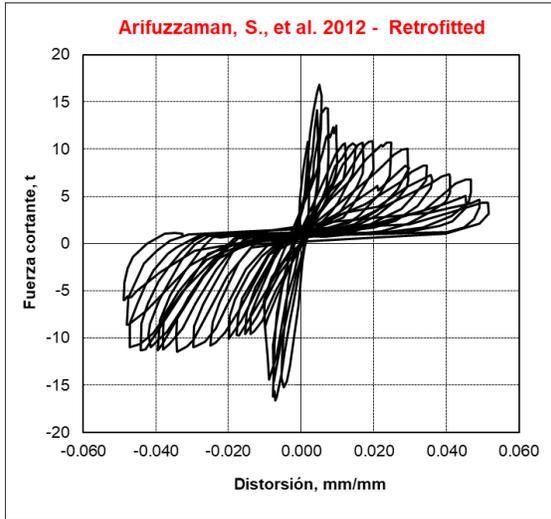


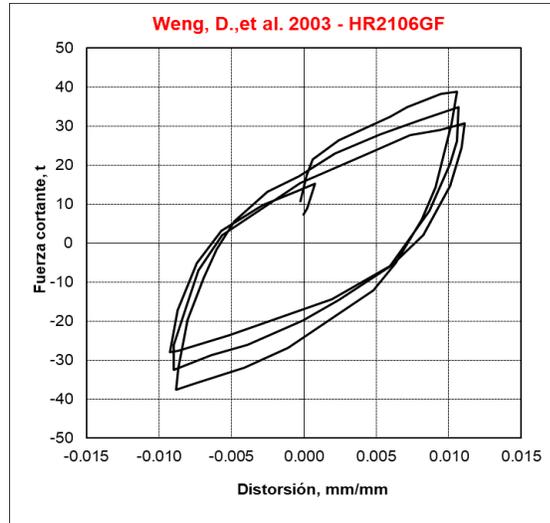
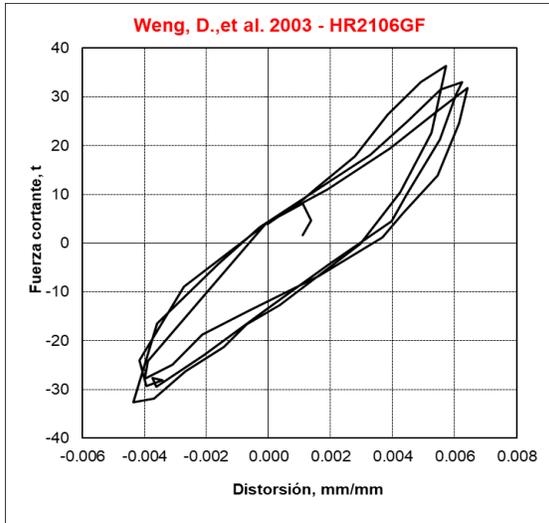


ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE ENCAMISADO CON BANDAS DE POLIPROPILENO

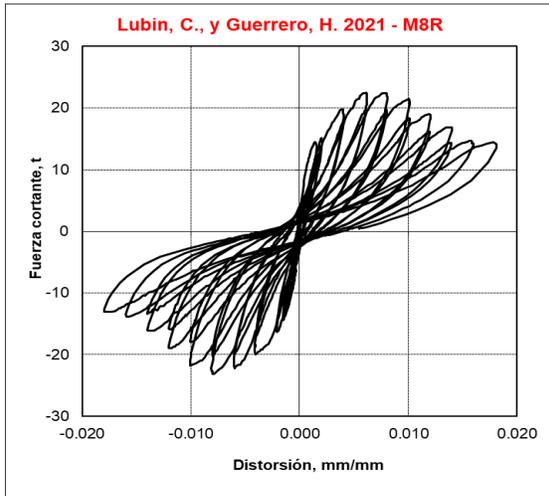


ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE ENCAMISADO CON POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS

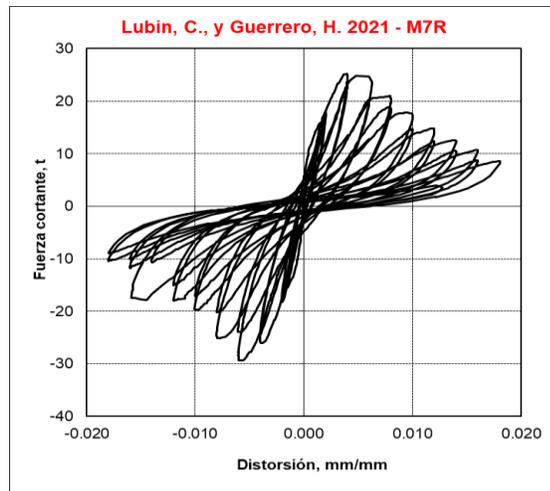
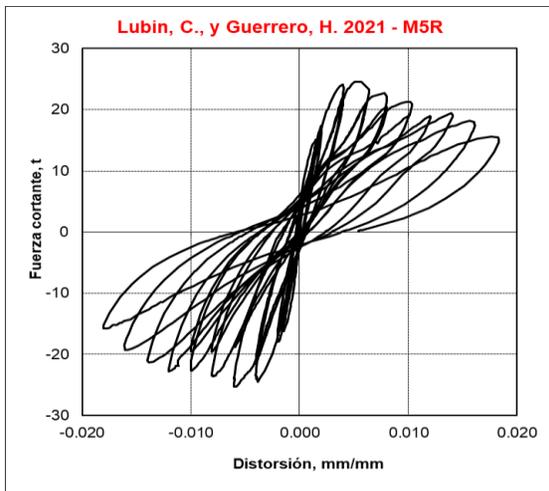


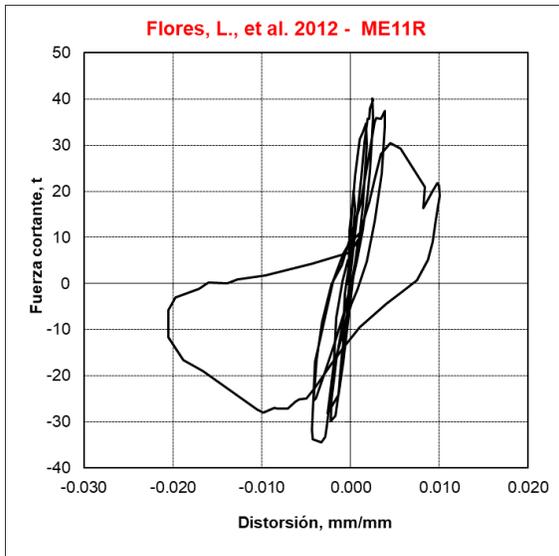
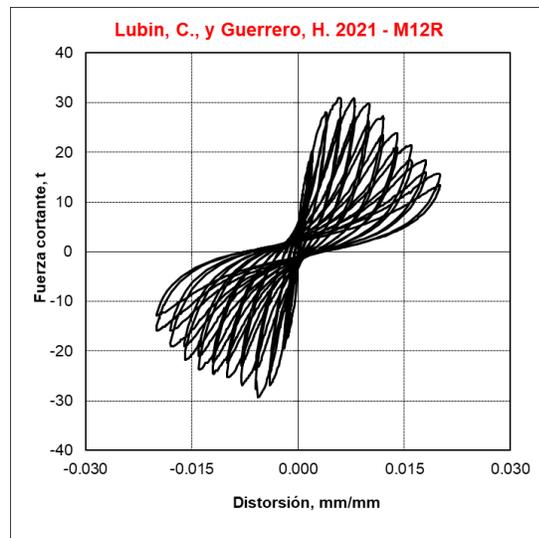
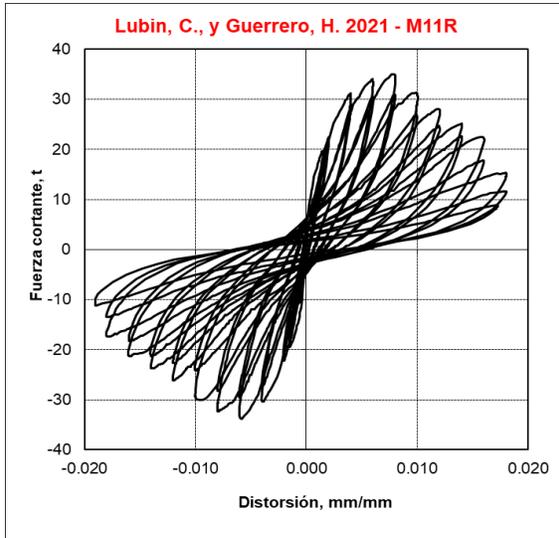


ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE TEXTILES ESTRUCTURALES



ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE ENCAMISADO CON MORTEROS REFORZADOS CON FIBRAS

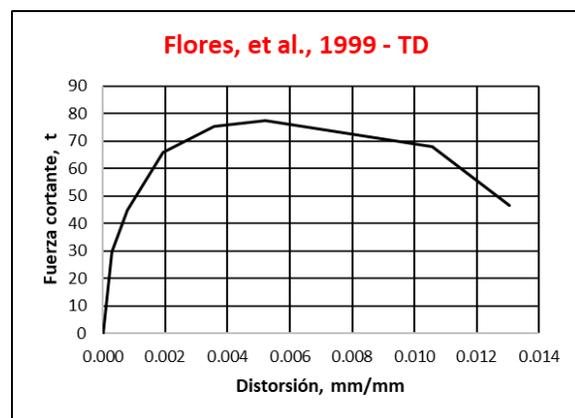
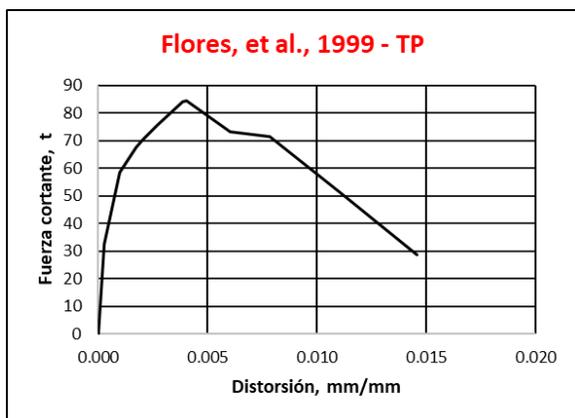
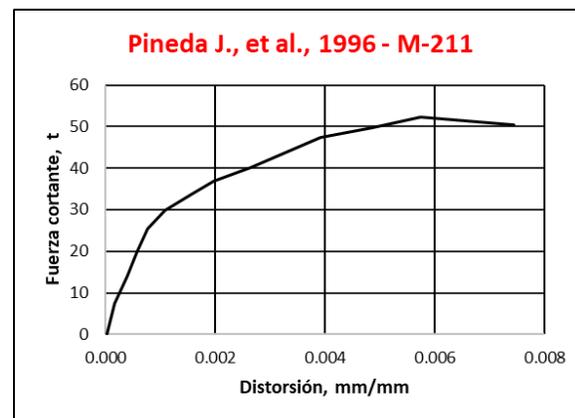
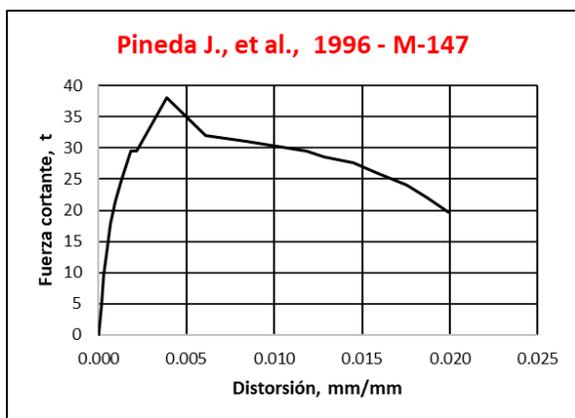
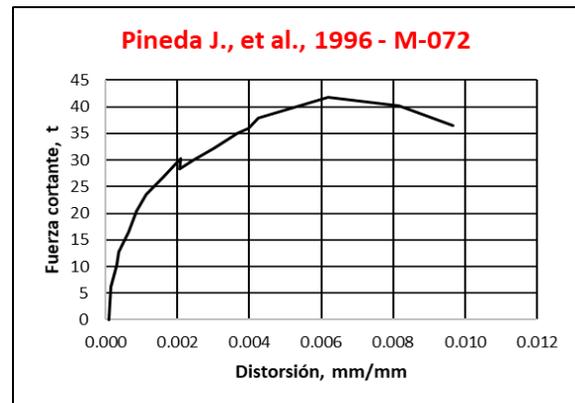
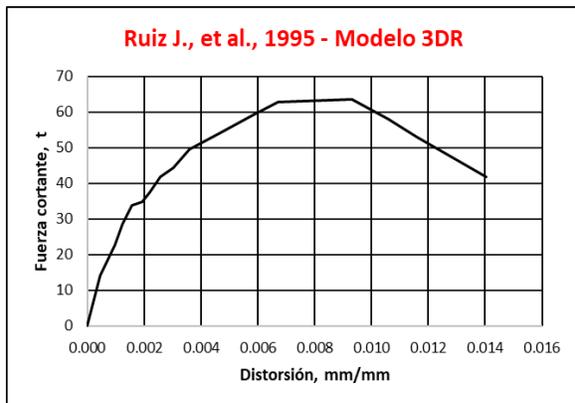


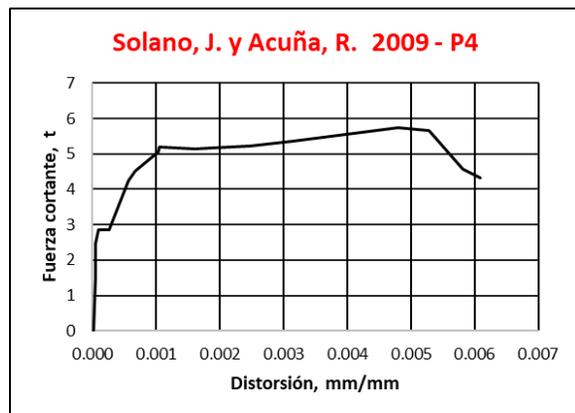
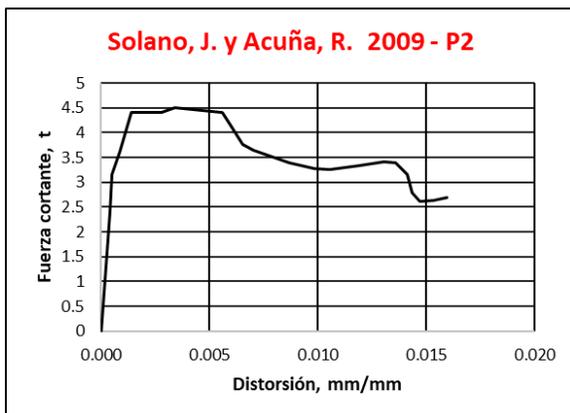
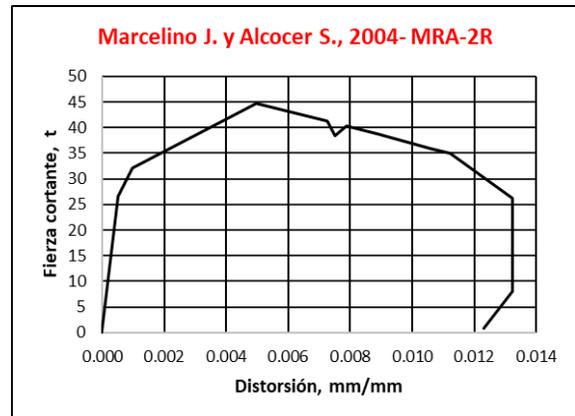
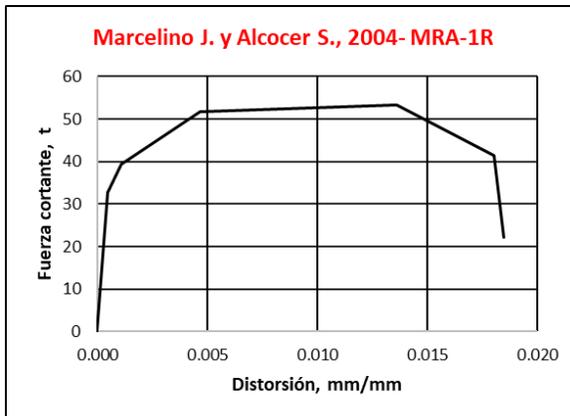
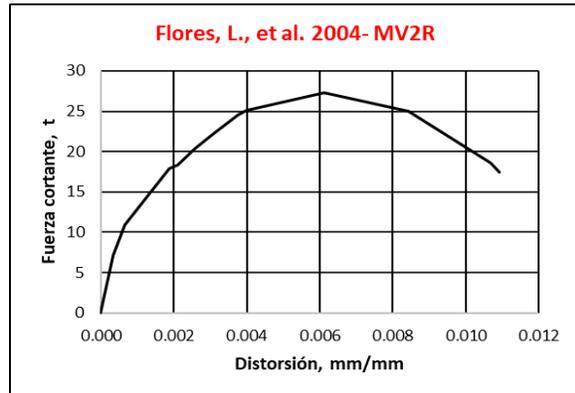
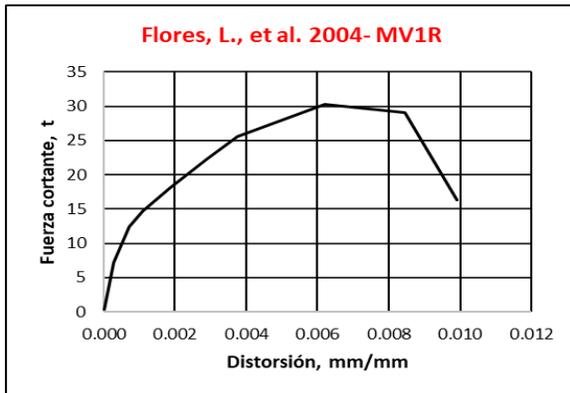
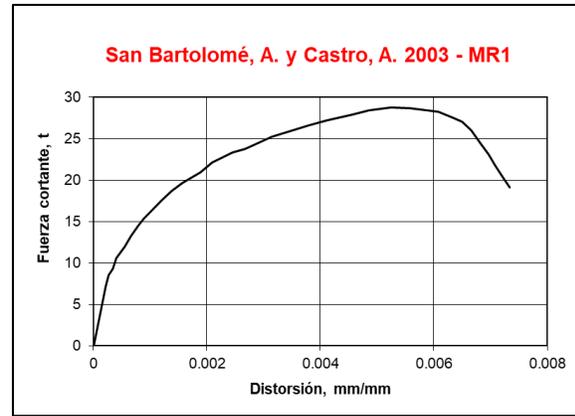
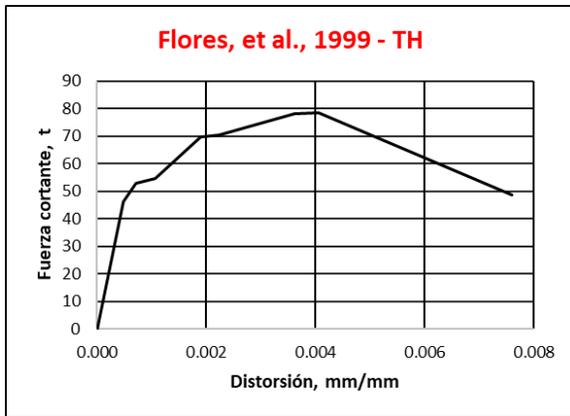


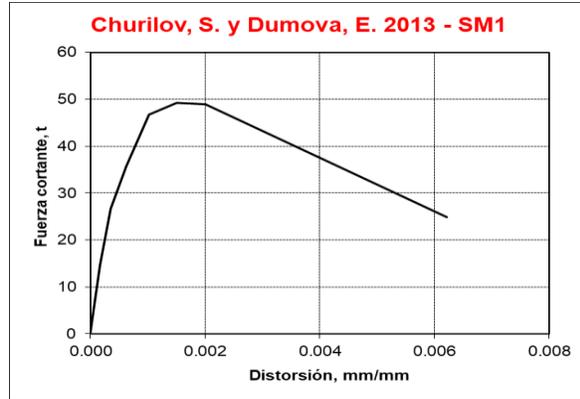
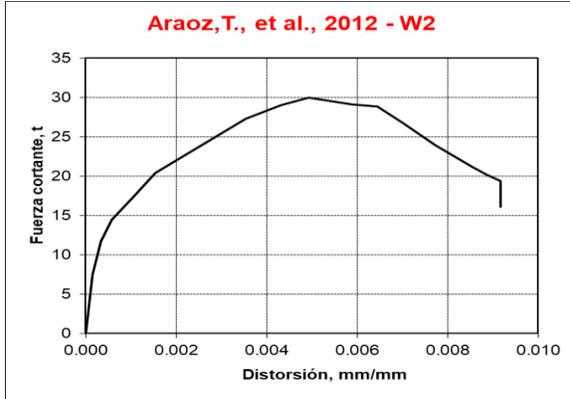
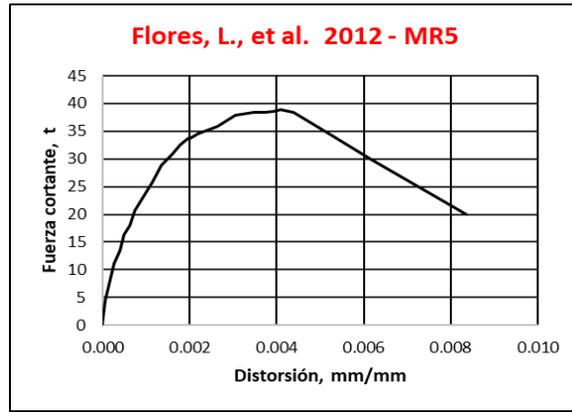
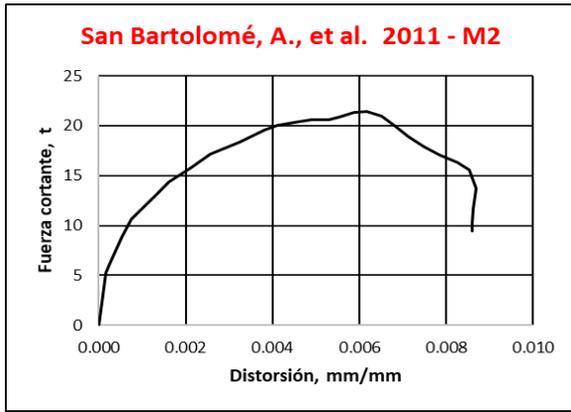
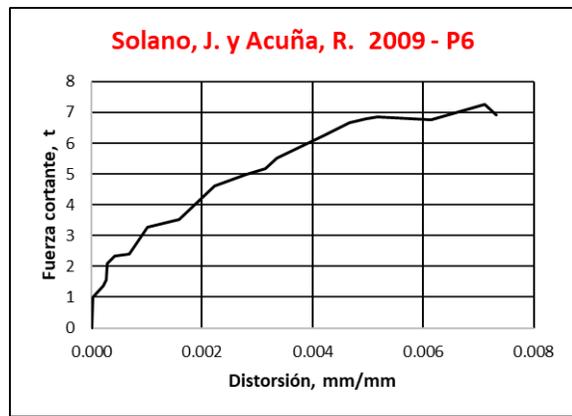
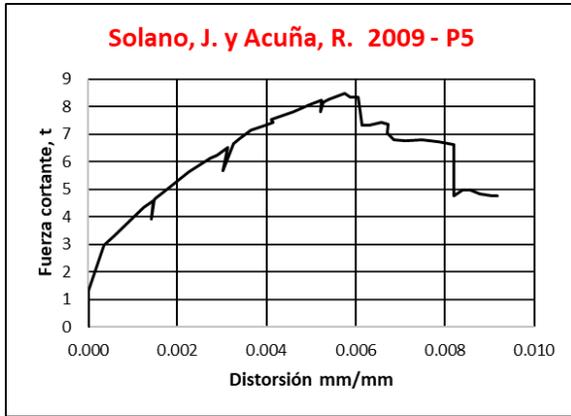
APÉNDICE C

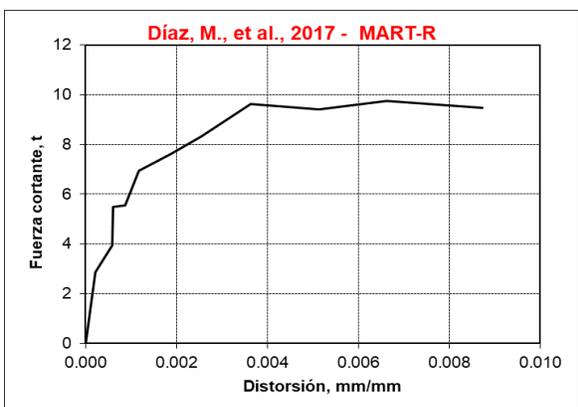
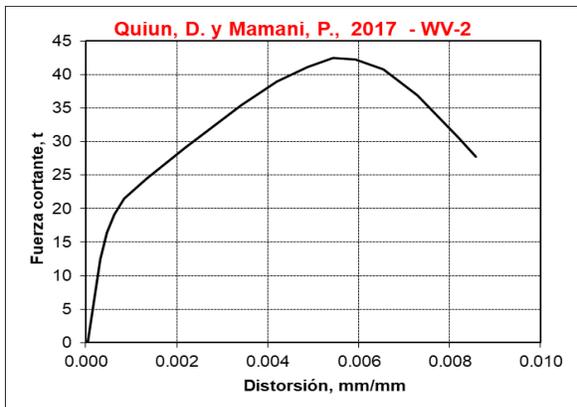
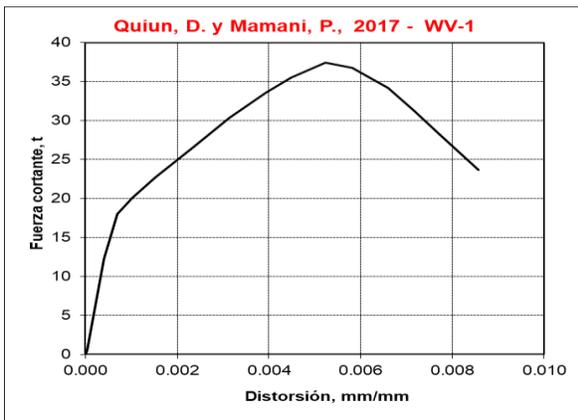
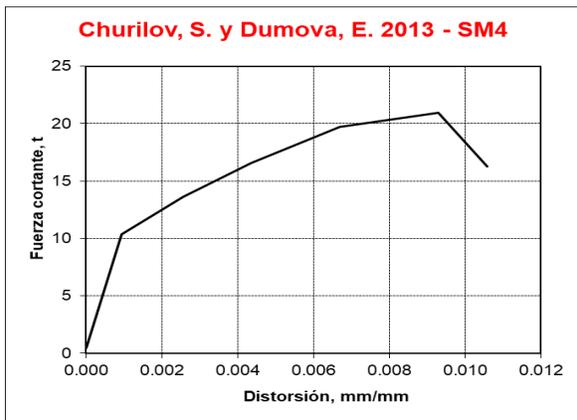
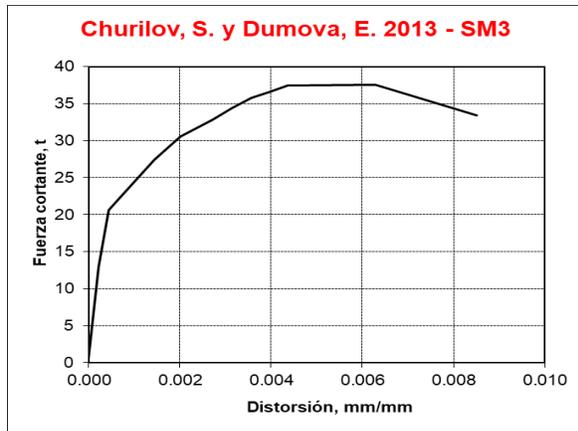
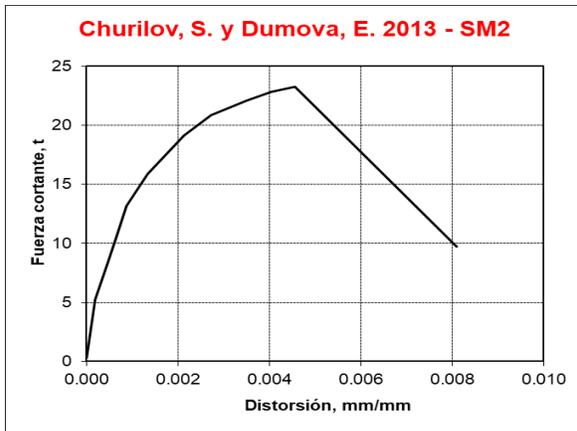
CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES INCLUIDOS EN LA BASE DE DATOS

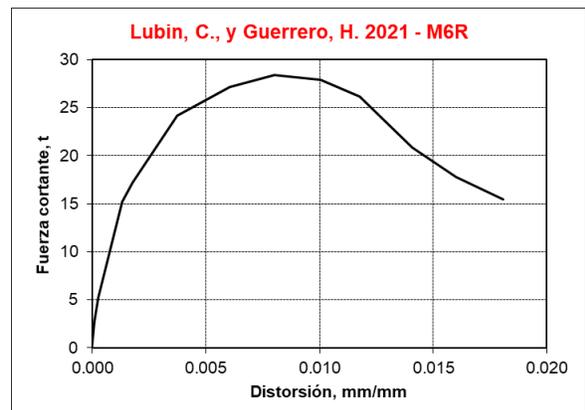
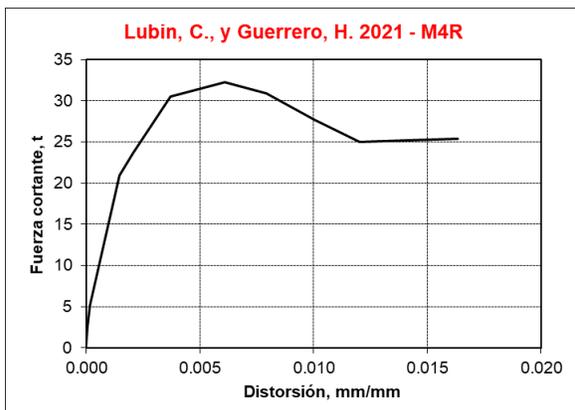
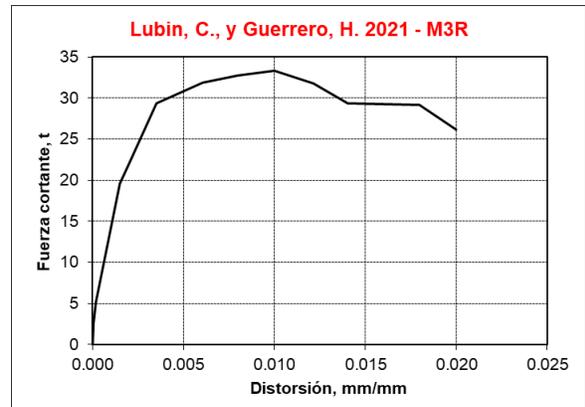
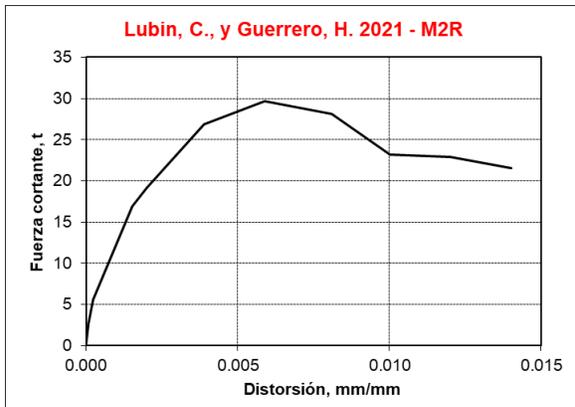
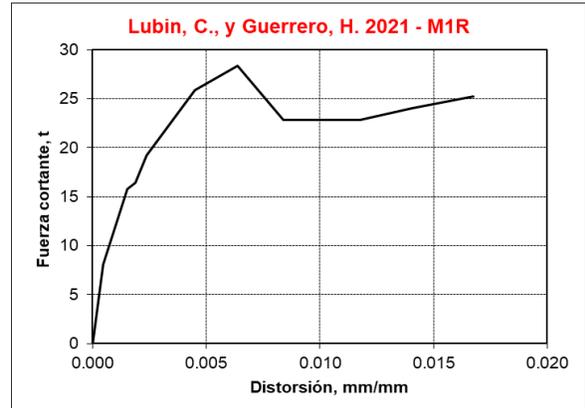
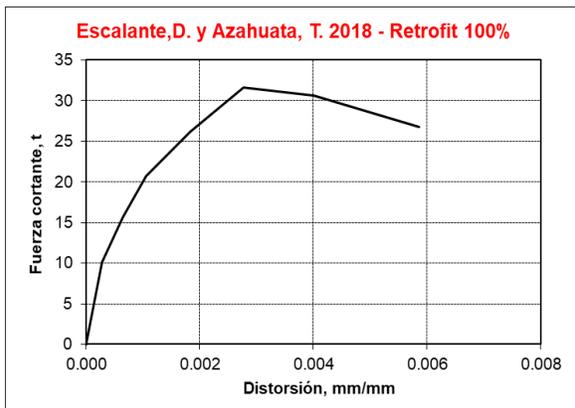
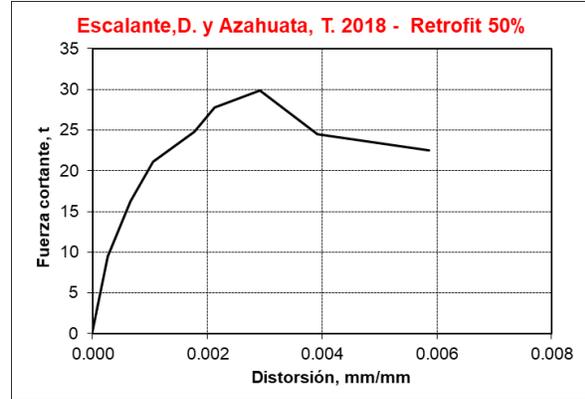
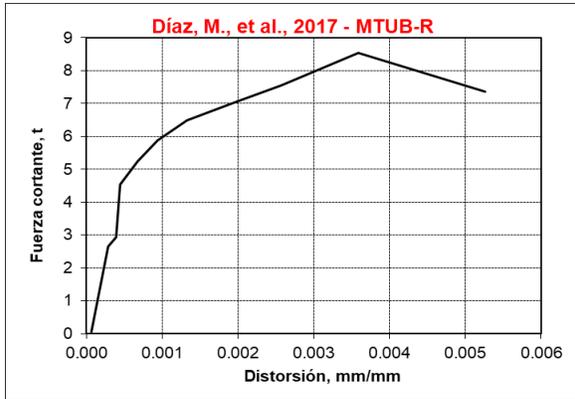
ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE ENCAMISADO CON MALLA DE ALAMBRE SOLDADO

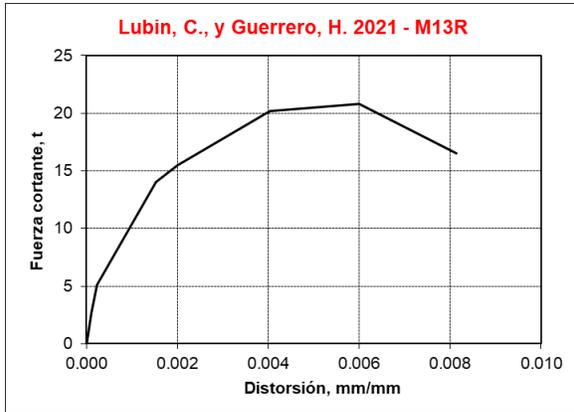




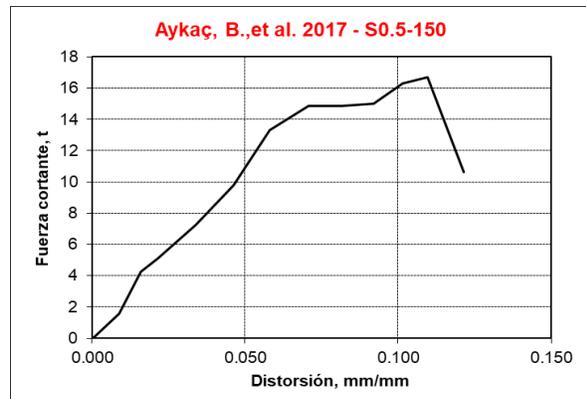
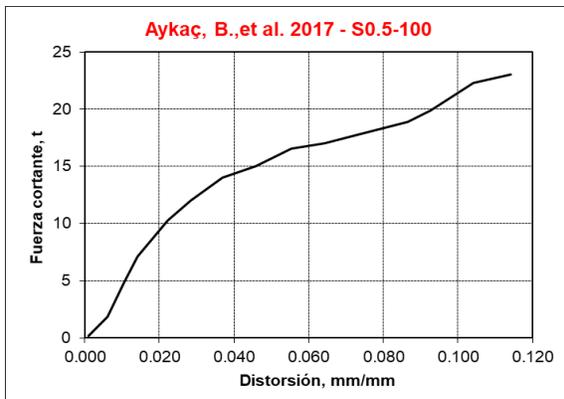
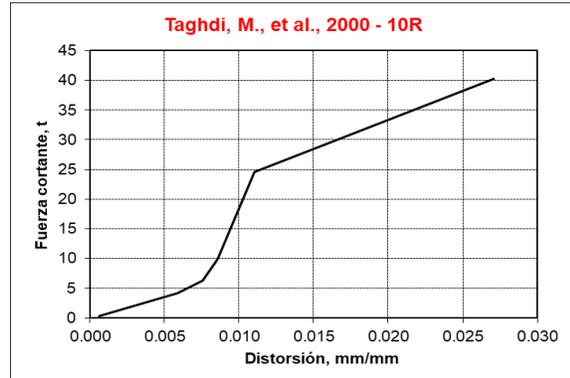
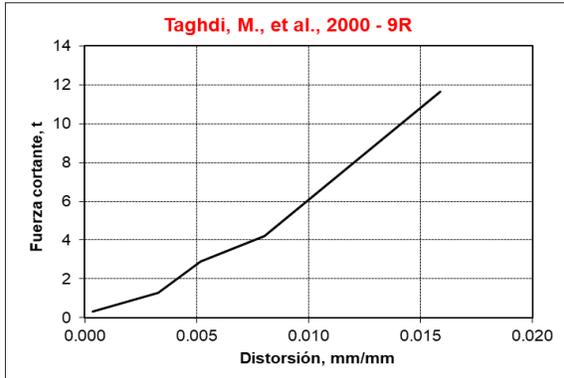


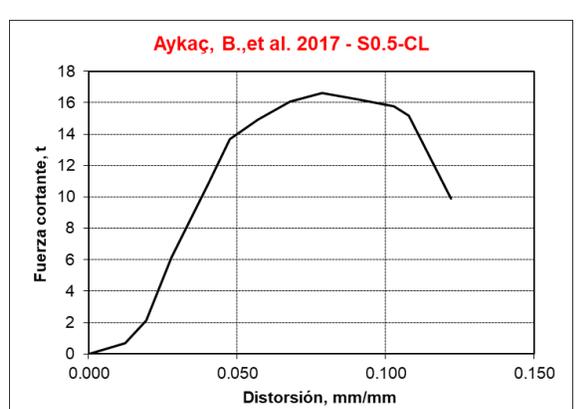
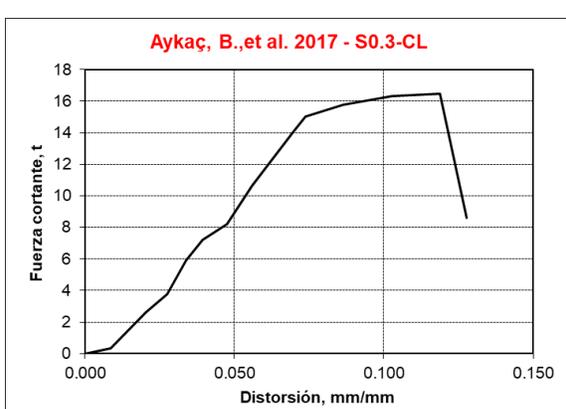
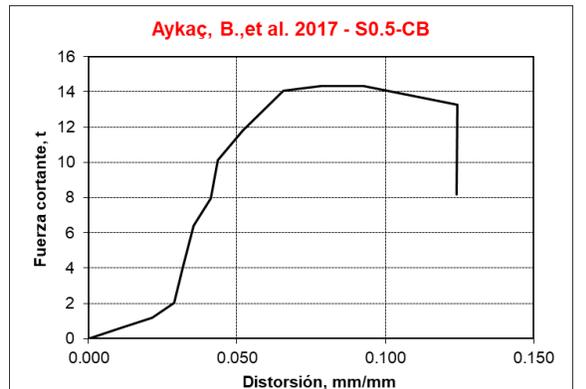
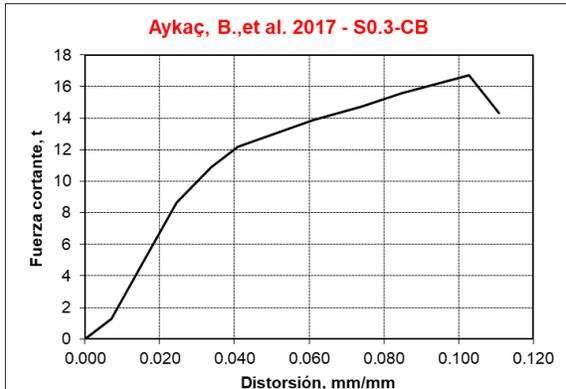
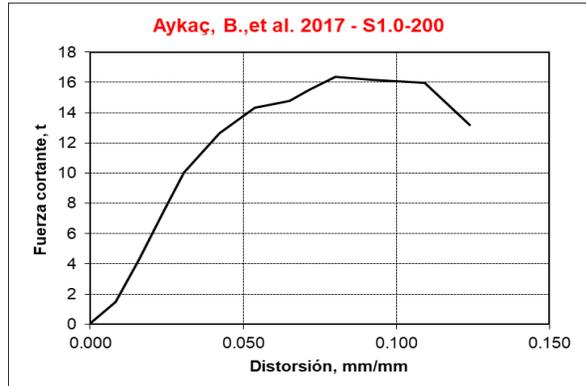
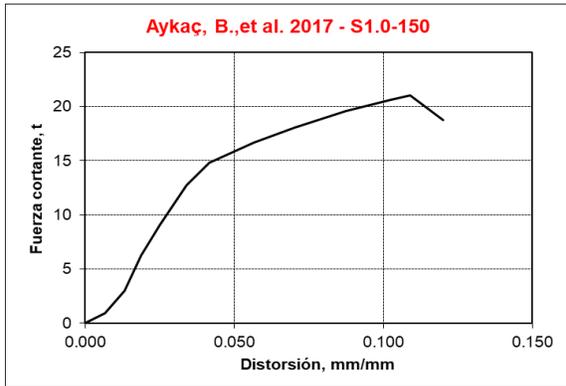
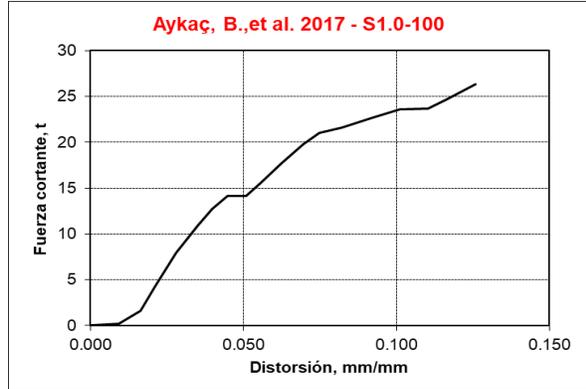
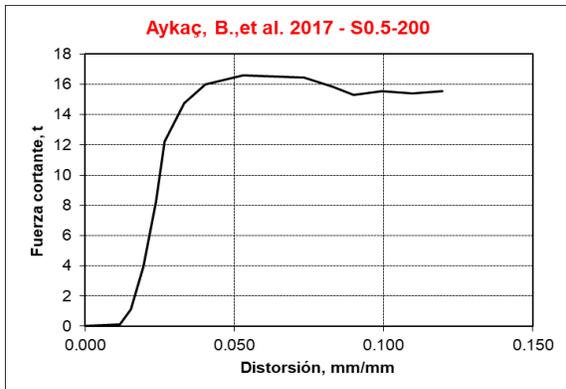


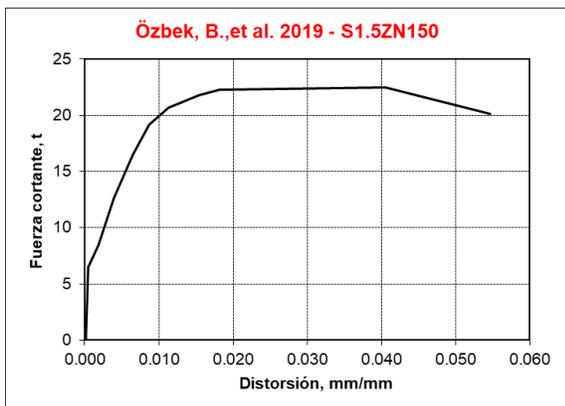
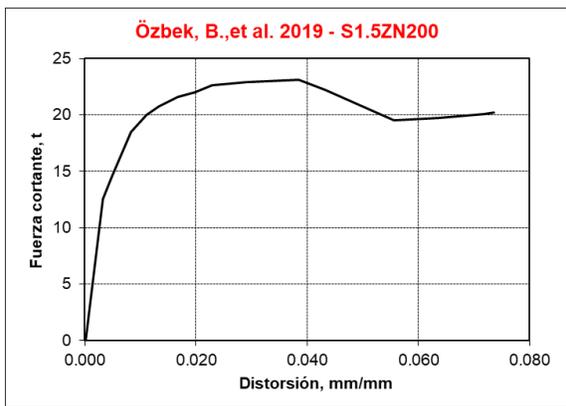
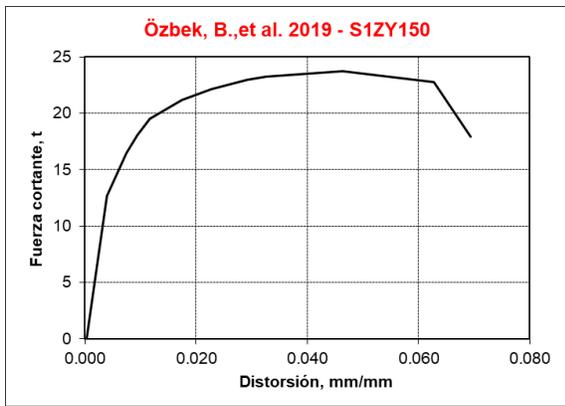
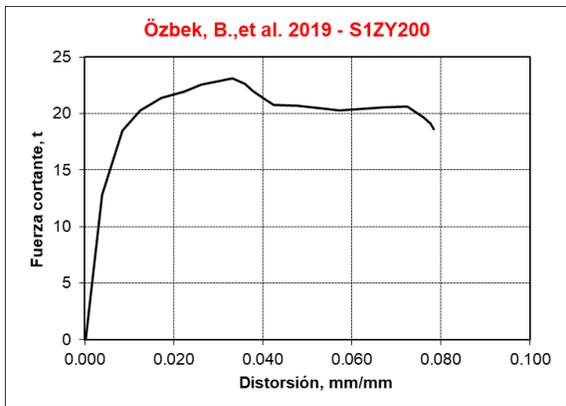
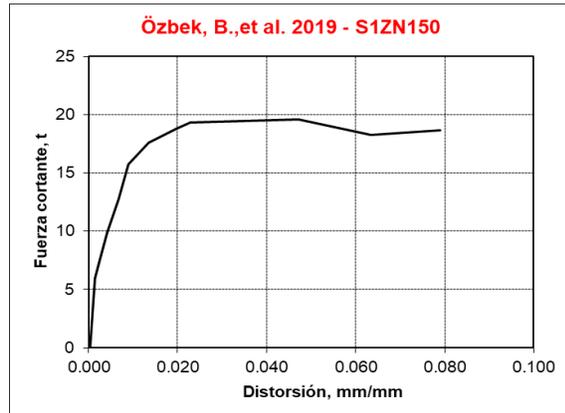
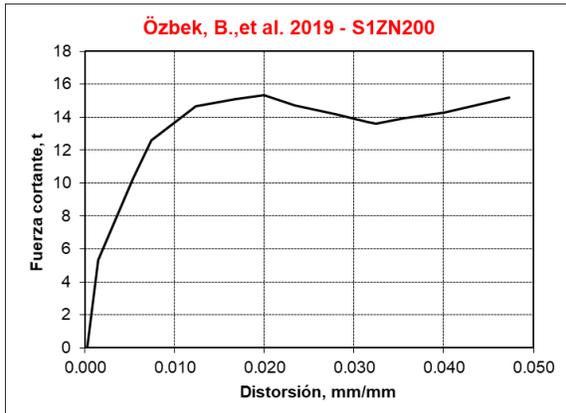
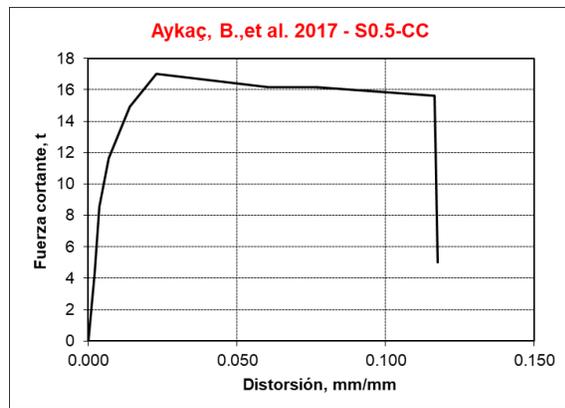
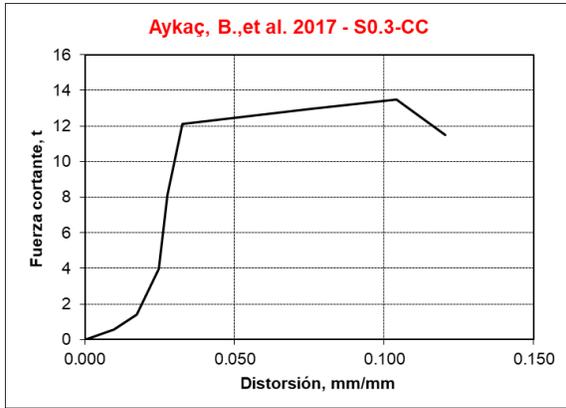


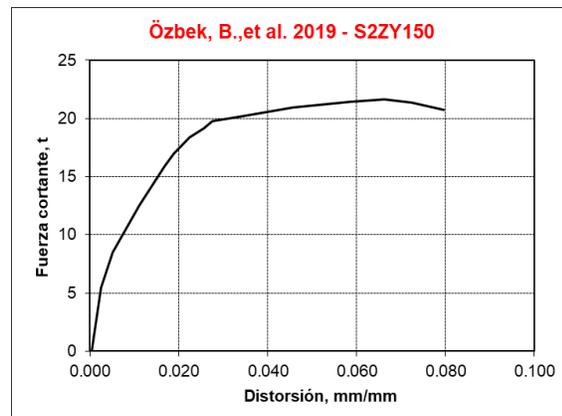
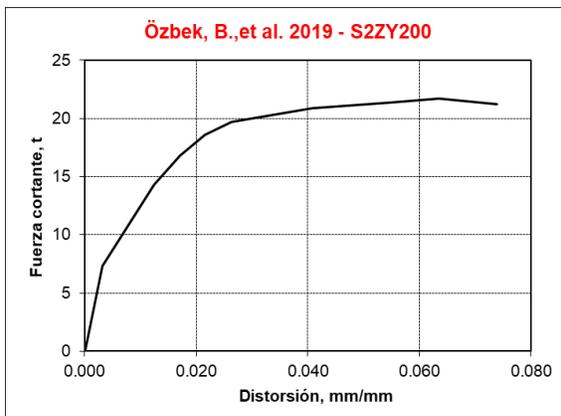
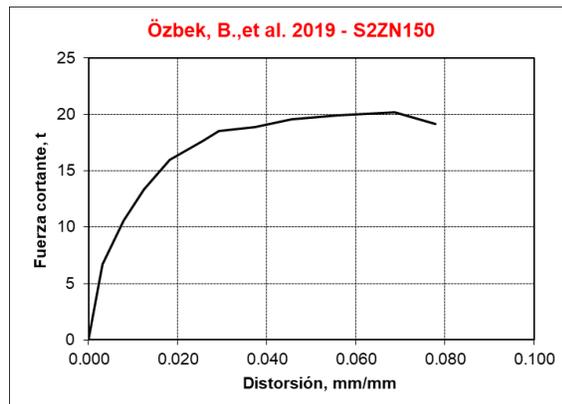
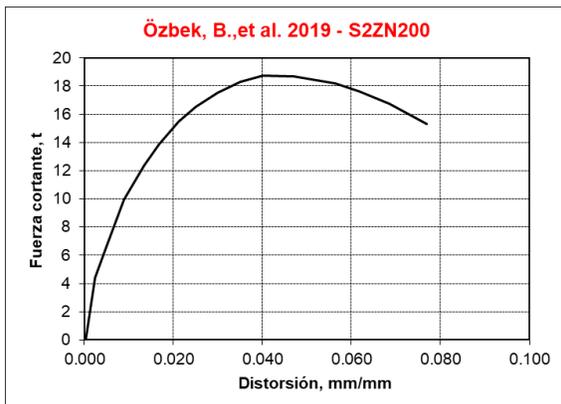
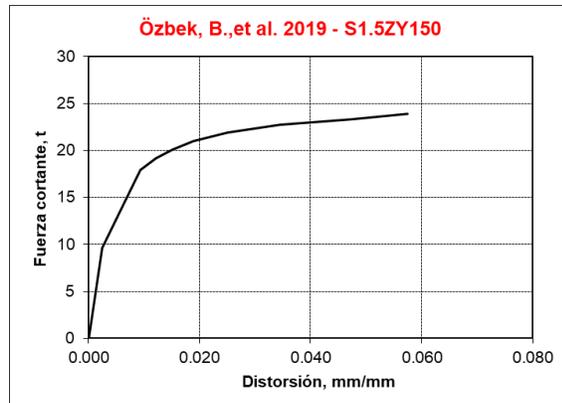
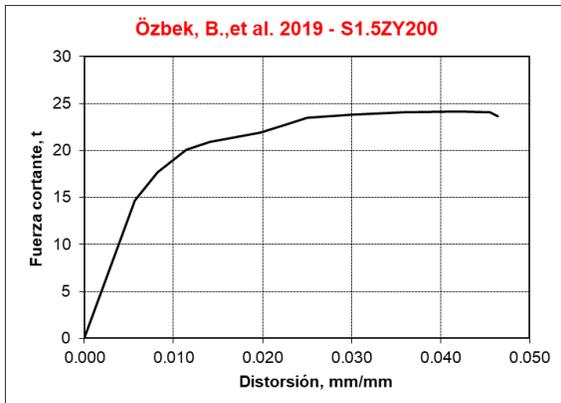


ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE ENCAMISADO CON BANDAS Y PLACAS DE ACERO

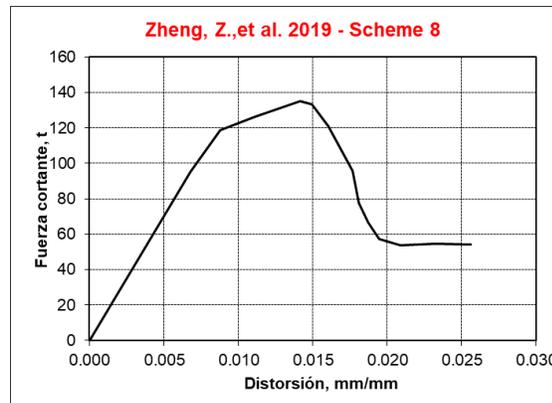
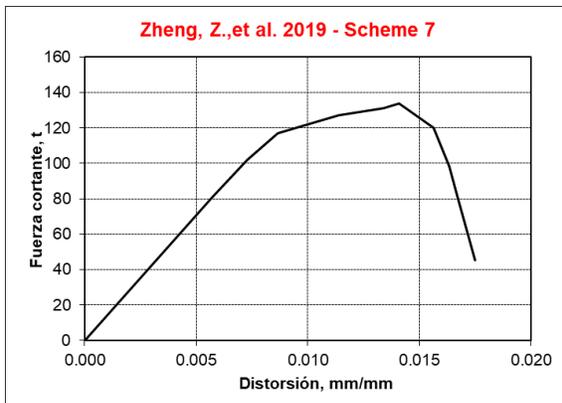
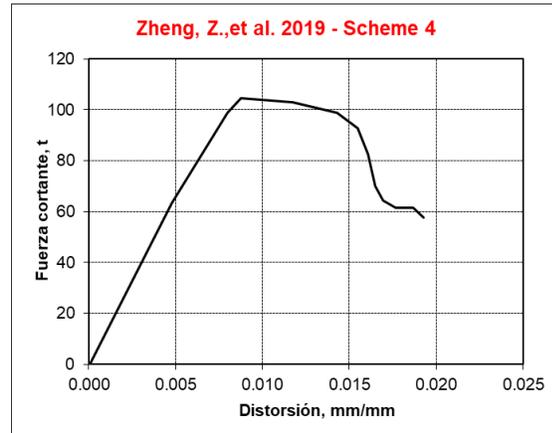
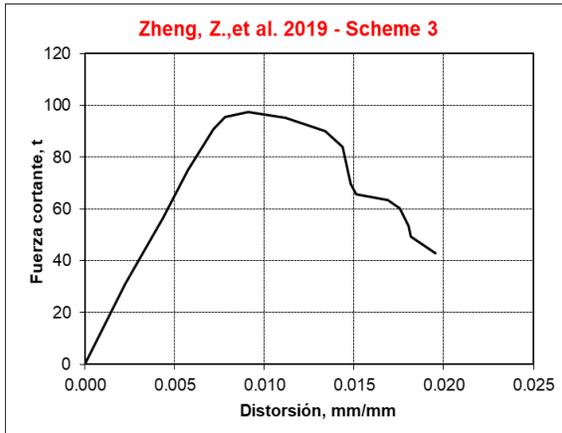
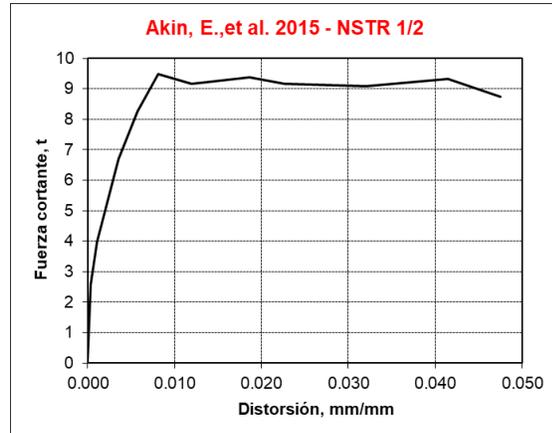
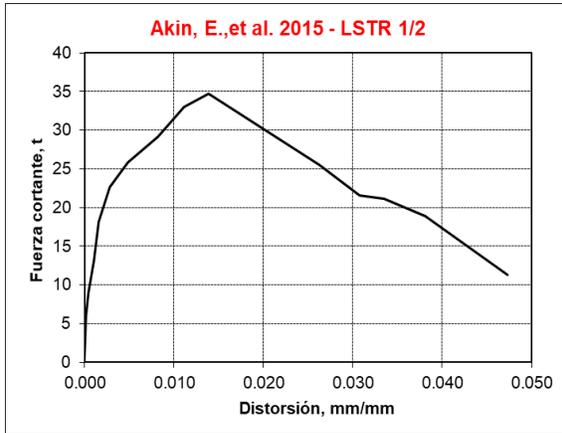


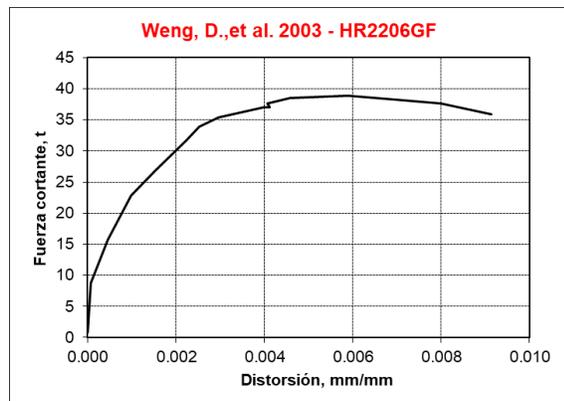
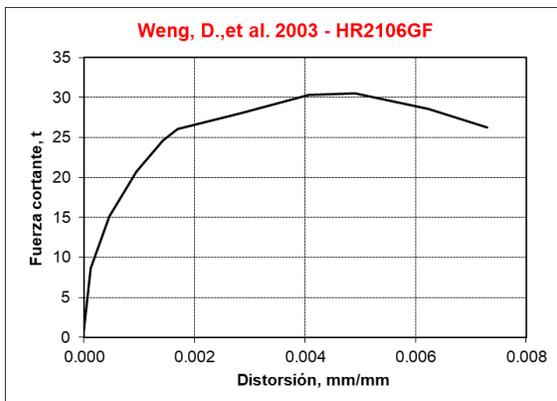
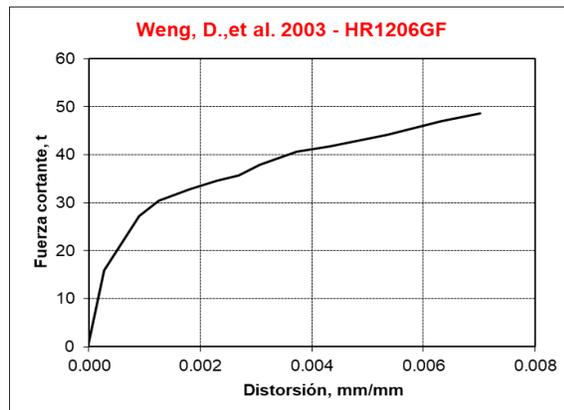
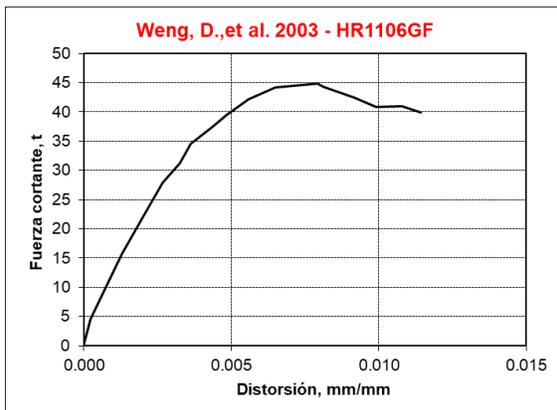
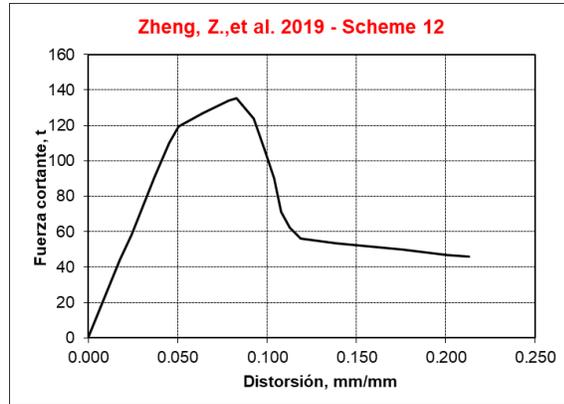
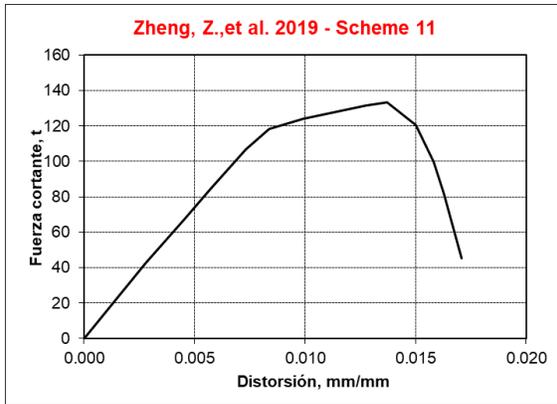




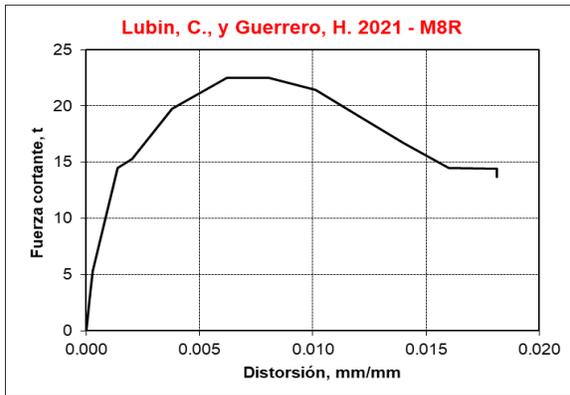


ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE ENCAMISADO CON POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS

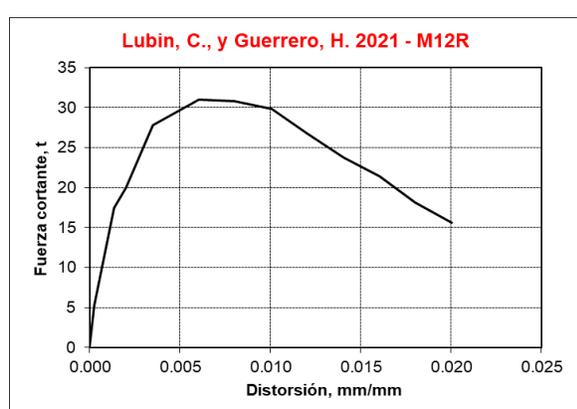
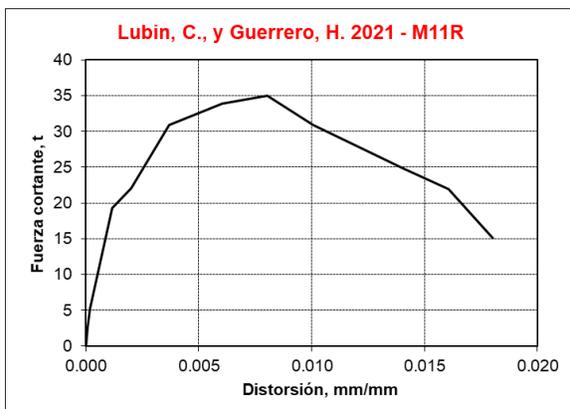
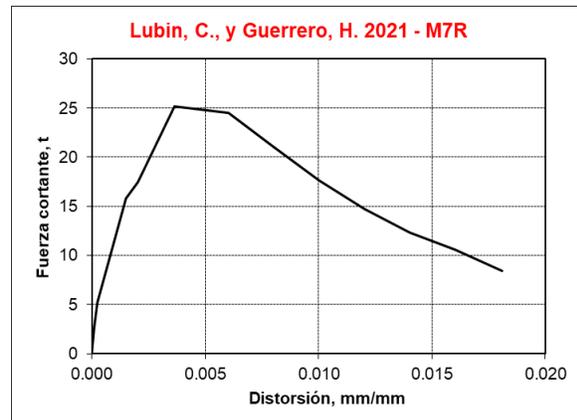
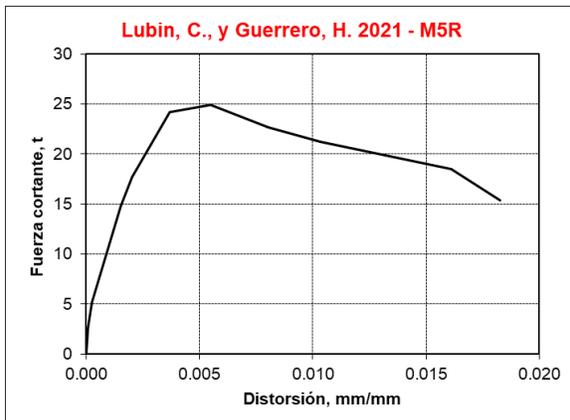


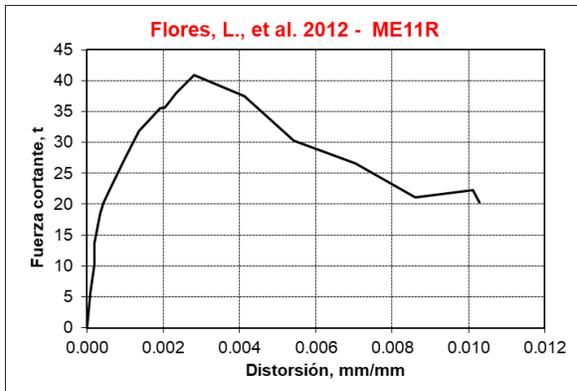


ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE TEXTILES ESTRUCTURALES



ESPECÍMENES REHABILITADOS MEDIANTE ENCAMISADO CON MORTEROS REFORZADOS CON FIBRAS





APÉNDICE D

EJEMPLO DE DISEÑO: REHABILITACIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE MAMPOSTERÍA SIMPLE MEDIANTE ENCAMISADO CON MALLA DE ALAMBRE SOLDADO Y MORTERO

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se propone evaluar y, en su caso, diseñar la rehabilitación de una estructura de uso habitacional ubicada en la colonia Roma Sur, Alcaldía Cuauhtémoc, CP 06760 en la Ciudad de México. El edificio fue dañado en el sismo del 19 de septiembre de 2017. El edificio se llamará edificio Roma Sur.

Como resultado de una inspección visual, se detectó que el edificio tiene tres niveles sobre banqueta. El sistema estructural resistente a cargas gravitacionales es a base de muros de mampostería simple (sin castillos) de piezas de barro recocido (tabique artesanal) con dimensiones nominales de 70 x 140 x 280 mm. Las losas son de concreto, macizas, de 120 mm de espesor. El sistema resistente a fuerzas laterales los constituye los mismos muros de mampostería simple. En la figura D1 se muestran las plantas y elevaciones del edificio en estudio; estos croquis fueron desarrollados a partir de la visita de campo posterior a la evaluación rápida del edificio (INIFED, 2020b).

La cimentación está construida con zapatas corridas de concreto. Durante la inspección se hicieron calas hasta de 400 mm de profundidad en tres puntos distintos y se constató que la cimentación no tiene daño alguno.

Durante el recorrido sólo se observó agrietamiento inclinado en los muros de los primeros dos niveles; no se encontraron otras deficiencias ni daños. La estructura se encuentra separada de los predios vecinos, sin peligro de golpeteo entre ellos.

El propietario del inmueble ha solicitado que la estructura sea evaluada y, en su caso, rehabilitada con el propósito de cumplir con el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (edición de 2017) y con sus Normas Técnicas Complementarias, NTC, (edición 2017).

Para la evaluación y el diseño de la rehabilitación del edificio, de manera complementaria a la NTC-Mampostería, se aplicarán los requisitos de “Rehabilitación Sísmica de la Infraestructura Física Educativa de México. Guía Técnica” (INIFED, 2020a) y de “Evaluación Postsísmica de la Infraestructura Física Educativa de México. Metodología” (INIFED, 2020b). Estos textos contienen información útil para la rehabilitación de cualquier estructura, sin importar el uso o tipo de ocupación del edificio.

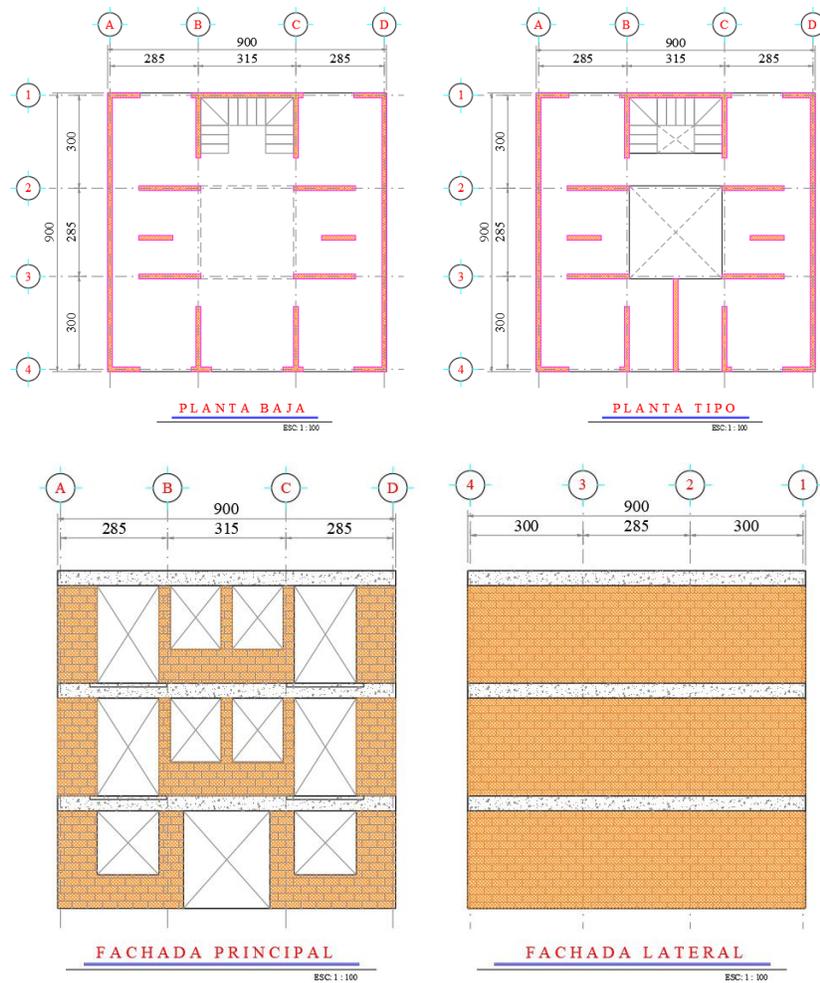
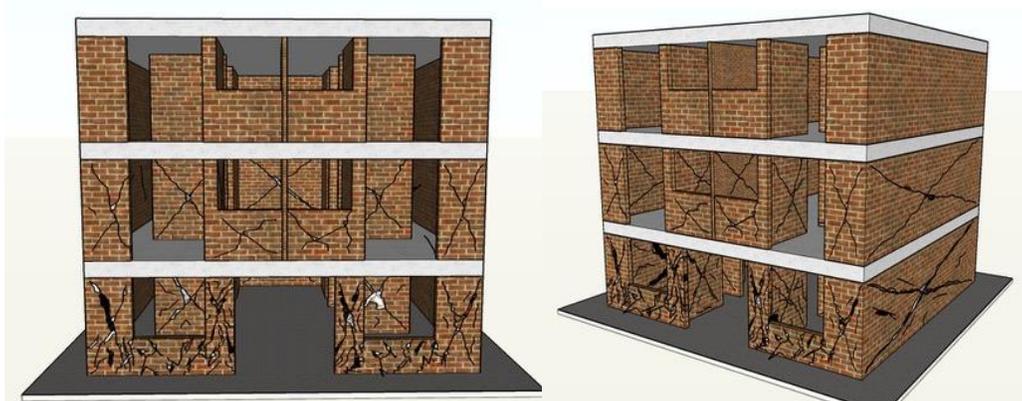


Figura D1. Plantas y elevaciones del edificio Roma Sur.

En la figura D2 se muestran imágenes que ilustran los daños en los muros observados durante la primera visita en la cual se aplicó el Método de Evaluación Rápida (INIFED, 2020b). Como se aprecia, los daños se concentraron en los dos primeros niveles, en forma de grietas inclinadas, en las dos direcciones del edificio. Durante esta visita, siguiendo el protocolo del método, no se obtuvo información detallada relativa al tamaño de grietas y a las propiedades de los materiales.



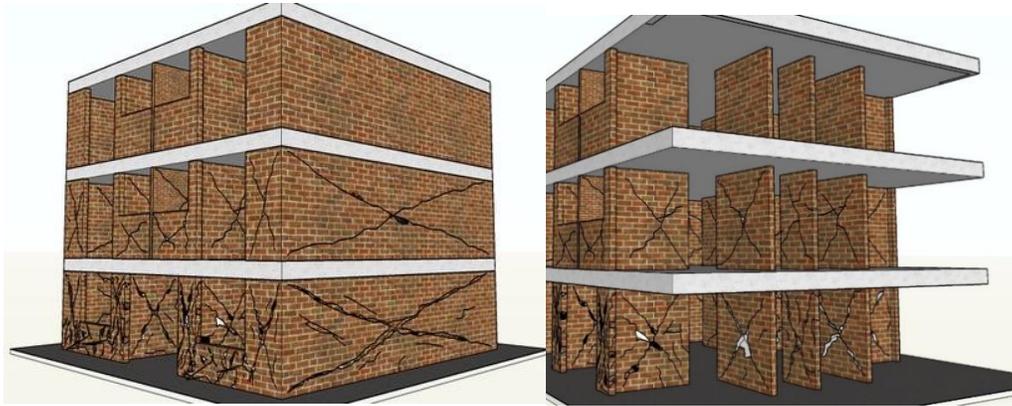


Figura D2. Isométrico del edificio Roma Sur mostrando los daños observados en los muros.

EVALUACIÓN POSTSÍSMICA

Conforme a lo que se indica en la Metodología (INIFED, 2020b), el Método de Evaluación Rápida (MER) o de Primer Nivel se aplica horas después del sismo con objeto de responder si el edificio puede usarse con seguridad. Como resultado del MER, a la estructura se le asigna uno de tres tipos de Avisos: verde o de “Uso Permitido”, si no tiene daño o sus daños no afectan la capacidad estructural ante cargas verticales y fuerzas laterales, rojo o de “Acceso Prohibido” si el daño tiene una intensidad tal que la capacidad estructural está claramente reducida, o bien amarillo “Acceso y Uso Restringidos” cuando la estructura presenta daño sin que éste comprometa la estabilidad de la estructura. En este caso, la estructura fue clasificada con un Aviso rojo, es decir, que se prohíbe el acceso. Es importante hacer notar que un Aviso de color rojo no implica la demolición del edificio. En este nivel de evaluación, no se pide un levantamiento detallado del edificio, ni geométrico ni de daños. Como su nombre lo dice, la evaluación es rápida porque se realiza desde el exterior del edificio para juzgar el posible uso, o no, del edificio.

Con objeto de contar con una estimación de la resistencia a fuerzas laterales de aquellos edificios con Aviso amarillo o rojo, la Metodología (INIFED, 2020b) requiere la aplicación del Método de Evaluación Intermedia (MEI o de Segundo Nivel. El MEI debe ser aplicado días/semanas después del sismo por un ingeniero estructural. Con el MEI se pretende establecer el nivel de daño de cada elemento y su efecto en el comportamiento esperado de la estructura. Esta información será útil para definir el nivel de prioridad con que se debe atender el edificio y definir su rehabilitación. El MEI es útil cuando se tiene un inventario amplio de edificios, sin o con daño, que son candidatos a ser rehabilitados. Si bien este ejemplo sólo trata de un edificio, se aplica con el propósito de ilustrar el proceso.

Ya con la información del MEI, para fines de la rehabilitación (INIFED, 2020a) se define el tipo y alcance del levantamiento geométrico y del daño estructural y no estructural (evaluación de Tercer Nivel o Evaluación Profunda). Será gracias a este levantamiento, con la información que arroje el MEI, que el Proyectista podrá identificar las estrategias de rehabilitación idóneas para el edificio, así como las técnicas de rehabilitación para su implantación. En ocasiones, el tipo de daño y modo de comportamiento son obvios y es posible simplificar los pasos anteriores. En este ejemplo, se ha optado por aplicar el método completo para fines didácticos.

A partir del tipo de daño, que refleja un modo de comportamiento, se puede definir el nivel o intensidad del daño. En el caso del edificio Roma Sur, los daños en los muros son por agrietamiento inclinado únicamente. Ello sugiere que el mecanismo de control del comportamiento de los muros involucra esfuerzos por tensión diagonal. De este modo, de acuerdo con la tabla D1 (tomada de la tabla 6.5 de INIFED, 2020b), el daño en los muros del:

- Primer nivel se puede clasificar como severo ya que:
 - El agrietamiento inclinado (GI) fue superior a 5 mm.
 - La mampostería muestra aplastamiento y desconchamiento.
- Segundo nivel el daño fue moderado en virtud de que:
 - El agrietamiento inclinado no excedió 3 mm y fue mayor que 1 mm.
- Tercer nivel se consideró un nivel de daño nulo.

Para fines de la clasificación de la NTC-Mampostería (2017) en su inciso 11.1.4.2, estos niveles de daño corresponden a daños muy graves y severos, respectivamente.

Tabla D1. Descripción del daño y factores reductivos para edificios de mampostería simple. (INIFED,2020b).

Tabla 6.5 Descripción del daño y factores λ para edificios de mampostería simple con fines de Evaluación Intermedia						
Modo de comportamiento	Daño característico	Nivel de daño	Descripción del daño (uno o más elementos)	Factor reductivo λ		
				λ_K	λ_R	λ_D
Tensión diagonal pura		Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
		Ligero	• $GI < 1$ mm	1.0	1.0	1.0
		Moderado	• $GI < 5$ mm	0.8	0.9	1.0
		Severo	• $GI > 5$ mm y • Aplastamiento/desconchamiento mampostería y/o • $DR > 0.001$ veces la altura del edificio o del entrepiso más deformado	0.4	0.8	0.7
Fuente: cortesía del INIFED (2019).						
Agrietamiento vertical y flexión fuera de plano		Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
		Ligero	• $G < 1$ mm horizontal en plano del muro o vertical en esquina	1.0	1.0	1.0
		Moderado	• $G < 3$ mm	0.9	0.9	0.9
		Severo	• $G > 3$ mm y • Aplastamiento/desconchamiento piezas y • Desfase fuera de plano > 10 mm	0.6	0.6	0.6
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).						

Nota: G : ancho de una grieta perpendicular al eje, usualmente por flexión, mm. GI : ancho de una grieta inclinada, usualmente por tensión diagonal, mm. DR : desplazamiento residual de la estructura o del entrepiso más deformado, mm.

La tabla 6.5 de INIFED (2020b) es una simplificación de la tabla 6.2 de INIFED (2020c) que se muestra en la tabla D2 de este ejemplo.

Cabe resaltar que λ_K representa el factor reductivo de la rigidez lateral, λ_R es el factor reductivo de la resistencia lateral, y λ_D es el factor reductivo de la capacidad de desplazamiento.

Tabla D2. Descripción del daño y factores reductivos para daños ligeros, moderados y severos en estructuras a base de muros de mampostería simple. (INIFED, 2020c).

Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de λ		
					λ_x	λ_y	λ_z
MMS2j Segmento de muro débil	Tensión diagonal pura	Se identifica por grietas inclinadas en forma de letra X a través de piezas. El agrietamiento es súbito, frágil y conduce a una pérdida de la capacidad de carga vertical. Las grietas se pueden extender en toda la diagonal. También se puede presentar en forma de escalera, si el mortero es más débil que las piezas y el esfuerzo axial es bajo.	Nulo	· Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	· $GI < 1$ mm en menos de 5% de las hiladas	1.0	1.0	1.0
			Moderado	· $GI < 5$ mm, que llegan a las esquinas y · Sin aplastamiento de las esquinas	0.8	0.9	1.0
			Severo	· Capacidad de carga vertical comprometida · $GI > 5$ mm y · Aplastamiento/desconchamiento en las esquinas y/o · Movimiento relativo de piezas sobre o a través del plano de la grieta y/o · DR significativo (> 0.001 veces la altura del muro o del segmento de muro), con piezas fuera de lugar	0.4	0.8	0.7



Se recomienda que el lector consulte a INIFED (2020c) si quiere profundizar en el conocimiento de los modos de comportamiento de estructuras de diversos materiales.

EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL E INVESTIGACIÓN DEL EDIFICIO

Inicia nivel 2 de evaluación: Evaluación Intermedia (MEI)

En términos generales, para definir las estrategias de rehabilitación y diseñar las técnicas apropiadas para corregir las vulnerabilidades o deficiencias estructurales, se debe evaluar la seguridad estructural del edificio. Mediante este proceso se logran identificar las deficiencias estructurales, cuando el edificio no está dañado. Cuando presenta daño, las principales vulnerabilidades pueden ser evidentes. No obstante que tenga daño, conviene realizar una estimación de la seguridad estructural de manera de identificar otros modos de falla que puedan ocurrir, una vez que se haya mitigado la vulnerabilidad manifiesta por el daño. Así, dependiendo del tipo, magnitud y extensión del daño, será necesario estimar la capacidad estructural del edificio (resistencia, rigidez y capacidad de deformación).

De acuerdo con el Capítulo 10 de la NTC-Mampostería (2017), la evaluación de un edificio consta de las siguientes etapas:

- Investigación y documentación de la edificación y de las acciones que la dañaron.
- Clasificación del daño en los elementos de la edificación.
- Evaluación del impacto de elementos dañados en el comportamiento de la edificación.
- Determinación de la necesidad de rehabilitación.

Para llevar a cabo cada una de las etapas de evaluación mencionadas anteriormente deberá realizarse una planeación detallada de los aspectos que deberán revisarse para contar con la información completa necesaria. Se recomienda aplicar el procedimiento establecido en el Apéndice 3 de INIFED (2020a). Para este ejemplo, se tiene lo siguiente:

1. Hacer fotografías de fachadas frontales, posteriores y laterales, de ser posible.

Se supone que se hicieron fotos. No se presentan aquí.

2. Revisar las colindancias de la edificación.

2.1	Separación entre colindancias	✓	Colindancia Este = 30 cm Colindancia Oeste = 30 cm
2.2	¿Se cuenta con tapajuntas?	✓	Sí

2.3	¿La junta está limpia? ¿Existen obstrucciones?	✓	Junta limpia y sin obstrucciones
2.4	¿El edificio es propenso a golpeteo?	✓	No
2.5	Altura aproximada de edificios vecinos	✓	Edificio Este = 12 m Edificio Oeste = 15 m
2.6	¿Las losas de los edificios vecinos coinciden con las del edificio en estudio o con sus columnas?	✓	Edificio Este = No coinciden las losas, las columnas en PB son más altas que en los demás niveles Edificio Oeste = Las losas coinciden, pero el edificio está muy separado

3. Revisar problemas geotécnicos, con su documentación fotográfica.

3.1	¿Existen hundimientos (falla rotacional generalizada, por punzonamiento, local, desplazamiento horizontal)?	✓	No
3.2	¿Se presenta emersión del edificio?	✓	No
3.3	¿El edificio presenta inclinación?	✓	No
3.4	¿Hay agrietamiento en suelos?	✓	No
3.5	¿Se encontraron filtraciones o inundación en la cimentación?	✓	No, mediante las calas de 400 mm de profundidad no se observó ningún tipo de daño
3.6	¿Se presentó desplazamiento lateral debido a licuación?	✓	No
3.7	¿Se presenta inestabilidad de laderas (caídos, flujos)?	✓	No
3.8	¿Se observan árboles inclinados o emergidos?	✓	No
3.9	¿Se presentan movimientos del terreno adyacente a fallas superficiales?	✓	No, y no se presentaron fallas superficiales

4. Confirmar información del proyecto original.

4.1	¿Se conoce la fecha de construcción?	X	El dueño del edificio desconoce la fecha exacta de construcción, pero asegura que el edificio se construyó antes de 1985
4.2	¿Se conoce el nombre del diseñador?	X	No
4.3	¿Se cuenta con planos estructurales, arquitectónicos, memorias originales?	X	No, se solicitaron los documentos al dueño del edificio, sin embargo, no se cuenta con ellos
4.4	¿Se verificó el uso del edificio en todos los niveles?	✓	Sí, el uso en todos los niveles es habitacional
4.5	¿Hay variaciones del sistema estructural en elevación?	✓	No

5. Identificar vulnerabilidades

5.1	Posición en manzana	✓	Medio
5.2	Identificar		
5.2.1	Sistema estructural resistente a cargas gravitacionales (SERCG)	✓	Muros de carga de mampostería simple
5.2.2	Sistema estructural resistente a fuerzas laterales (SERFL)	✓	Muros de carga de mampostería simple

5.2.3	Tipo de cimentación y profundidad	✓	Zapatas corridas, 60 cm
5.2.4	Tipo de sistema de piso	✓	Losa maciza de concreto reforzado. 120 mm de peralte
5.3	Hacer un croquis de todas las plantas donde se identifique la ubicación de los elementos sismo-resistentes y su posición respecto a los ejes ortogonales principales		
5.3.1	Largo y ancho de todas las plantas	✓	Largo = 9 m Ancho = 9 m
5.3.2	Altura total del edificio, altura del primer nivel y alturas de entrepisos	✓	Altura total = 7.5 m Altura del primer nivel = 2.5 m Altura de entrepisos = 2.5 m
5.3.3	Número de niveles sobre nivel de banqueta	✓	3 niveles
5.3.4	Número de sótanos y profundidad de sótanos	✓	Sin sótanos
5.3.5	Dimensiones de elementos estructurales en todos los niveles en forma aleatoria	✓	Espesor de losas = 120 mm Espesor de muros de mampostería= 140 mm
5.3.6	¿Se conocen las propiedades de los materiales de los elementos estructurales?	✗	No se tiene información relativa a las propiedades de los materiales y no se realizaron pruebas en campo para su determinación. Estas se supondrán con base en la Guía Técnica (INIFED, 2020a)
5.4	Existencia de mecanismo de transmisión de cargas directo		
5.4.1	¿Los diafragmas horizontales puedan transmitir fuerzas a elementos verticales?	✓	No se encontró daño en ningún diafragma horizontal
5.4.2	¿Los elementos verticales del SERFL puedan transmitir las fuerzas a la cimentación?	✓	Mediante las calas se corroboró la adecuada conexión de los muros a las zapatas corridas
5.4.3	¿La cimentación transmite las fuerzas al suelo?	✓	No se encontraron deficiencias y/o daños en la cimentación por lo que se supuso que hay una adecuada transmisión de fuerzas
5.5	Irregularidades verticales		
5.5.1	¿Existen cambios de rigideces en entrepisos contiguos?	✓	Se supone un cambio de rigidez en el segundo y tercer nivel, dado que poseen un muro adicional en dirección "Y", respecto al primer nivel.
5.5.2	¿Existe planta baja débil?	✓	No
5.5.3	¿Existen marcos o muros que no llegan a la cimentación?	✓	Mediante las calas realizadas se aseguró que los muros llegan a la cimentación
5.5.4	¿Existen concentraciones de peso en algún nivel?	✓	Sí, existe una concentración de peso en la losa de la azotea, debido a que se cuenta con depósitos de agua
5.5.5	¿El edificio cuenta con cisternas o tanques elevados de agua o gas en la azotea?	✓	Sí, el edificio cuenta con dos depósitos de agua de 1,000 L cada uno apoyados libremente sobre muros de mampostería de 700 mm de altura.
5.5.6	¿Existen cambios de geometría en elevación?	✓	No

5.5.7	¿Existe algún mezanine?	✓	No
5.5.8	¿Existen columnas/muros con diferentes alturas en un mismo nivel o no son continuos de un piso a otro?	✓	Existe un muro en dirección “Y” en el segundo y tercer nivel que no es continuo hasta el primer nivel
5.5.9	¿Es posible que se pueda presentar un efecto de columna corta?	✓	No
5.6	Irregularidades en planta		
5.6.1	¿Se revisó la distribución en planta de elementos verticales de SERFL?	✓	Sí, se hizo la revisión y levantamiento de estos elementos
5.6.2	Medida del largo y ancho de entrantes y salientes (balcones, losas en voladizo)	✓	El edificio no posee entrantes ni salientes
5.6.3	Medida del largo y ancho de cubos de luz, elevadores y escaleras	✓	Ancho de cubo de luz = 3.15 m Largo del cubo de luz = 2.85 m Ancho de cubo de escaleras = 3.15 m Largo de cubo de escaleras = 2.03 m
5.6.4	Medida de aberturas en niveles de piso, ¿Las posiciones de estas aberturas difieren de un piso a otro?	✓	El edificio no posee aberturas en niveles de piso
5.6.5	¿Existen cambios de geometría de plantas en elevación?	✓	No
5.6.6	¿Se levantó información para una posterior revisión del sistema de piso como diafragma rígido?	✓	Sí, la información fue levantada y archivada para su posterior revisión
5.7	Falta de redundancia		
5.7.1	¿El edificio posee una estructuración de péndulo invertido?	✓	No
5.7.2	¿Existe algún elemento o subsistema ostensiblemente más resistente que el resto, en planta?	✓	No
5.8	Falta de capacidad de deformación inelástica		
5.8.1	¿El edificio es propenso a presentar, o presentó el fenómeno de “columna corta”?	✓	No, dado que el edificio posee un sistema a base de muros de mampostería simple
5.8.2	¿El edificio posee un sistema de columnas débiles-vigas fuertes?	✓	No, no aplica

6. Evaluar daños

6.1	¿El edificio presentó fallas en cimentación?	✓	No, mediante las calas realizadas no se observaron fallas en la cimentación
6.2	¿El edificio presentó golpeteo con edificios vecinos?	✓	No
6.3	¿Existió colapso parcial?	✓	No
6.4	¿Fue posible medir las deflexiones laterales de cada entrepiso?	✓	No se incluyeron las medidas de las deflexiones en el levantamiento realizado
6.5	Daños en elementos estructurales tipo columnas, vigas, vigas de acoplamiento, castillos y dalas, incluyendo en elementos estructurales de la cimentación		
6.5.1	¿Se observó acero expuesto?	✓	No aplica
6.5.2	¿Se observó acero pandeado?	✓	No aplica

6.5.3	¿Se observó aplastamiento del concreto?	✓	No aplica
6.5.4	¿Se observó pandeo en columnas y/o castillos?	✓	No aplica
6.5.5	¿Se realizó una medición de las grietas en estos elementos?	✓	No aplica
6.6	Daños en muros de carga y diafragma		
6.6.1	¿Se observó acero expuesto?	✓	No, los muros no están reforzados
6.6.2	¿Se observó acero pandeado?	✓	No, los muros no están reforzados
6.6.3	¿Se observó aplastamiento del concreto y/o de la mampostería?	✓	Sí, se observó aplastamiento de la mampostería en las esquinas de los muros
6.6.4	¿Se observó pandeo de muros?	✓	No, sin embargo, se observó desprendimiento de piezas de mampostería
6.6.5	¿Se presentó volteo en muros?	✓	No
6.6.6	¿Se realizó una medición de las grietas en estos elementos?	✓	Sí, se realizó un levantamiento de cada uno de los ejes del muro donde se presenta el tamaño máximo de grietas (ver figura 3)
6.7	Daños en conexiones		
6.7.1	¿Se observó acero expuesto?	✓	No aplica
6.7.2	¿Se observó acero pandeado?	✓	No aplica
6.7.3	¿Se observó aplastamiento del concreto?	✓	No aplica
6.7.4	¿Se realizó una medición de las grietas en conexiones?	✓	No aplica
6.8	Daño en losas		
6.8.1	¿Se observó acero expuesto?	✓	No
6.8.2	¿Se observó acero pandeado?	✓	No
6.8.3	¿Se realizó una medición de grietas en las losas?	✓	Las losas no presentaron ningún daño aparente
6.9	Daños en exteriores		
6.9.1	¿Hubo daños en vidrios?	✓	Sí, se presentaron daños en vidrios de ventanas
6.9.2	¿Hubo daños en torres de anuncios?	✓	No, el edificio no posee torres de anuncios
6.9.3	¿Hubo daños en antenas de telecomunicaciones?	✓	No, el edificio no posee antenas de telecomunicaciones
6.9.4	¿Hubo daños en acabados?	✓	Sí, en todos los acabados de los muros del primer y segundo nivel
6.9.5	¿Hubo daños en fachadas?	✓	Sí
6.9.6	¿Hubo daños en balcones?	✓	No, el edificio no posee balcones
6.9.7	¿Hubo daños en pretilas?	✓	Sí, se presentó daño en todos los pretilas del primer y segundo nivel
6.9.8	¿Hubo daño en tanques elevados?	✓	No se observó daño en los muros de soporte de los depósitos de agua, ni deslizamiento relativo entre los depósitos y los muros de soporte
6.9.9	¿Hubo daño en bardas?	✓	No
6.9.10	¿Hubo daño en salidas de emergencia?	✓	No, el edificio no posee salidas de emergencia

6.10	Daños en interiores		
6.10.1	¿Hubo daños en muros divisorios?	✓	Sí
6.10.2	¿Hubo daño en plafones?	✓	No aplica
6.10.3	¿Hubo daño en lámparas?	✓	Sí
6.10.4	¿Hubo daño en cubos de escaleras, elevadores, luz?	✓	Sí, se observó que uno de los muros del cubo de escaleras fue el que mayor daño presentó en el primer y segundo nivel
6.10.5	¿Hubo daño en instalaciones?	✓	No, los usuarios y las instancias correspondientes no encontraron daño en las instalaciones
6.10.6	¿Se presentaron fugas o derrames de materiales peligrosos?	✓	No
6.11	Deterioro de los materiales		
6.11.1	¿Se observó deterioro en los materiales por edad?	✓	Se observó una mampostería antigua, de mala calidad de ejecución (juntas de mortero incompletas, por ejemplo)
6.11.2	¿Se observó deterioro por falta de mantenimiento?	✓	No
6.11.3	¿Se observó deterioro por corrosión?	✓	No

7. Rehabilitación previa del edificio

7.1	En caso de qué aplique, ¿se conoce el año de rehabilitación del edificio?	X	Se desconoce, el dueño del edificio no conoce esta información
7.2	¿Se conocen las técnicas empleadas durante la rehabilitación previa?	X	Se desconoce que haya existido una rehabilitación previa, sin embargo, por las condiciones del edificio se tiene la hipótesis de que no ha tenido rehabilitaciones previas

Como parte de las visitas para inspección de daños y obtención de información del MEI, se realizó un croquis de todas las plantas del edificio con la finalidad de identificar y ubicar los elementos sismo-resistentes y su posición respecto a los ejes ortogonales principales. Conviene hacer notar que ello fue necesario dado que no fue posible obtener planos arquitectónicos, estructurales o memorias de cálculo originales que permitieran conocer las condiciones con las que fue diseñado el edificio. Estos croquis pueden observarse en la figura D1.

Adicionalmente, como parte del MEI, se realizó un levantamiento de los daños observados en la estructura. En la figura D3 se muestran los patrones de agrietamiento en los muros ubicado a lo largo de cada eje del edificio. En las gráficas se señaló el ancho máximo de grieta para cada muro. Como se puede observar, el comportamiento de los muros estuvo controlado por tensión diagonal pura, prácticamente sin agrietamiento por flexión. El agrietamiento se midió con un comparador de grietas. La distorsión residual se midió con una plomada y flexómetro.

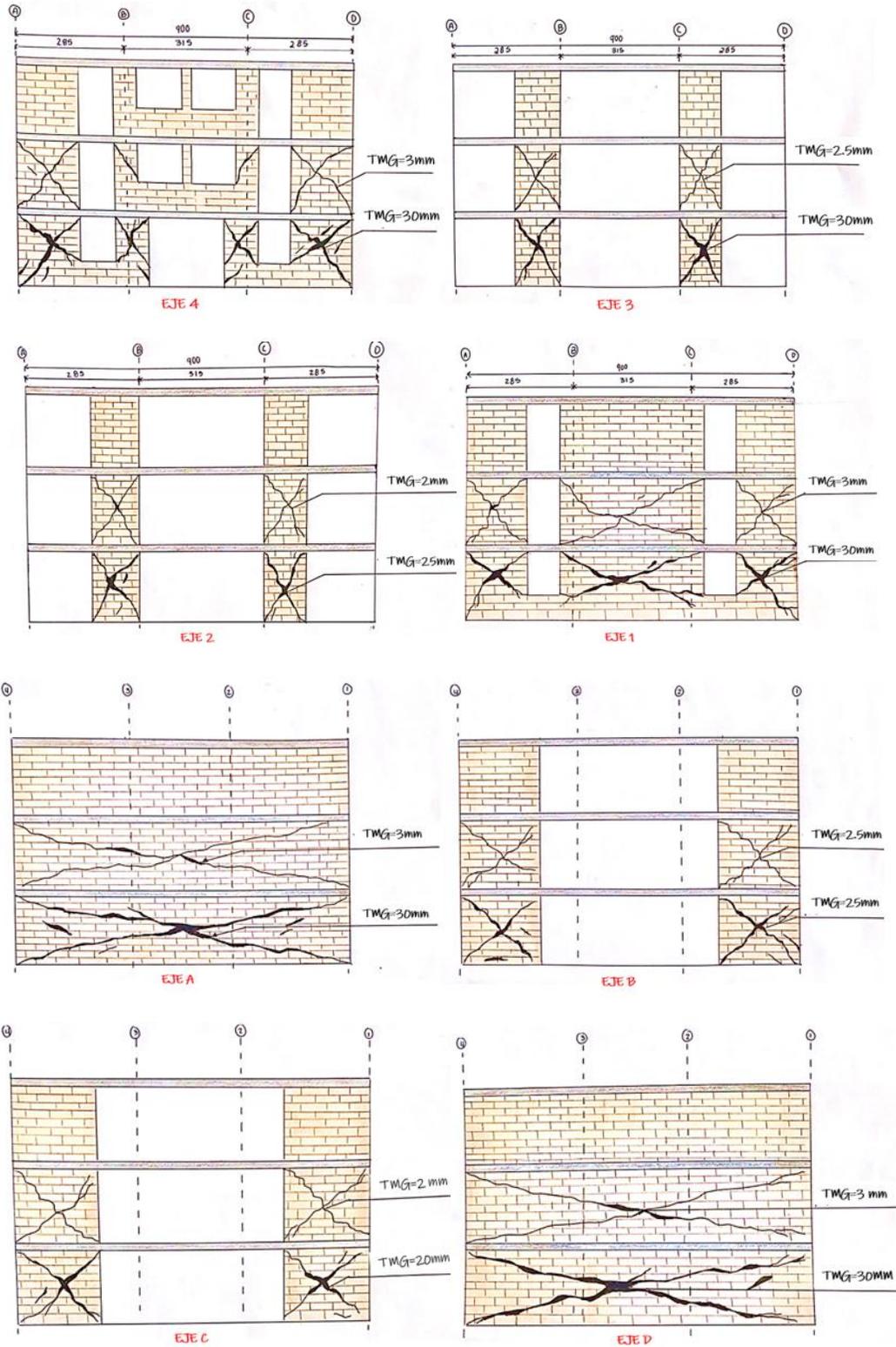


Figura D3. Patrones de agrietamiento de los muros del edificio Roma Sur.

ANÁLISIS DEL DAÑO EN LA ESTRUCTURA

En este caso, el daño del edificio se presume que se debe a una insuficiente resistencia a fuerza lateral de los muros de mampostería simple, además de una muy baja capacidad de deformación lateral por la ausencia de elementos de confinamiento o elementos de concreto que tengan una función equivalente. En los siguientes incisos se harán los cálculos necesarios para probar, modificar o descartar esta hipótesis.

En un edificio sin daño o con daño menos obvio, se debe estimar la seguridad estructural con objeto de identificar el nivel más crítico del edificio, el tipo de daño que con mayor probabilidad puede ocurrir, así como el grado de deficiencia de las características estructurales (resistencia, rigidez y capacidad de deformación). Este esfuerzo requiere de cálculos similares a los que se presentan a continuación.

Efecto del sismo en la estructura

De acuerdo con el propietario, el edificio no mostraba daño en la estructura antes del sismo del 19 de septiembre de 2017. Para determinar las demandas que causaron el daño, se revisó la lista de estaciones acelerográficas del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES). Como se muestra en la figura D4, la estación más cercana es la CJ04, ubicada en el Multifamiliar Juárez II en la colonia Roma. Es importante mencionar que debe tomarse en consideración la distancia de la estación respecto a la estructura en estudio y a su vez, deberá tomarse en cuenta la aceleración máxima presentada para poder seleccionar la estación más adecuada.

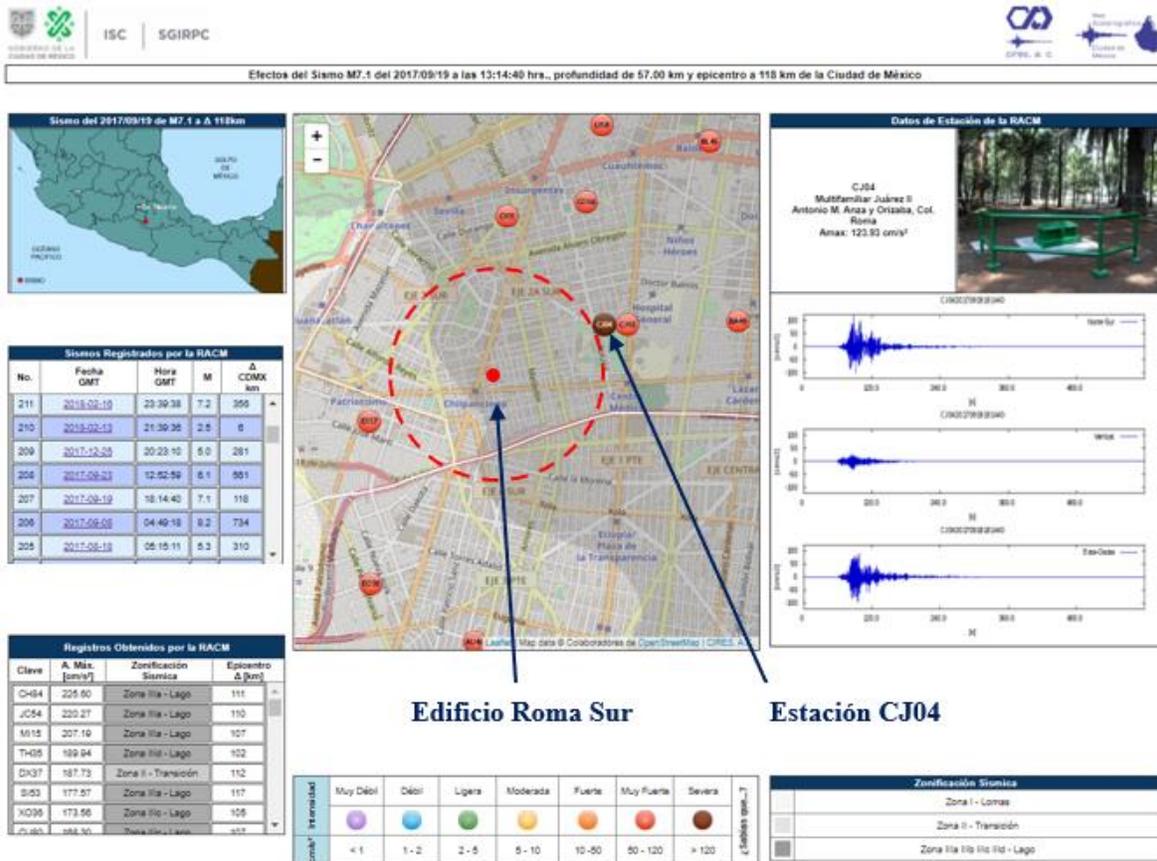


Figura D4. Ubicación de la estación acelerográfica más cercana al punto de estudio para el sismo del 19 de septiembre de 2017.

El CIRES facilitó el registro del sismo en sus tres componentes (CIRES, 2021). Se procesaron las componentes horizontales del sismo mediante el software DEGTRA y se obtuvieron los espectros de respuesta de aceleración y desplazamiento que se muestran en la figura D5, suponiendo un factor de amortiguamiento crítico de 5 por ciento.

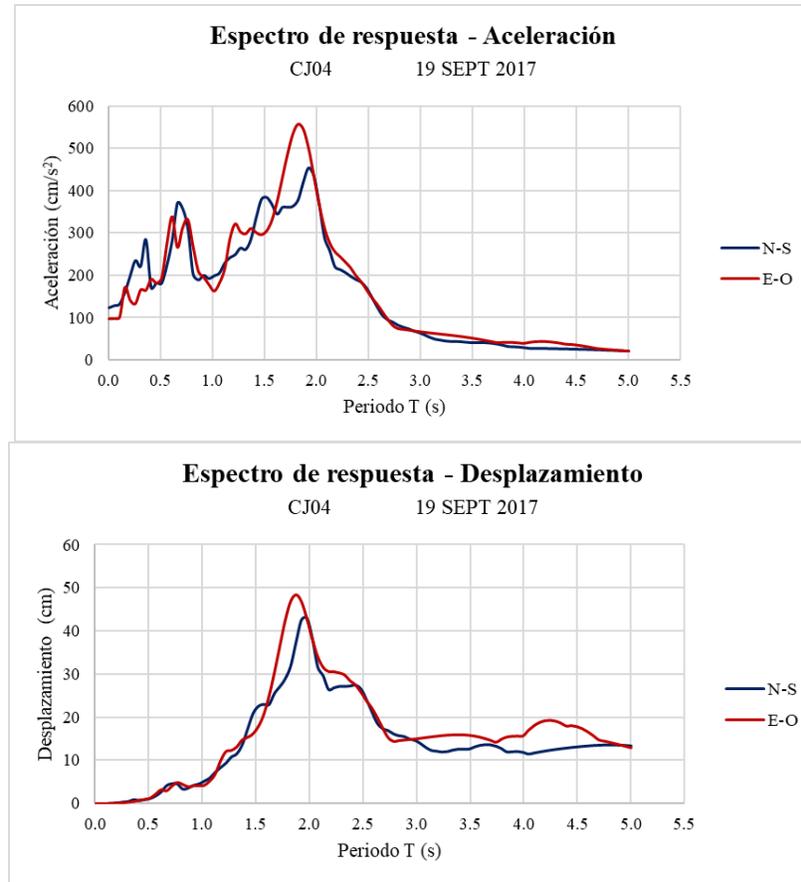


Figura D5. Espectros de aceleración y desplazamiento para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la estación CJ04.

Estimación el periodo en la estructura

Para analizar los efectos del sismo en la estructura y dado que no se contó con memoria de cálculo original, se empleó la ecuación 4.3.1 de INIFED (2020a) para estimar el intervalo de periodos de vibrar efectivos del sistema suelo-estructura \tilde{T}_e en función del número de pisos, n , para edificios a base de marcos y muros en terreno blando (tipo III):

$$\tilde{T}_e = (0.085 \text{ a } 0.095)n \quad (\text{INIFED 2020a. Ec. 4.3.1})$$

donde:

\tilde{T}_e = Periodo de vibrar efectivo del sistema suelo-estructura

n = Número de niveles

Para $n = 3$

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{e1} &= (0.085)(3) = 0.255 \text{ s} \\ \tilde{T}_{e2} &= (0.095)(3) = 0.285 \text{ s} \end{aligned}$$

Valores de aceleración y desplazamiento

Una vez calculado el intervalo de periodos de la estructura es necesario encontrar los valores correspondientes de aceleración y desplazamiento de los espectros de respuesta correspondiente. En las tablas D3 y D4 se presentan las aceleraciones y desplazamientos calculados a partir de los espectros correspondientes a los dos periodos calculados para el edificio.

Tabla D35 Aceleraciones correspondientes al periodo de la estructura obtenidas del espectro de aceleración de la estación CJ04.

CJ04 - 19 SEPT 2017			CJ04 - 19 SEPT 2017		
T	N-S	E-O	T	N-S	E-O
	Sa	Sa		Sa	Sa
s	cm/s ²	cm/s ²	s	cm/s ²	cm/s ²
0.212	198.64	140.77	0.262	198.64	140.77
0.255	229.99	133.87	0.285	215.25	137.11
0.262	235.06	132.75	0.312	235.06	132.75

Tabla D36 Desplazamientos correspondientes al periodo de la estructura obtenidos del espectro de desplazamientos de la estación CJ04.

CJ04 - 19 SEPT 2017			CJ04 - 19 SEPT 2017		
T	N-S	E-O	T	N-S	E-O
	Sd	Sd		Sd	Sd
s	cm	cm	s	cm	cm
0.212	0.23	0.16	0.262	0.41	0.23
0.255	0.38	0.22	0.285	0.47	0.31
0.262	0.41	0.23	0.312	0.55	0.41

Mediante los valores obtenidos a través de interpolación lineal y suponiendo que la estructura responde en un primer modo, las aceleraciones y desplazamientos se ubicarían dentro de los espectros correspondientes como se muestra en la figura D6. Como se aprecia del espectro de aceleraciones, el intervalo de periodos coincide con un pico del espectro de aceleraciones y está cerca de otro más grande, si estos periodos aumentaran a razón del comportamiento inelástico de la estructura.

No se intentó comparar la demanda de aceleraciones del 19 de septiembre de 2017 con la de diseño en la época en que se construyó el edificio, ya que no se conoce el año. Más aún se desconoce si el edificio fue diseñado formalmente o bien fue autoconstruido sin participación de un ingeniero, arquitecto o similar. Como mera curiosidad se incluye en la figura D6 los niveles de aceleración para los que se hubiesen diseñado la estructura de acuerdo con el RDF de 1966 y de 1976, usando un factor de comportamiento sísmico igual a 1.0. Como se aprecia, la demanda del sismo del 19 de septiembre fue superior a las supuestas que pudieron haber sido utilizadas en el diseño.

Cabe resaltar que los valores de aceleración como fracción de la gravedad, obtenidos con el RDF de 1966 y de 1976 corresponden a las ordenadas espectrales para diseño sísmico asociadas a los

periodos de vibración de la estructura obtenidos anteriormente, correspondientes a un factor de comportamiento sísmico $Q=1$.

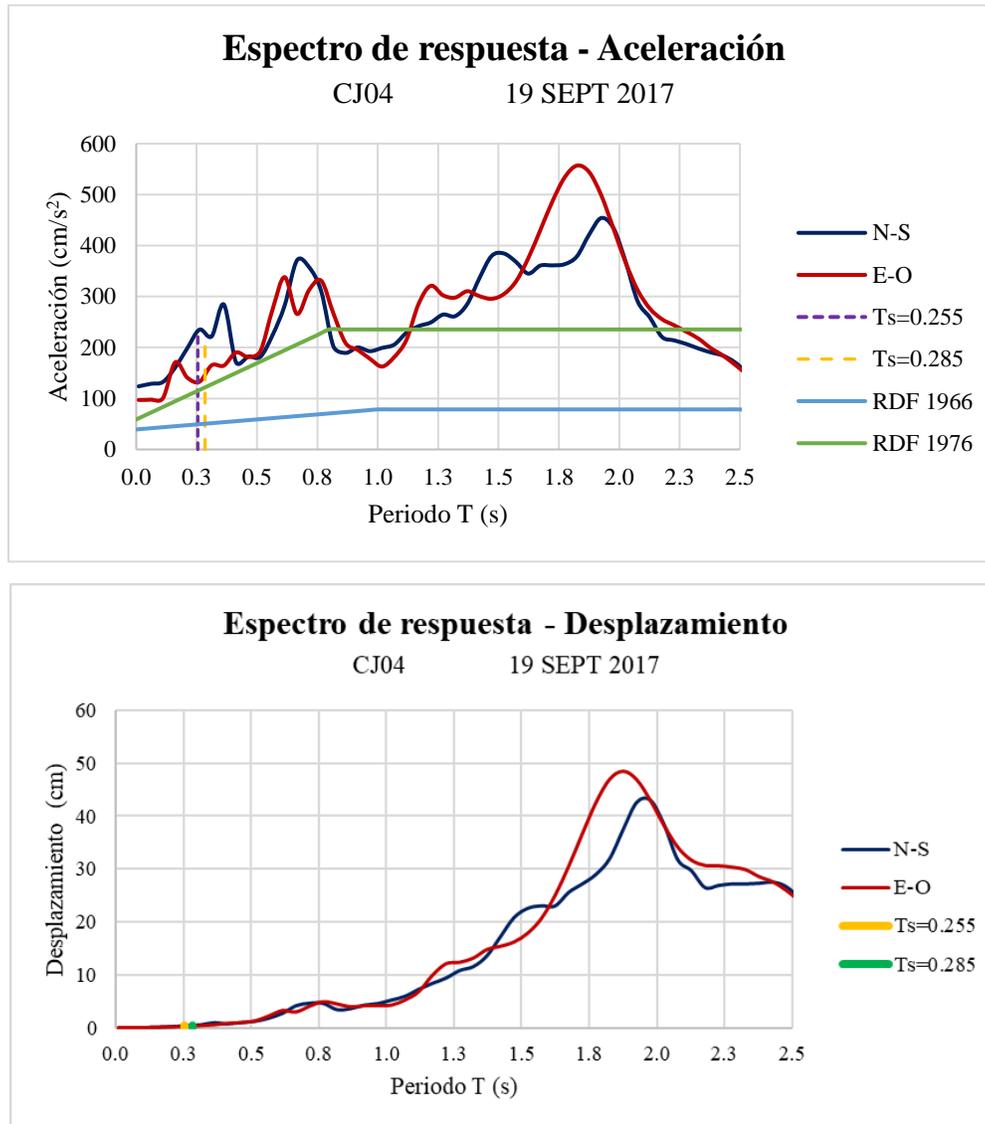


Figura D6. Espectros de aceleración y desplazamiento para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la estación CJ04 y el intervalo de periodos estimados para el edificio Roma Sur.

Posteriormente, para estimar en primera instancia los posibles efectos del sismo en la estructura, se calcularon las demandas de distorsión para la misma. De acuerdo con la sección 1.8 de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo (NTC-Sismo, 2017), la distorsión de entrepiso se define como la diferencia entre los desplazamientos laterales de los pisos consecutivos que lo delimitan dividida entre la diferencia de elevaciones correspondiente.

Se calcularon las distorsiones asociadas a los desplazamientos obtenidos del espectro de la estación CJ04 tomando en consideración un factor de comportamiento sísmico $Q=1$ y un factor de sobrerresistencia $R=1$. De acuerdo con la tabla 4.2.3 de la NTC-Sismo (2017), la distorsión límite para estructuras a base de muros de carga de mampostería de piezas huecas o macizas no confinadas ni reforzadas es $\gamma_{max}=0.002$ (0.2%). En este caso, dadas las condiciones y la calidad de

la mampostería observada durante el levantamiento de daños, se consideró una distorsión límite $\gamma_{max}=0.0015$ (0.15%). A su vez, se consideró que la mampostería presenta agrietamiento a partir de una distorsión $\gamma=0.001$ (0.1%). En la tabla D5 se muestran los resultados del cálculo de distorsiones.

Tabla D5. Distorsiones obtenidas a partir de los desplazamientos del registro CJ04 para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en el edificio Roma Sur.

CJ04 - 19 SEPT 2017						
T	Dirección	Sd	H	Distorsión	Condición	
s		cm	cm	%	Daño observado	$\gamma_{calculado} > \gamma_{m\acute{a}x}$
0.255	N-S	0.38	250	0.15	Presenta agrietamiento	No cumple
	E-O	0.22	250	0.09	Presenta agrietamiento	Cumple
0.285	N-S	0.47	250	0.19	Presenta agrietamiento	No cumple
	E-O	0.31	250	0.12	Presenta agrietamiento	Cumple

Del estudio de la figura D6 y de los resultados de la tabla D5, se puede concluir que, como se supuso, el daño presentado en la estructura se atribuye a que las fuerzas generadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017 fueron superiores a las que se suponen se usaron en el diseño, así como que, en la dirección Norte-Sur (N-S), las demandas de distorsión sobrepasaron los valores límite permitidos.

Modelo numérico

Con la finalidad de comprender el comportamiento de la estructura en general, y del impacto del daño provocado por el sismo en los muros de la estructura, es necesario elaborar un modelo de análisis cuyas propiedades y características sean semejantes a las del edificio en estudio.

El modelo de análisis permitirá establecer la seguridad estructural a partir del cálculo de la siguiente relación:

$$\frac{\text{Demanda}}{\text{Capacidad}} = \frac{\text{Fuerzas actuantes sobre la estructura}}{\text{Resistencia del sistema estructural}}$$

En este cociente la capacidad está determinada por la resistencia nominal del sistema estructural del edificio. Para el cálculo de la resistencia se toma en consideración la degradación de sus propiedades debido al daño. La resistencia se calcula de acuerdo con las NTC vigentes correspondientes al material y tipo de sistema estructural que se esté analizando, en este caso la NTC-Mampostería (2017). En términos de demanda, se calcularán las fuerzas internas, deformaciones, rotaciones y desplazamientos que producen los sismos de diseño. Cabe señalar que el cociente anterior se expresa en este caso en términos de resistencia. Sin embargo, es aceptable comparar las capacidades y demandas de desplazamiento, rotaciones o de cualquier otro parámetro de la respuesta de una estructura.

Hipótesis para el análisis

En la elaboración del modelo numérico de la estructura fue necesaria la formulación y consideración de hipótesis que permitieran simplificar el análisis, así como cubrir la falta de información relativa a las consideraciones de diseño y análisis de la memoria de cálculo original. Las hipótesis consideradas para este ejemplo están basadas en lo que se sugiere en las NTC-Sismo (2017), NTC-Mampostería (2017) y en la Guía de Análisis de Estructuras de Mampostería (SMIE, 2015).

a) Resistencias de diseño a flexocompresión:

- a) La mampostería se comporta como material homogéneo.
- b) La distribución de deformaciones unitarias longitudinales en la sección transversal de los muros es plana.
- c) La sección falla cuando se alcanza, en la mampostería, la deformación unitaria máxima a compresión que se tomará igual a 0.003.
- d) La curva esfuerzo-deformación de la mampostería se supone lineal hasta la falla.

b) Esfuerzos en los muros

- a) La fuerza cortante que toma cada uno de los muros es proporcional a su rigidez lateral relativa dado que la estructura es simétrica respecto a los ejes paralelos a las direcciones de análisis (x, y).
- b) La carga se considera uniformemente distribuida y los muros están unidos por una losa considerada como infinitamente rígida en su plano.
- c) Pueden ignorarse las deformaciones por flexión, dado que se considera que gobiernan los esfuerzos cortantes.
- d) Todos los muros fallan por tensión diagonal pura, dado que no se cuenta con elementos de confinamiento (y que es consistente con el daño observado).

c) Diafragma rígido

- a) Se considera que se satisface la condición de diafragma rígido, dado que el sistema de piso está estructurado con base en una losa maciza de concreto que exhibe una relación de largo a ancho menor o igual a 4 y cumple con las condiciones 4 y 6 de la tabla D8.
- b) El modelo reduce a tres los grados de libertad en el plano del diafragma.

Consideraciones para el análisis

Propiedades de los materiales

Como se mencionó anteriormente, se hizo una investigación exhaustiva en los archivos del propietario sin encontrar planos, memorias ni especificaciones. Puesto que los muros son de mampostería simple, se optó por no aplicar ensayos destructivos para determinar las propiedades mecánicas de la mampostería. Para esto, se decidió usar las propiedades mecánicas sugeridas en 4.2.5.2 y 4.2.5.4 de la Guía Técnica (INIFED, 2020a), en combinación con los valores mínimos indicados en la NTC-Mampostería (2017) y la NTC-Concreto (2017).

Mortero

• Resistencia a la compresión

Dado que se consideró mortero tipo II, se supone el siguiente valor de resistencia media a compresión:

$$f_j' = 7.5 \text{ MPa} \left(75 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$



Mampostería

- Resistencia a compresión para diseño

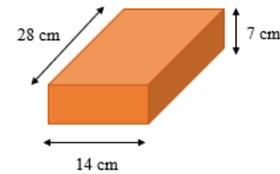
Se consideró una resistencia de diseño de las piezas $f'_p = 6 \text{ MPa}$ ($60 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$) tomando en cuenta que se empleó mortero tipo II, se obtiene el valor de la tabla 2.8.3 de la NTC-M (2017).

$$f_m' = 2 \text{ MPa} \left(20 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

- Resistencia a compresión diagonal para diseño

Considerando pieza de mala calidad que no cumple con las especificaciones de la NTC-M (2017).

$$v_m' = 0.15 \text{ MPa} \left(1.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$



- Módulo de elasticidad

De 2.8.5.2 de la NTC-M (2017) se emplea la ecuación 2.8.5

$$\begin{aligned} E_m &= 600f_m' = (600) \left(20 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \\ &= 1,200 \text{ MPa} \left(12,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \end{aligned}$$

- Módulo de cortante

De 2.8.6.2 de la NTC-M (2017) se emplea la ecuación 2.8.7

$$\begin{aligned} G_m &= 0.2E_m = (0.2) \left(12,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \\ &= 240 \text{ MPa} \left(2,400 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \end{aligned}$$

- Peso volumétrico

$$\gamma_m = 13,000 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \left(0.0013 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \right)$$

Concreto
<p>El concreto mostrado a continuación corresponde únicamente a la losa maciza del edificio.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Resistencia nominal a compresión</u> <p>Considerando un concreto clase 2 de acuerdo con lo que se indica en 2.1.2 de la NTC-C (2017).</p> $f_c' = 20 \text{ MPa} \left(200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$ <ul style="list-style-type: none"> • <u>Módulo de elasticidad</u> <p>De acuerdo con 2.1.4 de la NTC-C (2017) para concretos clase 2.</p> $E_c = 2,500 \sqrt{f_c'} = 2,500 \sqrt{20} = 11,180 \text{ MPa}$ $E_c = 8,000 \sqrt{f_c'} = 8,000 \sqrt{200} = 113,137 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ <ul style="list-style-type: none"> • <u>Peso volumétrico</u> $\gamma_c = 24,000 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \left(0.0024 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \right)$



Análisis de cargas gravitacionales

a) Cargas permanentes

Para las cargas permanentes incluidas en el análisis se consideró al conjunto de acciones que obran en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad no varía, o varía muy poco con el tiempo.

Como parte de las cargas permanentes en la estructura se consideraron las cargas muertas, las cuales se definen, de manera más sencilla, como el peso propio de los elementos estructurales y no estructurales. En este ejemplo se tomó en cuenta el peso de los muros de mampostería, el peso de la losa, instalaciones, acabados, pretiles, escaleras y depósitos de agua. Para el cálculo de las cargas asociadas a las cargas muertas se realizó la determinación de los volúmenes de los distintos componentes de la estructura y su multiplicación por los pesos volumétricos de sus materiales constitutivos.

A su vez se consideró, de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-Criterios 2017) en 5.1.2, un incremento de 0.4 kN/m² (40 kg/m²) al peso muerto calculado de la losa de concreto.

b) Cargas variables

Las cargas variables se distinguen por ser aquéllas que obran sobre la estructura con una intensidad variable con el tiempo. Para fines de este ejemplo se consideró dentro de esta categoría únicamente a la carga viva; los efectos de temperatura, las deformaciones impuestas y los hundimientos diferenciales no fueron tomados en cuenta ya que se consideraron que no existen o no afectan al edificio en cuestión.

Para este ejemplo se considerará únicamente la carga viva máxima (W_m) y carga viva instantánea (W_a) para su superposición con las cargas permanentes y con las cargas accidentales (por sismo),

respectivamente; los valores de éstas serán obtenidas de la tabla 6.1.1 de la NTC-Criterios (2017) y las cuales se muestran resaltadas a continuación en la tabla D6.

Tabla D6. Cargas vivas unitarias, kN/m² (kg/m²), tomada de NTC-Criterios (2017).

Destino de piso o cubierta	W	W _a	W _m
a) Habitación (casa-habitación, departamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, internados de escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares)	0.8 (80)	1.0 (100)	1.9 (190)
b) Oficinas, despachos y laboratorios	1.0 (100)	1.8 (180)	2.5 (250)
c) Aulas	1.0 (100)	1.8 (180)	2.5 (250)
d) Comunicación para peatones (pasillos, escaleras, rampas, vestíbulos y pasajes de acceso libre al público)	0.4 (40)	1.5 (150)	3.5 (350)
e) Estadios y lugares de reunión sin asientos individuales	0.4 (40)	3.5 (350)	4.5 (450)
f) Otros lugares de reunión (bibliotecas, templos, cines, teatros, gimnasios, salones de baile, restaurantes, salas de juego y similares)	0.4 (40)	2.5 (250)	3.5 (350)
g) Comercios, fábricas y bodegas	0.8W _m	0.9W _m	W _m
h) Azoteas con pendiente no mayor de 5 %	0.15 (15)	0.7 (70)	1.0 (100)
i) Azoteas con pendiente mayor de 5 %; otras cubiertas, cualquier pendiente.	0.05 (5)	0.2 (20)	0.4 (40)
j) Volados en vía pública (marquesinas, balcones y similares)	0.15 (15)	0.7 (70)	3 (300)

c) Masas de la estructura

Una vez conocidas las cargas y calculados los pesos correspondientes a cada nivel, se obtuvieron las masas que obran en cada entrepiso de la estructura; para esto, únicamente se dividió el peso calculado entre el valor de la aceleración de la gravedad, g , de 981 cm/s². A continuación, en la tabla D7 se muestra el desglose de cargas, pesos y masas consideradas para el análisis de la estructura en estudio.

Tabla D7. Desglose de masas actuantes sobre la estructura del edificio Roma Sur.

NIVEL DE AZOTEA						
CARGA VIVA						
Concepto	Valor / Peso unitario		Área / Longitud		Peso	
Carga viva instantánea para azoteas con pendiente no mayor que 5%	70	kg/m ²	66.35	m ²	4,644.68	kg
Carga viva máxima para azoteas con pendiente no mayor que 5%	100	kg/m ²	66.35	m ²	6,635.25	kg
Carga viva instantánea por presencia de escaleras	100	kg/m ²	5.78	m ²	578	kg
Carga viva máxima por presencia de escaleras	190	kg/m ²	5.78	m ²	1,098.20	kg
CARGA MUERTA						
Sobrecarga asignada por reglamento	40	kg/m ²	66.35	m ²	2,654.10	kg
Instalaciones	15	kg/m ²	66.35	m ²	995.29	kg
Acabados	110	kg/m ²	66.35	m ²	7,298.78	kg
Losa maciza de concreto de 0.12 m de espesor con capa de compresión de 0.03 m de espesor	288	kg/m ²	66.35	m ²	19,109.52	kg
Dos depósitos de agua de 1,000 L cada uno	30.14	kg/m ²	66.35	m ²	2,000	kg
Muros de mampostería de 0.7 m de altura para soporte de depósitos de agua	127.40	kg/m	6	m	764.40	kg
Escaleras de concreto reforzado. Losa 0.15 m de espesor. Huella=26 cm. Peralte=18 cm	382	kg/m	2.20	m	384.20	kg
Carga reglamentaria para barandales de escaleras	100	kg/m	2.20	m	220	kg
Muros de mampostería simple. Tabique de barro recocado. Espesor de 14 cm	227.50	kg/m	44.90	m	10,214.75	kg
CARGA (PESO) TOTAL					56,597.16	kg
MASA TOTAL DEL NIVEL					57.69	kgs²/cm

NIVEL 2					
CARGA VIVA					
Concepto	Valor / Peso unitario		Área / Longitud		Peso
Carga viva instantánea para casa-habitación	100	kg/m ²	66.35	m ²	6,635.25 kg
Carga viva máxima para casa-habitación	190	kg/m ²	66.35	m ²	12,606.98 kg
Carga viva instantánea por presencia de escaleras	100	kg/m ²	5.78	m ²	578 kg
Carga viva máxima por presencia de escaleras	190	kg/m ²	5.78	m ²	1,098.20 kg
CARGA MUERTA					
Sobrecarga asignada por reglamento	40	kg/m ²	66.35	m ²	2,654.10 kg
Instalaciones	15	kg/m ²	66.35	m ²	995.29 kg
Acabados	110	kg/m ²	66.35	m ²	7,298.78 kg
Losa maciza de concreto de 0.12 m de espesor con capa de compresión de 0.03 m de espesor	288	kg/m ²	66.35	m ²	19,109.52 kg
Escaleras de concreto reforzado. Losa 0.15 m de espesor. Huella=26 cm. Peralte=18 cm	382	kg/m	4.40	m	1,680.80 kg
Carga reglamentaria para barandales de escaleras	100	kg/m	4.40	m	440 kg
Muros de mampostería simple. Tabique de barro recocido. Espesor de 14 cm	455	kg/m	44.90	m	20,429.50 kg
CARGA (PESO) TOTAL					73,526.41 kg
MASA TOTAL DEL NIVEL					74.95 kgs²/cm

NIVEL 1					
CARGA VIVA					
Concepto	Valor / Peso unitario		Área / Longitud		Peso
Carga viva instantánea para casa-habitación	100	kg/m ²	66.35	m ²	6,635.25 kg
Carga viva máxima para casa-habitación	190	kg/m ²	66.35	m ²	12,606.98 kg
Carga viva instantánea por presencia de escaleras	100	kg/m ²	5.78	m ²	578 kg
Carga viva máxima por presencia de escaleras	190	kg/m ²	5.78	m ²	1,098.20 kg
CARGA MUERTA					
Sobrecarga asignada por reglamento	40	kg/m ²	66.35	m ²	2,654.10 kg
Instalaciones	15	kg/m ²	66.35	m ²	995.29 kg
Acabados	110	kg/m ²	66.35	m ²	7,298.78 kg
Losa maciza de concreto de 0.12 m de espesor con capa de compresión de 0.03 m de espesor	288	kg/m ²	66.35	m ²	19,109.52 kg
Escaleras de concreto reforzado. Losa 0.15 m de espesor. Huella=26 cm. Peralte=18 cm	382	kg/m	4.40	m	1,680.80 kg
Carga reglamentaria para barandales de escaleras	100	kg/m	4.40	m	440 kg
Muros de mampostería simple. Tabique de barro recocido. Espesor de 14 cm	455	kg/m	44.90	m	20,429.50 kg
CARGA (PESO) TOTAL					73,526.41 kg
MASA TOTAL DEL NIVEL					74.95 kgs²/cm

Criterios de análisis para diseño sísmico

a) Zonificación geotécnica

Según la ubicación del edificio se encuentra en la zona III.

b) Clasificación de la estructura

Para fines de diseño sísmico, y con base en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, la edificación para este proyecto será considerada dentro del Grupo B, Subgrupo B2.

c) Factor de comportamiento sísmico

Se consideró un factor $Q=1$. Esto de acuerdo con la NTC-Sismo (2017), que indica tal factor para estructuras a base de muros de carga de mampostería de piezas macizas no confinados ni reforzados:

$Q = 1.0$	(NTC-Sismo. Tabla 4.2.3)
-----------	--------------------------

d) Factor de sobre-resistencia

Para el cálculo de este factor se toma la ecuación 3.5.1 de la NTC-Sismo (2017):

$R = k_1 R_0 + k_2$	(NTC-Sismo. Ec. 3.5.1)
---------------------	------------------------

donde:

$k_1=1.0$, dado que se trata de una estructura de mampostería con tres crujeas resistentes a sismo en las dos direcciones de análisis.

$R_0=2.0$, dado que se trata de una estructura de mampostería.

k_2 representa el factor de incremento para estructuras pequeñas y rígidas, que se calcula con la siguiente expresión:

$k_2 = 0.5 \left[1 - \left(\frac{T}{T_a} \right)^{1/2} \right] > 0$	(NTC-Sismo. Ec.3.5.2)
---	-----------------------

e) Factor K_s

De acuerdo con lo que indica en 3.1.1 de la NTC-Sismo (2017) y dado que el programa SASID indica un periodo del suelo $T_s=1.223$ s el valor del factor K_s queda determinado de la siguiente manera:

$K_s = \frac{1}{4}$	(NTC-Sismo. Ec.3.1.1)
---------------------	-----------------------

f) Regularidad de la estructura

Como parte del análisis es necesario conocer las condiciones de regularidad de la estructura, para esto se verificarán las condiciones descritas en 5.1 de la NTC-Sismo como se muestra a continuación en la tabla D8.

Tabla D8. Condiciones de regularidad de la estructura del edificio Roma Sur.

No.	Descripción de regularidad	Condición
1	Muros, marcos y columnas son paralelos a los ejes ortogonales del edificio o forman un ángulo en planta respecto al eje ortogonal $< 15^\circ$.	Cumple
2	Relación altura total / ancho ¹ < 4 .	Cumple
3	Relación largo ² / ancho < 4 .	Cumple
4	Longitud de entrantes o salientes < 20 % de la longitud total en la dirección de análisis.	Cumple
5	Diafragma rígido de acuerdo con 2.7 de la NTC-S, 2017.	Cumple
6	Área de aberturas < 20 % del área total de la planta, las aberturas no difieren en posición de un nivel a otro. Se exime de este requisito la azotea.	Cumple
7	Cargas verticales de cada nivel consideradas para el diseño sísmico < 120 % del nivel inmediato inferior.	Cumple
8	Largo y ancho de cada nivel < 110 % del largo y ancho del nivel inmediato inferior. Además, largo y ancho de cada nivel < 125 % del largo y ancho del nivel inferior con menores dimensiones.	Cumple
9	Ningún muro pasa por el sistema de piso sin estar ligada con él.	Cumple
10	Todos los muros del mismo nivel tienen la misma altura. ⁴	Cumple
11	Rigidez lateral de cada nivel difiere < 20 % de la rigidez lateral del nivel inferior. ⁴	Cumple

12	Desplazamiento lateral de cualquier punto de la planta < 20 % del desplazamiento lateral promedio de los extremos.	Cumple
13	En sistemas de $Q \leq 3$, en ningún entrepiso la capacidad resistente a carga lateral/ la acción de diseño debe ser < 75 % del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos.	Cumple
¹ <i>dimensión menor en planta.</i> ² <i>dimensión mayor en planta.</i> ³ <i>requiere de cálculos y estos no están disponibles al momento de esta revisión.</i> ⁴ <i>se exime del requisito el último entrepiso del edificio.</i>		

Con base en la revisión de condiciones de regularidad realizada y de acuerdo con lo que dicta la NTC-Sismo (2017) se clasifica la estructura como **regular**, por lo que se considerará un factor de corrección por irregularidad de 1:

$$F_{irregularidad} = 1.0$$

g) Espectros para diseño (revisión)

Para la revisión de la respuesta de la estructura ante las sollicitaciones sísmicas del 19 de septiembre de 2017 se llevarán a cabo dos niveles de revisión basados en el diseño para estados límite (niveles de desempeño) como se enuncia en la NTC-Sismo (2017):

- Estado límite de limitación de daños ante sismos frecuentes

Este análisis considera sismos que pueden presentarse varias veces durante la vida útil de la estructura contemplando se tenga, a lo más, daños leves que requieran reparaciones menores y no interrumpan la operación del edificio.

Para la revisión de los modelos bajo esta condición se obtendrán las distorsiones máximas de entrepiso a partir del espectro elástico y se multiplicarán los valores obtenidos por el factor K_s esto dado que se utilizará el espectro elástico y no el espectro de diseño (reducido). Posteriormente se revisará que no se exceda el límite establecido en la NTC-Sismo (2017):

$\gamma K_s \leq 0.002$	(NTC-Sismo. 1.8b)
-------------------------	-------------------

- Estado límite de seguridad contra colapso

Este análisis se realiza bajo el sismo máximo probable, revisando que no ocurran fallas estructurales mayores ni pérdidas de vidas, aunque pueden presentarse daños y/o deformaciones que lleguen a afectar el funcionamiento del edificio y se requieran reparaciones importantes o inclusive, su demolición.

Para esta condición se revisará que las distorsiones obtenidas con el espectro de diseño multiplicadas por el factor de comportamiento sísmico (Q) y el factor de sobrerresistencia (R) no excedan los valores especificados para la distorsión límite que establece la NTC-Sismo (2017).

$\gamma QR \leq 0.002$	(NTC-Sismo. Tabla 4.2.3)
------------------------	--------------------------

h) Factores de carga

Para la obtención de las fuerzas internas de diseño de la estructura se multiplicarán las fuerzas internas por factores de carga, F_c , durante el análisis. Estos factores de carga son estipulados por la NTC-Criterios (2017). Con los factores de carga se toma en cuenta, principalmente, la variabilidad de las cargas, la incertidumbre en el análisis estructural y la importancia de la estructura. Para la estructura en estudio se tomaron en cuenta los factores de carga mostrados en la tabla D9.

Tabla D9. Factores de carga utilizados para el análisis del edificio Roma Sur.

Factor de carga	Descripción
1.3 – Cargas permanentes 1.5 – Cargas variables	Combinación de acciones permanentes y variables para estructuras del Grupo B
1.1	Combinaciones que incluyan acciones permanentes, variables y accidentales
0.3	Combinaciones que incluyan acciones sísmicas
1.0	Revisión de estados límite de servicio

Cabe señalar que la Guía Técnica (INIFED, 2020a) permite utilizar factores de carga menores, 1.1 y 1.3 para cargas permanentes y variables, respectivamente, en el caso de estructuras existentes. Su uso es permitido si se hace una medición del volumen de la estructura que permita estimar sus pesos. Si bien suponemos que en este ejemplo se hizo ese levantamiento detallado, se optó por usar la combinación señalada en la NTC-Criterios (2017). Esta combinación puede ser favorable en la revisión de la cimentación.

i) Combinaciones de carga

La seguridad, y en este caso, el daño de la estructura deberá verificarse para el efecto combinado de todas las acciones que tengan una probabilidad de ocurrir simultáneamente. De acuerdo con la NTC-Criterios (2017) en su sección 3.4, deben considerarse dos categorías de combinaciones:

- 1) Las que incluyan acciones permanentes y acciones variables. Se considerarán todas las acciones permanentes que actúan sobre la estructura y las distintas acciones variables, de las cuales, la más desfavorable se tomará con su intensidad máxima y el resto con su intensidad instantánea.
- 2) Combinaciones que incluyen, además de las acciones permanentes y variables, acciones accidentales con sus intensidades reducidas en función de los factores de carga.

A continuación, en la tabla D10 se presentan las combinaciones de carga utilizadas para el análisis.

Tabla D10. Combinaciones de carga utilizadas para el análisis del edificio Roma Sur.

ESTADO LÍMITE DE SERVICIO	ESTADO LÍMITE DE FALLA
1. $CM + CV_{MÁX}$	1. $1.3CM + 1.5CV_{MÁX}$
2. $CM + CV_{INST} + S_x + 0.3S_y$	2. $1.1(CM + CV_{INST} + S_x + 0.3S_y)$
3. $CM + CV_{INST} + S_x - 0.3S_y$	3. $1.1(CM + CV_{INST} + S_x - 0.3S_y)$
4. $CM + CV_{INST} - S_x + 0.3S_y$	4. $1.1(CM + CV_{INST} - S_x + 0.3S_y)$
5. $CM + CV_{INST} - S_x - 0.3S_y$	5. $1.1(CM + CV_{INST} - S_x - 0.3S_y)$
6. $CM + CV_{INST} + 0.3S_x + S_y$	6. $1.1(CM + CV_{INST} + 0.3S_x + S_y)$
7. $CM + CV_{INST} - 0.3S_x + S_y$	7. $1.1(CM + CV_{INST} - 0.3S_x + S_y)$
8. $CM + CV_{INST} + 0.3S_x - S_y$	8. $1.1(CM + CV_{INST} + 0.3S_x - S_y)$
9. $CM + CV_{INST} - 0.3S_x - S_y$	9. $1.1(CM + CV_{INST} - 0.3S_x - S_y)$

donde:

CM = Carga muerta (incluye sobrecarga por reglamento, instalaciones, acabados, depósitos de agua, escaleras)

CV_{MÁX} = Carga viva máxima

CV_{INST} = Carga viva instantánea

S_x = Sismo en dirección X

S_y = Sismo en dirección Y

Modelo de análisis

El análisis estructural se llevará a cabo mediante el método dinámico modal espectral. El modelo numérico elaborado es tridimensional, donde los muros fueron modelados como elementos barra. Las secciones transversales de estos elementos correspondieron con la longitud y el espesor del

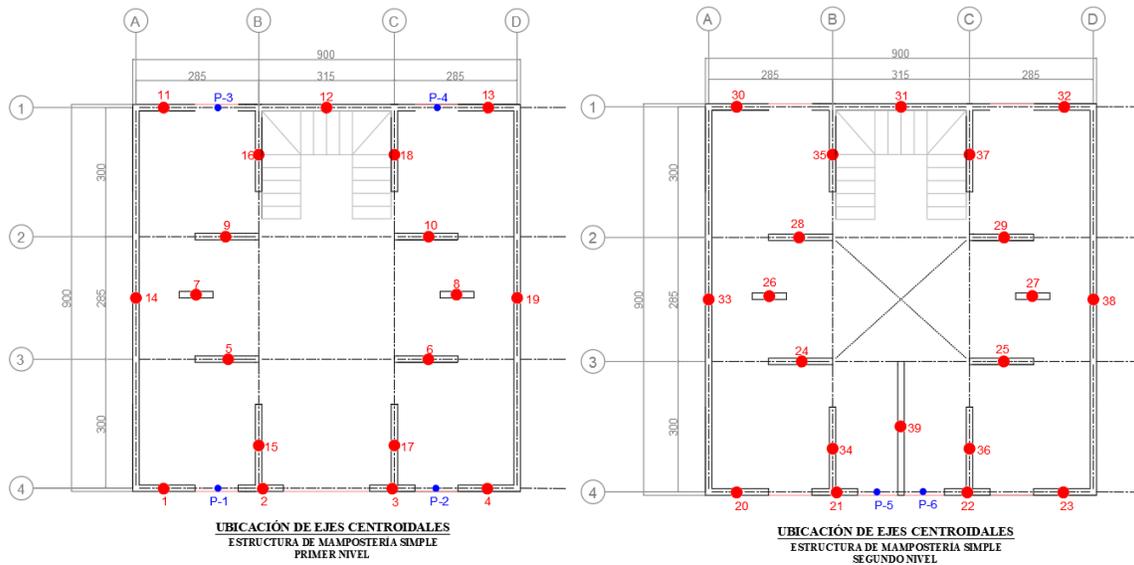
muro según su orientación. Los pretilos de la estructura fueron modelados para obtener una respuesta más cercana a la que presentó la estructura en estudio durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. Los muros y pretilos de la estructura fueron idealizados como columnas anchas ubicadas en el eje centroidal del muro, donde las propiedades geométricas de los muros, y las propiedades mecánicas de la mampostería son concentradas para posteriormente formar un sistema de marcos equivalentes.

El modelado de la estructura sigue las recomendaciones contenidas en 4.4 de la Guía de Análisis (SMIE, 2015), referente al modelado de estructuras de mampostería mediante el método de columna ancha. Con base en esta metodología, el modelo toma en cuenta los siguientes puntos:

- a) Los muros o segmentos de muro se modelarán como elementos tipo barra que incluyan sólo deformaciones por cortante.
- b) Las propiedades de la sección deben ser siempre las centroidales.
- c) Para modelar el ancho del muro para que otros elementos puedan conectarse al borde del mismo se utilizarán elementos infinitamente rígidos que salen perpendiculares al eje del muro hasta llegar al borde (con el fin de generar la hipótesis de sección plana y de deformación, y permitir que los elementos que no conectan al eje del muro puedan generar momentos).

El modelo se elaboró usando el programa comercial ETABS 18.1.1.

En la figura D7 se muestra la distribución de ejes centroidales de cada muro (para formar un sistema equivalente a base de marcos) y a su vez se observa la numeración de muros por nivel. Esta numeración servirá, posteriormente, para estudiar la resistencia de cada muro.



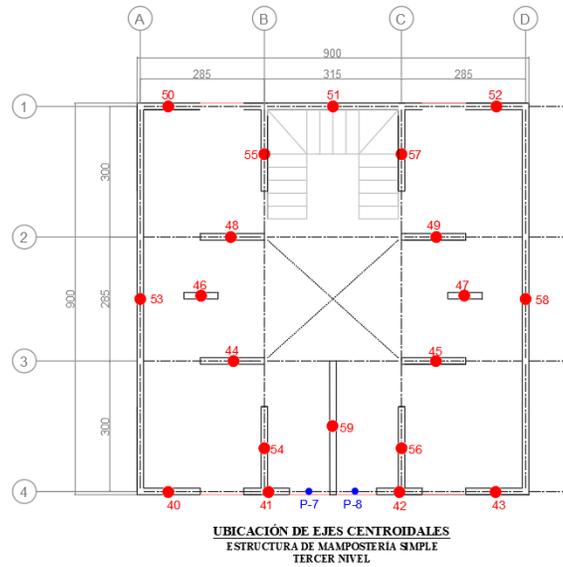
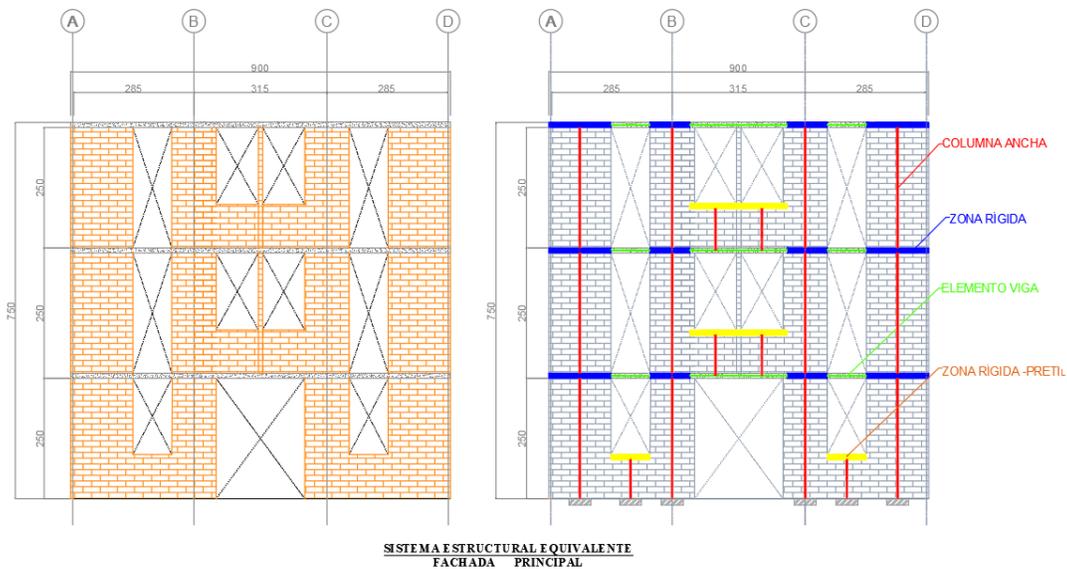


Figura D111 Distribución de muros y ejes centroidales por nivel de la estructura de mampostería simple del edificio Roma Sur.

En la figura D8 se muestra el sistema estructural equivalente para la estructura en estudio. En color rojo se encuentran representados los ejes de los muros y pretiles modelados como columna ancha, en color azul y amarillo se muestran los elementos de rigidez elevada sobre cada columna ancha, a estos elementos se les asignó una rigidez a la flexión 100 veces la de una viga, de acuerdo con lo sugerido en la Guía de Análisis (SMIE,2015). En color verde se observan los elementos que conectarán a los muros entre sí y con el resto de los elementos de la estructura, para estos elementos se consideró un ancho efectivo igual a tres veces el espesor de la losa de concreto, es decir, de 36 cm.



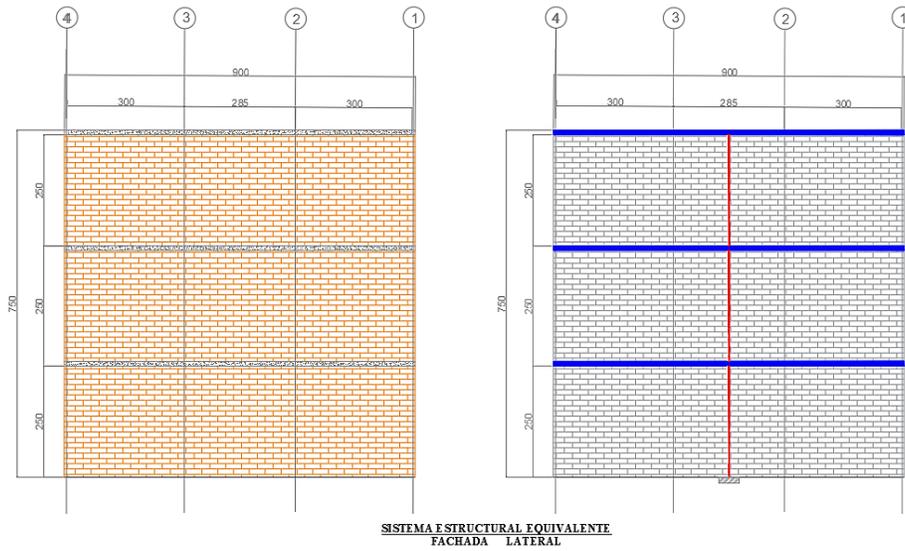
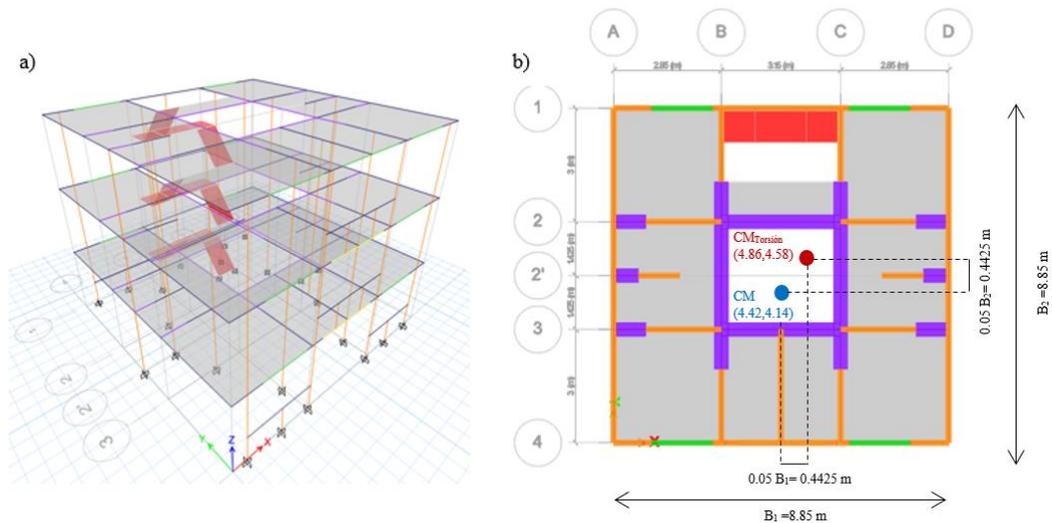


Figura D8. Vista en elevación de la configuración de marcos equivalentes modelados para el edificio Roma Sur.

Dentro de las consideraciones para el análisis y modelado del edificio Roma Sur, para estimar los efectos de la torsión en la estructura, se tomó en cuenta una excentricidad accidental provocada por el desplazamiento del centro de masas 5% respecto a la dimensión perpendicular a cada dirección de análisis. Cabe resaltar que la torsión únicamente se considerará, en este ejemplo, para el análisis de la rehabilitación del edificio.

En la figura D9 se muestra el modelo numérico. En la figura D9.a se observa el sistema equivalente a base de marcos (columna ancha) generado considerando las propiedades originales de la estructura. En la figura D9.b se observa el cambio en la posición del centro de masas, donde el punto azul marcado representa el centro de masas del edificio Roma Sur, y el punto rojo representa el centro de masas considerando la excentricidad accidental, para estimar el comportamiento por torsión en la estructura. En el resto de las ilustraciones se muestra la forma extruida del modelo. Es importante mencionar que para la elaboración del modelo se tomó en cuenta la posible aportación de las escaleras (elementos en color rojo) a la rigidez de la estructura, por lo que éstas fueron incluidas en el modelo y también consideran cargas permanentes (su peso propio) y cargas variables (cargas vivas asignadas por reglamento).



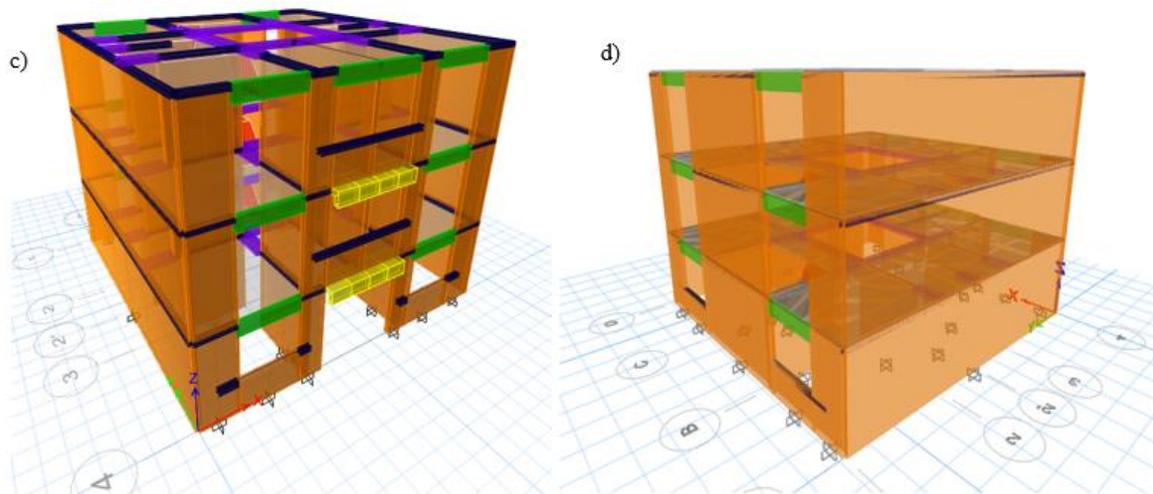


Figura D9. Modelo de análisis del edificio Roma Sur en ETABS 18.1.1. Análisis del edificio dañado

Para estimar la seguridad estructural del edificio dañado, se emplearon los factores reductivos λ recomendados en INIFED (2020b) que se encuentran en la tabla D1 de este documento. El objetivo de los factores λ es modificar la estimación de las propiedades nominales del edificio (rigidez, resistencia y capacidad de deformación lateral) tomando en cuenta el nivel de daño en el elemento estructural.

En la tabla D11 se resumen los factores reductivos λ utilizados para este ejemplo en función del daño en cada muro. El factor λ_K reduce la rigidez lateral; λ_R disminuye la resistencia lateral y λ_D afecta la capacidad de desplazamiento. Estos factores fueron utilizados para degradar la rigidez original del modelo, y con esto lograr obtener una estimación del comportamiento de la estructura. Además, permiten entender mejor el modo de comportamiento de los muros y su influencia en el comportamiento de toda la edificación.

Como se señaló anteriormente, como resultado del levantamiento detallado de los daños de la estructura (realizado durante el MEI) se determinó que todos los muros del primer nivel presentaron daño severo, todos los del segundo nivel tuvieron daño moderado y todos los muros del tercer nivel exhibieron daño nulo. Es importante hacer notar que en otras estructuras que lleguen a presentar daño, éste debe ser clasificado por elemento estructural, cada uno de estos elementos deberá ser modelado con su respectivo factor reductivo en función del tipo de daño (modo de comportamiento) y la intensidad del mismo. El daño no debe ser generalizado por nivel.

Tabla D11. Factores reductivos empleados para el edificio Roma Sur.

Factores reductivos λ para la estructura Roma Sur					
Modo de comportamiento	Intensidad del daño	Elementos	λ_K	λ_R	λ_D
Tensión diagonal	Nulo	Todos los muros del tercer nivel	1.0	1.0	1.0
	Moderado	Todos los muros del segundo nivel	0.8	0.9	1.0
	Severo	Todos los muros del primer nivel	0.4	0.8	0.7

Espectro para el análisis

De acuerdo con el RCDF (2017) en su artículo 179 “...En el caso de daños provocados por sismo, deberán considerarse las Normas para la rehabilitación sísmica correspondientes” y en su artículo 180 “El proyecto de refuerzo estructural y las renovaciones de las instalaciones de una edificación, a que se refiere el artículo anterior, debe cumplir lo siguiente: Diseñarse para que la edificación

alcance cuando menos los niveles de seguridad establecidos en este Reglamento para las edificaciones nuevas”.

De acuerdo con ello, para la revisión de la seguridad ante sismo se seguirá lo estipulado en la NTC-Sismo (2017), que menciona que cuando se emplee el método de análisis dinámico modal, las acciones sísmicas de diseño se determinarán a partir de los espectros de diseño contenidos en el Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño, denominado SASID, para la ubicación específica del predio en estudio. La dirección de internet en la que se accede al SASID es <https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/>.

En este ejemplo se usó la versión 4.0.2.0 del programa SASID. Se revisaron los estados límite de servicio (limitación de daños ante sismos frecuentes) y estado límite último (seguridad contra colapso). En la figura D10 se muestran los espectros y valores obtenidos del programa SASID.

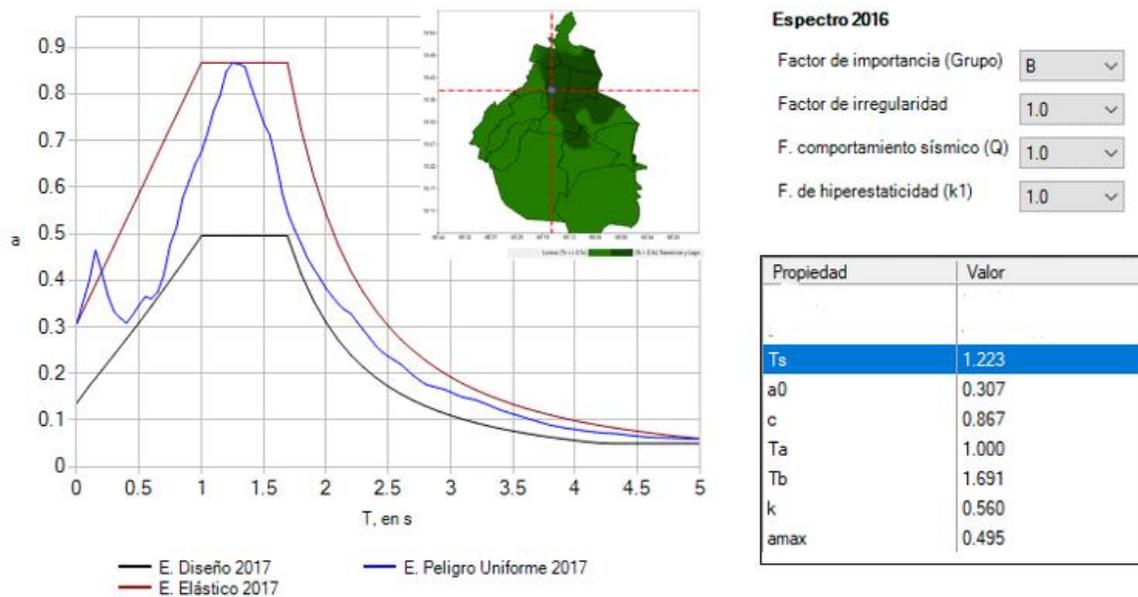


Figura D10. Espectros obtenidos de SASID para el análisis de la estructura original Roma Sur.

Resultados del análisis

Periodos de vibración

Los resultados de analizar la estructura Roma Sur dañada, es decir, con propiedades estructurales degradadas para considerar el daño en los muros, se presentan en este inciso. En la tabla D12 se muestran los periodos de vibración del edificio Roma Sur sin daño (es decir, antes de la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017) y con daño (aplicando el factor A_k correspondiente según el nivel de daño de cada muro). Los periodos se presentan para el estado límite de seguridad contra colapso (ELSC) y para el estado límite de limitación de daños ante sismos frecuentes (LDSF).

Tabla D12. Periodos de vibración de la estructura original sin daño y con daño.

Modo	Estructura sin daño						Estructura con daño					
	ELSC			LDSF			ELSC			LDSF		
	Periodo	Participación modal		Periodo	Participación modal		Periodo	Participación modal		Periodo	Participación modal	
	s	U _x	U _y	s	U _x	U _y	s	U _x	U _y	s	U _x	U _y
1	0.294	0.806	0.000	0.287	0.808	0.000	0.325	0.846	0.000	0.319	0.849	0.000
2	0.183	0.806	0.849	0.182	0.808	0.850	0.224	0.846	0.920	0.224	0.849	0.921
3	0.144	0.823	0.849	0.143	0.827	0.850	0.180	0.870	0.920	0.178	0.875	0.921
4	0.094	0.958	0.849	0.093	0.959	0.850	0.107	0.979	0.920	0.106	0.980	0.921
5	0.06	0.958	0.980	0.06	0.960	0.981	0.074	0.979	0.992	0.074	0.980	0.992

Un examen de la tabla D12 permite advertir que, para el caso de la estructura con daño, el periodo de vibrar se incrementó en 10% con respecto a la estructura sin daño. Como es obvio, este aumento del periodo es debido a la degradación de la rigidez de la estructura a causa del agrietamiento y aplastamiento de los muros de mampostería. En términos de participación modal de las masas, se contemplaron, para el edificio Roma Sur, cinco modos de vibrar, ya que con éstos se alcanza una participación de la masa mayor que 90%. Es claro que los primeros modos de vibración del edificio son de traslación en X y Y, así como de torsión. La dirección X es paralela a los ejes con número, como se muestra en la figura D11.

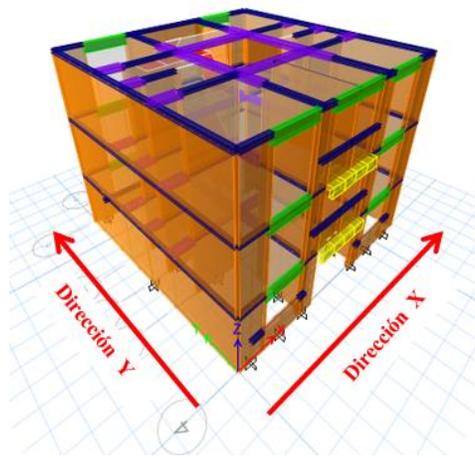


Figura D112 Direcciones de análisis del edificio Roma Sur.

Desplazamientos laterales

En la tabla D13 se pueden consultar los desplazamientos laterales calculados para ELSC y LDSF para la estructura sin y con daño. Como era de esperarse, puesto que el periodo del edificio dañado aumentó, las demandas de desplazamiento se incrementaron. Por ejemplo, para el nivel de azotea (Nivel 3) el desplazamiento en la dirección X, δ_x aumentó en 28% para el ELSC y en 27% para LDSF.

El perfil de desplazamientos máximos para los dos estados límite y las dos direcciones se muestran en la figura D12. Por la forma del perfil es claro que el comportamiento está dominado por el primer modo de vibración de traslación en ambas direcciones.

El perfil de desplazamientos máximos para los dos estados límite y las dos direcciones se muestran en la figura D12. Por la forma del perfil es claro que el comportamiento está dominado por el primer modo de vibración de traslación en ambas direcciones.

Tabla D13. Desplazamientos de entrepiso de la estructura original Roma Sur sin y con daño.

DESPLAZAMIENTOS					
ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO					
Nivel	H	Estructura sin daño		Estructura con daño	
		δ_x	δ_y	δ_x	δ_y
	m	cm	cm	cm	cm
3	7.5	0.83	0.27	1.06	0.42
2	5	0.57	0.19	0.79	0.33
1	2.5	0.24	0.09	0.41	0.20
Base	0	0	0	0	0

DESPLAZAMIENTOS					
LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES					
Nivel	H	Estructura sin daño		Estructura con daño	
		δ_x	δ_y	δ_x	δ_y
	m	cm	cm	cm	cm
3	7.5	1.42	0.50	1.81	0.76
2	5	0.99	0.35	1.37	0.60
1	2.5	0.41	0.16	0.71	0.37
Base	0	0	0	0	0

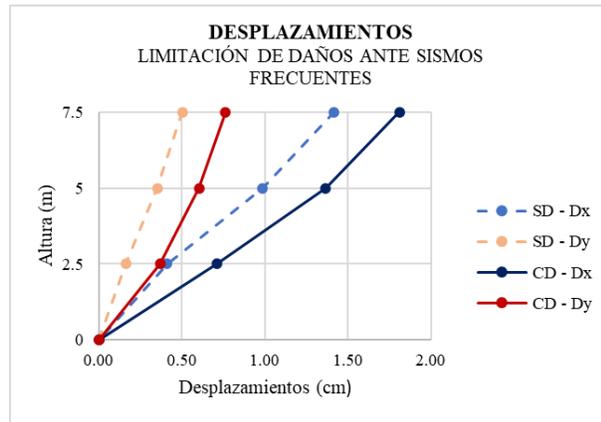
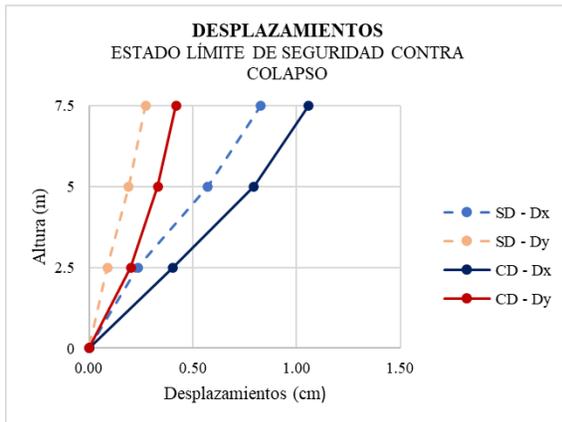


Figura D113 Desplazamientos de entrepiso de la estructura original Roma Sur sin y con daño.

Distorsiones de entrepiso

En la tabla D14 se pueden revisar las distorsiones para el caso del estado límite de seguridad contra colapso. En la parte izquierda de la tabla se muestran las distorsiones obtenidas directamente del análisis, mientras que las distorsiones ubicadas en la parte derecha de la tabla son resultado de la multiplicación de las obtenidas del análisis por el factor de comportamiento $Q = 1$, y el factor de sobrerresistencia R . En la figura D13 se muestra la distribución de distorsiones en la altura del edificio para este estado límite.

Tabla D14. Distorsiones de entrepiso para el ELSC del edificio Roma Sur sin daño (SD) y con daño (CD).

DISTORSIONES									
ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA EL COLAPSO									
Estructura sin daño (SD)									
Nivel	γ_x	γ_y	T	k_2	Q	R	γ_x	γ_y	g NTC-2017
	%	%	s				%	%	%
3	0.10	0.03	0.29	0.23	1	2.23	0.23	0.07	0.20
2	0.14	0.04					0.30	0.09	0.20
1	0.09	0.04					0.21	0.08	0.20
Estructura con daño (CD)									
3	0.11	0.04	0.33	0.21	1	2.21	0.24	0.08	0.20
2	0.16	0.05					0.35	0.12	0.20
1	0.16	0.08					0.36	0.18	0.20

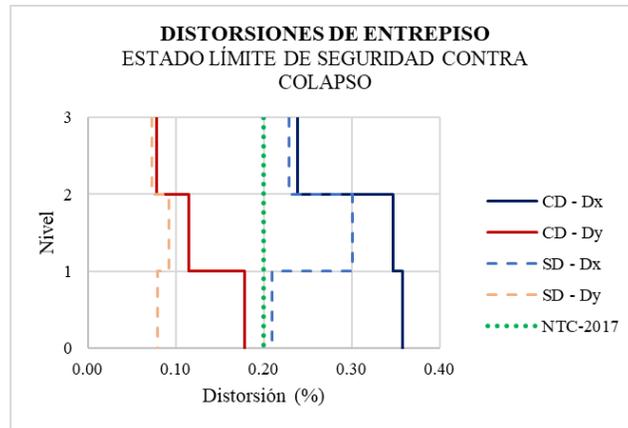


Figura D13. Distribución de distorsiones de entrepiso para ELSC del edificio original Roma Sur sin daño (SD) y con daño (CD).

En la tabla D15 y figura D14 se presentan las distorsiones LDSF. Las distorsiones obtenidas del análisis (parte izquierda de la tabla D15) se multiplicaron por el factor k_s , el cual, para el caso de esta estructura (debido al periodo del suelo) es igual a 0.25 (obteniendo así las distorsiones de la parte derecha de la tabla).

Tabla D15. Distorsiones de entrepiso para LDSF del edificio Roma Sur sin daño (SD) y con daño (CD).

DISTRORSIONES						
LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES						
Estructura sin daño (SD)						
Nivel	γ_x	γ_y	k_s	γ_x	γ_y	γ NTC-2017
	%	%		%	%	%
3	0.10	0.03	0.25	0.03	0.01	0.20
2	0.14	0.04		0.03	0.01	0.20
1	0.09	0.04		0.02	0.01	0.20
Estructura con daño (CD)						
3	0.18	0.06	0.25	0.04	0.02	0.20
2	0.27	0.09		0.07	0.02	0.20
1	0.28	0.15		0.07	0.04	0.20

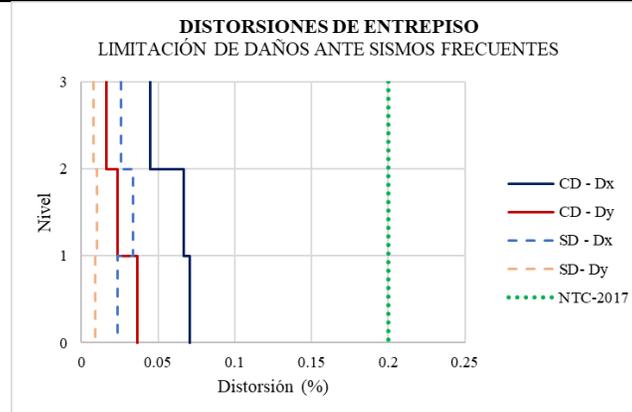


Figura D14. Distribución de distorsiones de entrepiso para LDSF del edificio original Roma Sur sin daño (SD) y con daño (CD).

A partir del estudio de las tablas D14 y D15 y figuras D13 y D14 puede concluirse que para la revisión del estado límite de seguridad contra colapso, tanto la estructura original sin daño como con daño, las distorsiones de entrepiso en el sentido longitudinal de análisis (Dirección X) exceden las distorsiones máximas establecidas en la NTC-Sismo (2017). En ambos casos las mayores distorsiones ocurrieron en el primer nivel de la estructura (planta baja), lo cual es consistente con la mayor intensidad de daño observada en el edificio.

Para la revisión de distorsiones en el estado de limitación de daños ante sismos frecuentes, las distorsiones de entrepiso cumplen con lo estipulado por la NTC-Sismo (2017).

Resistencias

Una vez conocidos los desplazamientos y distorsiones de la estructura sin y con daño, se requiere identificar el comportamiento de cada uno de los muros y estimar en qué medida fue o no superada la capacidad resistente original de cada muro ante las demandas calculadas. Para esto, se calcularon las resistencias a carga axial y a carga lateral de los muros con base en la NTC-Mampostería (2017).

a) Resistencia a carga vertical

La carga vertical resistente P_R de cada uno de los muros de mampostería simple se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P_R = \lambda_R (F_R F_E f_m' A_T) \quad (\text{NTC-Mampostería. Ec.11.2.1})$$

donde:

$\lambda_R = 0.8$ (Muros del primer nivel)

$\lambda_R = 0.9$ (Muros del segundo nivel)

$\lambda_R = 1.0$ (Muros del tercer nivel)

$f_m' = 20 \text{ kg/cm}^2$

$F_R = 0.3$

$F_E = 0.7$ (Muros interiores)

$F_E = 0.6$ (Muros exteriores)

Si bien el factor λ_R es estrictamente aplicable para la estimación de la resistencia ante cargas laterales, se usará para aproximar la resistencia a cargas verticales. Se puede argumentar que el daño por sismo afecta la capacidad resistente a fuerzas laterales.

Para analizar la resistencia a carga vertical de cada muro, se obtuvieron las cargas verticales últimas del análisis para estado límite de seguridad contra colapso, considerando la combinación de carga más desfavorable. Para la resistencia a cargas verticales el cociente D_R/C se calculó como:

$$\frac{D_R}{C} = \frac{\text{Demanda}}{\text{Capacidad}} = \frac{P_u}{\lambda_R P_R}$$

Se indica con el símbolo \checkmark que el cociente D_R/C es menor que 1, es decir, que el muro posee la suficiente capacidad resistente vertical. Mientras que con el símbolo \times se indica que el cociente D_R/C es mayor que 1, por lo que el muro es probable que no tenga la suficiente capacidad carga vertical. Las cargas axiales que obran sobre los muros fueron obtenidas del análisis estructural. En la tabla D16 se muestra la revisión de muros por carga vertical en la estructura dañada.

Tabla D16. Cocientes de demanda/capacidad de resistencia de cada muro de la estructura original con daño.

REVISIÓN POR CARGA VERTICAL									
PRIMER NIVEL (PB)									
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	Área	P _R	P _u	D _R /C	Estado
		cm	cm		cm ²	t	t		
1	X	100	250	2.50	1,400	4.03	-4.06	1.01	✗
2		65	250	3.85	910	2.62	-3.37	1.29	✗
3		65	250	3.85	910	2.62	-3.36	1.28	✗
4		100	250	2.50	1,400	4.03	-3.98	0.99	✓
5		200	250	1.25	2,800	9.41	-6.55	0.70	✓
6		200	250	1.25	2,800	9.41	-6.56	0.70	✓
7		110	250	2.27	1,540	5.17	-3.37	0.65	✓
8		110	250	2.27	1,540	5.17	-3.48	0.67	✓
9		200	250	1.25	2,800	9.41	-6.10	0.65	✓
10		200	250	1.25	2,800	9.41	-6.25	0.66	✓
11		100	250	2.50	1,400	5.04	-4.68	0.93	✓
12		360	250	0.69	5,040	18.14	-10.20	0.56	✓
13		100	250	2.50	1,400	5.04	-4.57	0.91	✓
P-1		165	90	0.55	2,310	6.65	-3.24	0.49	✓
P-2		165	90	0.55	2,310	6.65	-3.20	0.48	✓
P-3		165	90	0.55	2,310	6.65	-2.54	0.38	✓
P-4		165	90	0.55	2,310	6.65	-2.55	0.38	✓
14	Y	900	250	0.28	12,600	36.29	-22.49	0.62	✓
15		195	250	1.28	2,730	9.17	-6.92	0.75	✓
16		195	250	1.28	2,730	9.17	-9.26	1.01	✗
17		195	250	1.28	2,730	9.17	-6.87	0.75	✓
18		195	250	1.28	2,730	9.17	-9.25	1.01	✗
19		900	250	0.28	12,600	36.29	-22.54	0.62	✓

REVISIÓN POR CARGA VERTICAL										
SEGUNDO NIVEL										
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	Área	P _R	P _u	D _R /C	Estado	
		cm	cm		cm ²	t	t			
20	X	100	250	2.50	1,400	4.54	-2.35	0.52	✓	
21		65	250	3.85	910	2.95	-1.51	0.51	✓	
22		65	250	3.85	910	2.95	-1.51	0.51	✓	
23		100	250	2.50	1,400	4.54	-2.31	0.51	✓	
24		200	250	1.25	2,800	10.58	-4.02	0.38	✓	
25		200	250	1.25	2,800	10.58	-4.02	0.38	✓	
26		110	250	2.27	1,540	5.82	-1.77	0.30	✓	
27		110	250	2.27	1,540	5.82	-1.79	0.31	✓	
28		200	250	1.25	2,800	10.58	-3.76	0.36	✓	
29		200	250	1.25	2,800	10.58	-3.84	0.36	✓	
30		100	250	2.50	1,400	4.54	-2.89	0.64	✓	
31		360	250	0.69	5,040	16.33	-4.95	0.30	✓	
32		100	250	2.50	1,400	4.54	-2.85	0.63	✓	
P-5		115	90	0.78	1,610	5.22	0.68	0.13	✓	
P-6		115	90	0.78	1,610	5.22	0.68	0.13	✓	
33		Y	900	250	0.28	12,600	40.82	-13.18	0.32	✓
34			195	250	1.28	2,730	10.32	-4.24	0.41	✓
35	195		250	1.28	2,730	10.32	-5.25	0.51	✓	
36	195		250	1.28	2,730	10.32	-4.22	0.41	✓	
37	195		250	1.28	2,730	10.32	-4.17	0.40	✓	
38	900		250	0.28	12,600	40.82	-13.12	0.32	✓	
39	300	250	0.83	4,200	15.88	-1.21	0.08	✓		

REVISIÓN POR CARGA VERTICAL										
TERCER NIVEL										
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	Área	P_R	P_u	D_R/C	Estado	
		cm	cm		cm ²					t
40	X	100	250	2.50	1,400	5.04	-1.04	0.21	✓	
41		65	250	3.85	910	3.28	-0.70	0.21	✓	
42		65	250	3.85	910	3.28	-0.70	0.21	✓	
43		100	250	2.50	1,400	5.04	-1.02	0.20	✓	
44		200	250	1.25	2,800	11.76	-1.83	0.16	✓	
45		200	250	1.25	2,800	11.76	-1.82	0.15	✓	
46		110	250	2.27	1,540	6.47	-0.86	0.13	✓	
47		110	250	2.27	1,540	6.47	-0.89	0.14	✓	
48		200	250	1.25	2,800	11.76	-1.72	0.15	✓	
49		200	250	1.25	2,800	11.76	-1.78	0.15	✓	
50		100	250	2.50	1,400	5.04	-1.31	0.26	✓	
51		360	250	0.69	5,040	18.14	-2.24	0.12	✓	
52		100	250	2.50	1,400	5.04	-1.30	0.26	✓	
P-7		115	90	0.78	1,610	5.80	0.73	0.13	✓	
P-8		115	90	0.78	1,610	5.80	0.73	0.13	✓	
53		Y	900	250	0.28	12,600	45.36	-4.93	0.11	✓
54			195	250	1.28	2,730	11.47	-1.93	0.17	✓
55			195	250	1.28	2,730	11.47	-1.97	0.17	✓
56	195		250	1.28	2,730	11.47	-1.93	0.17	✓	
57	195		250	1.28	2,730	11.47	-1.78	0.16	✓	
58	900		250	0.28	12,600	45.36	-4.85	0.11	✓	
59	300		250	0.83	4,200	17.64	-1.11	0.06	✓	

Del análisis de los cocientes de demanda a capacidad D_R/C para carga vertical en cada muro, se observó que, para el caso de los muros del primer nivel, la capacidad se ve superada por la demanda únicamente en cinco muros, mientras que, para el segundo y tercer nivel, para ningún muro la demanda supera la capacidad de resistencia ante carga vertical. En la figura D15 se muestran, en color azul, los muros con mayor demanda de resistencia a carga vertical (todos ubicados en el primer nivel).

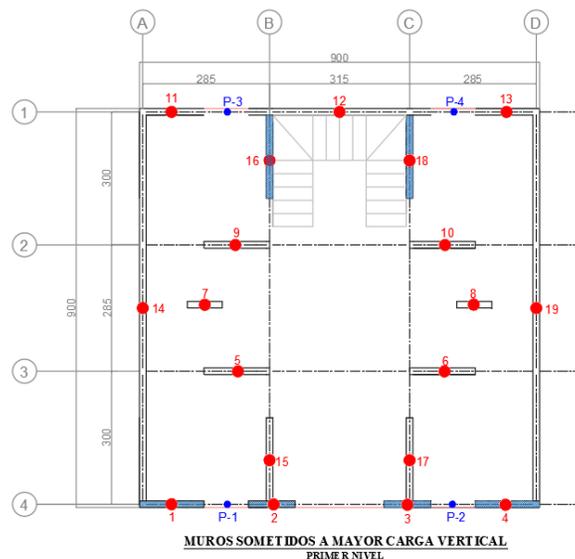


Figura D15. Muros del edificio Roma Sur con mayor demanda de resistencia a carga vertical.

b) Resistencia a cargas laterales

La fuerza cortante resistente de cada muro, considerando el daño se determinó con la siguiente ecuación:

$$V_{mR} = \lambda_R(F_R(0.5v_m' A_T + 0.3P)) \leq \lambda_R(1.5F_R v_m' A_T) \quad (\text{NTC-Mampostería. Ec.11.2.2})$$

donde:

$\lambda_R = 0.8$ (Muros del primer nivel)

$v_m' = 1.5 \text{ kg/cm}^2$

$\lambda_R = 0.9$ (Muros del segundo nivel)

$F_E = 0.6$ (Muros exteriores)

$\lambda_R = 1.0$ (Muros del tercer nivel)

$F_R = 0.4$ (Muros no confinados)

P= Carga axial, definida de la siguiente manera:

$$P = \sigma A_T$$

$\sigma_{\text{Nivel 1}} = 3 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_{\text{Nivel 2}} = 2 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_{\text{Nivel 3}} = 1 \text{ kg/cm}^2$

Las fuerzas actuantes en cada muro se obtuvieron mediante el análisis para estado límite de seguridad contra colapso, tomando en consideración la combinación de carga más desfavorable. En la tabla D17 se muestran los cocientes de demanda de resistencia sobre capacidad de cada muro D_R/C para carga lateral de cada uno de los muros de la estructura. En el cálculo del cociente D_R/C se tomó en cuenta el daño observado en cada muro. Así, para la resistencia a carga lateral, C/D_R se calculó como:

$$\frac{D_R}{C} = \frac{\text{Demanda}}{\text{Capacidad}} = \frac{V_u}{\lambda_R V_{mR}}$$

En la figura D16 se ilustran los muros sometidos a una mayor demanda de fuerza cortante.

Tabla D377. Cocientes de demanda de resistencia / capacidad de cada muro de la estructura original con daño.

REVISIÓN POR FUERZA CORTANTE										
PRIMER NIVEL (PB)										
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	Área	P	V _{mR}	V _u	D _R /C	Estado
		cm	cm		cm ²	t	t	t		
1	X	100	250	2.50	1,400	4.20	0.34	2.76	8.19	✗
2		65	250	3.85	910	2.73	0.22	-1.75	7.98	✗
3		65	250	3.85	910	2.73	0.22	1.76	8.06	✗
4		100	250	2.50	1,400	4.20	0.34	2.80	8.32	✗
5		200	250	1.25	2,800	8.40	0.67	-3.76	5.59	✗
6		200	250	1.25	2,800	8.40	0.67	3.80	5.64	✗
7		110	250	2.27	1,540	4.62	0.37	-1.39	3.77	✗
8		110	250	2.27	1,540	4.62	0.37	1.41	3.82	✗
9		200	250	1.25	2,800	8.40	0.67	-3.12	4.64	✗
10		200	250	1.25	2,800	8.40	0.67	3.24	4.82	✗
11		100	250	2.50	1,400	4.20	0.34	-1.26	3.75	✗
12		360	250	0.69	5,040	15.12	1.21	8.79	7.26	✗
13		100	250	2.50	1,400	4.20	0.34	1.29	3.85	✗
P-1		165	90	0.55	2,310	6.93	0.56	-2.45	4.41	✗
P-2	165	90	0.55	2,310	6.93	0.56	2.45	4.41	✗	
P-3	165	90	0.55	2,310	6.93	0.56	-1.86	3.35	✗	
P-4	165	90	0.55	2,310	6.93	0.56	1.87	3.37	✗	
14	Y	900	250	0.28	12,600	37.80	3.03	-15.60	5.15	✗
15		195	250	1.28	2,730	8.19	0.66	-2.23	3.40	✗
16		195	250	1.28	2,730	8.19	0.66	2.95	4.50	✗
17		195	250	1.28	2,730	8.19	0.66	-2.22	3.39	✗
18		195	250	1.28	2,730	8.19	0.66	-3.53	5.37	✗
19		900	250	0.28	12,600	37.80	3.03	-15.29	5.05	✗

REVISIÓN POR FUERZA CORTANTE										
SEGUNDO NIVEL										
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	Área	P	V _{mR}	V _u	D _R /C	Estado
		cm	cm		cm ²	t	t	t		
20	X	100	250	2.50	1,400	2.80	0.38	-1.31	3.48	✗
21		65	250	3.85	910	1.82	0.25	-1.59	6.47	✗
22		65	250	3.85	910	1.82	0.25	1.59	6.46	✗
23		100	250	2.50	1,400	2.80	0.38	1.31	3.47	✗
24		200	250	1.25	2,800	5.60	0.76	-3.46	4.57	✗
25		200	250	1.25	2,800	5.60	0.76	3.52	4.65	✗
26		110	250	2.27	1,540	3.08	0.42	-1.18	2.83	✗
27		110	250	2.27	1,540	3.08	0.42	1.18	2.85	✗
28		200	250	1.25	2,800	5.60	0.76	-2.92	3.86	✗
29		200	250	1.25	2,800	5.60	0.76	2.96	3.91	✗
30		100	250	2.50	1,400	2.80	0.38	-1.14	3.01	✗
31		360	250	0.69	5,040	10.08	1.36	8.72	6.40	✗
32		100	250	2.50	1,400	2.80	0.38	1.07	2.84	✗
P-5		115	90	0.78	1,610	3.22	0.44	-2.49	5.72	✗
P-6	115	90	0.78	1,610	3.22	0.44	2.49	5.73	✗	
33	Y	900	250	0.28	12,600	25.20	3.40	-14.68	4.31	✗
34		195	250	1.28	2,730	5.46	0.74	-1.13	1.53	✗
35		195	250	1.28	2,730	5.46	0.74	1.88	2.55	✗
36		195	250	1.28	2,730	5.46	0.74	-1.12	1.52	✗
37		195	250	1.28	2,730	5.46	0.74	1.70	2.31	✗
38		900	250	0.28	12,600	25.20	3.40	14.38	4.22	✗
39	300	250	0.83	4,200	8.40	1.13	-1.84	1.62	✗	

REVISIÓN POR FUERZA CORTANTE											
TERCER NIVEL											
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	Área	P	V_{mR}	V_u	D_R/C	Estado	
		cm	cm		cm^2	t	t	t			
40	X	100	250	2.50	1,400	1.40	0.42	-1.04	2.48	✘	
41		65	250	3.85	910	0.91	0.27	-1.13	4.15	✘	
42		65	250	3.85	910	0.91	0.27	1.13	4.15	✘	
43		100	250	2.50	1,400	1.40	0.42	1.04	2.47	✘	
44		200	250	1.25	2,800	2.80	0.84	-1.82	2.17	✘	
45		200	250	1.25	2,800	2.80	0.84	1.88	2.24	✘	
46		110	250	2.27	1,540	1.54	0.46	-0.66	1.43	✘	
47		110	250	2.27	1,540	1.54	0.46	0.66	1.43	✘	
48		200	250	1.25	2,800	2.80	0.84	-1.60	1.91	✘	
49		200	250	1.25	2,800	2.80	0.84	1.63	1.94	✘	
50		100	250	2.50	1,400	1.40	0.42	-1.00	2.38	✘	
51		360	250	0.69	5,040	5.04	1.51	-4.74	3.13	✘	
52		100	250	2.50	1,400	1.40	0.42	0.95	2.26	✘	
P-7		115	90	0.78	1,610	1.61	0.48	-1.96	4.06	✘	
P-8		115	90	0.78	1,610	1.61	0.48	1.96	4.06	✘	
53		Y	900	250	0.28	12,600	12.60	3.78	-8.64	2.28	✘
54			195	250	1.28	2,730	2.73	0.82	-0.97	1.18	✘
55			195	250	1.28	2,730	2.73	0.82	2.19	2.68	✘
56			195	250	1.28	2,730	2.73	0.82	-0.96	1.18	✘
57			195	250	1.28	2,730	2.73	0.82	2.14	2.62	✘
58	900		250	0.28	12,600	12.60	3.78	-8.35	2.21	✘	
59	300		250	0.83	4,200	4.20	1.26	-0.79	0.63	✔	

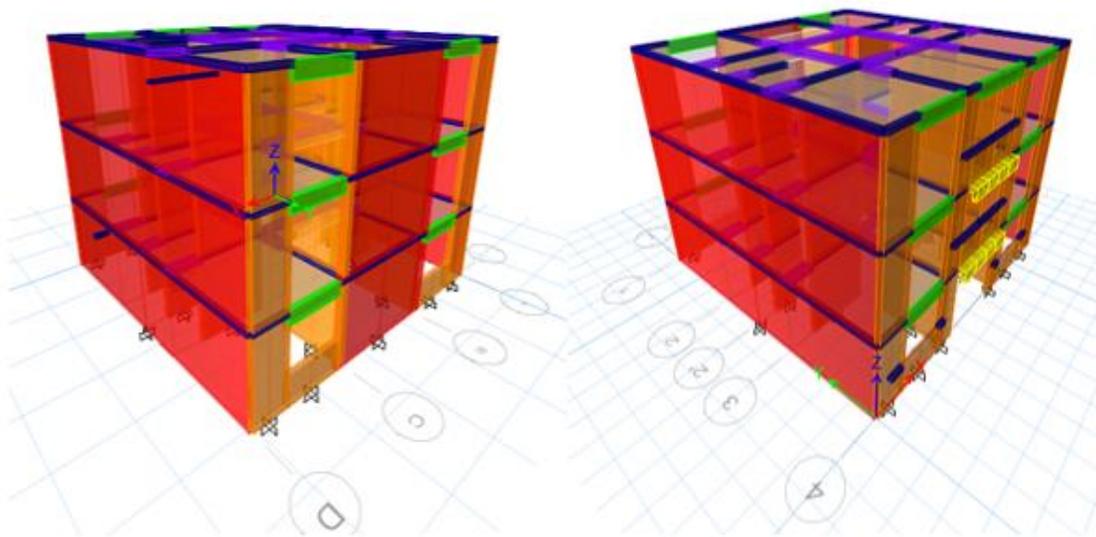


Figura D16. Muros con mayor demanda de resistencia a fuerza cortante (rojo) en el edificio Roma Sur.

Salvo en el muro 59 del Nivel 3, todos los demás muros de todos los niveles tienen un cociente D_R/C mayor que 1.0. Es claro que es necesario rehabilitar la estructura, especialmente dotándola de una resistencia lateral mayor.

PROPUESTA DE REHABILITACIÓN

Inicia nivel 3 de evaluación: Evaluación Profunda (MEP)

De acuerdo con INIFED (2020a), se aceptará rehabilitar una estructura de un edificio existente cuando se cumplan las condiciones a) y b) siguientes:

- a) Los cocientes demanda/capacidad para acciones y/o desplazamientos laterales son iguales o mayores que 1.0 para los elementos, componentes y sistemas estructurales resistentes a cargas gravitacionales y/o resistentes a fuerzas laterales inducidas por sismo.
- b) La estructura mantiene sensiblemente su geometría original; es decir, no requiere de ser renivelada, deformada o desplazada para recuperarla.

Para la estructura de este ejemplo, se cumplen ambas condiciones, por lo que el edificio es factible de ser rehabilitado, desde un punto de vista estructural.

La decisión final dependerá de que el propietario, con ayuda del Proyectista, realice los estudios costo-beneficio y demás análisis económico-financieros para decidir la conveniencia y viabilidad de rehabilitar el edificio, o bien, de demolerlo y reconstruirlo.

Deficiencias de la estructura

La rehabilitación sísmica, por lo general, tiene como objetivo resolver una o las dos deficiencias estructurales siguientes:

- Deficiencia tipo A: Edificios que presentan insuficiente resistencia lateral, de conformidad con un reglamento local vigente.
- Deficiencia tipo B: Estructuras con rigidez lateral inadecuada para controlar los desplazamientos laterales (distorsiones) por debajo de los máximos valores para los estados límites de falla y de servicio prescritos por los reglamentos locales vigentes.

Con base en los resultados del análisis de este ejemplo, se concluye que el edificio Roma Sur presenta los dos tipos de deficiencias. El edificio presenta deficiencia tipo A debido a que, con excepción de un muro, en los demás la demanda de resistencia a fuerza cortante supera su capacidad. También la estructura presenta una deficiencia tipo B dado que las distorsiones laterales de la estructura sobrepasaron las distorsiones permitidas por la NTC-Sismo (2017) para el estado límite de seguridad contra colapso.

Para el diseño de la rehabilitación deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos (INIFED, 2020a):

- a) Condiciones de la estructura potencialmente peligrosas, incluyendo la interacción con cuerpos vecinos.
- b) Daño estructural.
- c) Deterioro de los materiales.
- d) Construcción defectuosa.
- e) Situaciones que afectan las condiciones de servicio.
- f) Durabilidad de los materiales de construcción.

En este ejemplo, se supondrá que los dos aspectos que determinan la rehabilitación son los incisos b) y d). En el caso del inciso d) se incluye la ausencia de elementos de confinamiento en los muros.

Estrategias de rehabilitación

Una estrategia eficiente de rehabilitación debe cumplir las siguientes condiciones (INIFED, 2020a):

- a) Corregir las deficiencias conocidas de todo el sistema y de los componentes o elementos vulnerables.
- b) Ser compatible estructuralmente con el sistema existente.
- c) Ser compatible funcionalmente y, si es posible, estéticamente.
- d) Minimizar las afectaciones a los ocupantes.
- e) Ser costo-efectiva y utilizar materiales y equipos disponibles.

Las estrategias de rehabilitación identificadas para mitigar las deficiencias de una estructura son:

- a) Modificación de componentes estructurales.
- b) Eliminación o mitigación de irregularidades o discontinuidades existentes.
- c) Rigidización global de la estructura.
- d) Reforzamiento global de la estructura.
- e) Eliminación o corrección de problemas causados por la interacción entre edificios.
- f) Reducción de masa reactiva.
- g) Adición de elementos de control de la respuesta.

Es frecuente que en una rehabilitación de un edificio se aplique una combinación de estrategias. Así, por ejemplo, el incremento de la resistencia a carga lateral (estrategia d) incluye usualmente un aumento de la rigidez global (estrategia c).

En la Guía Técnica (INIFED, 2020a) se pueden consultar las distintas estrategias de rehabilitación disponibles.

Para el edificio Roma Sur, se ha optado por aplicar, de manera conjunta, las estrategias a, c, d y f. Como se señaló anteriormente, el edificio no exhibe irregularidades o discontinuidades (estrategia b), ni tiene problemas causados por la interacción con otros edificios (estrategia e). Si bien la adición de elementos de control de respuesta es una posibilidad, su costo relativo con el tamaño de la estructura no justifica su uso.

Como resultado del proceso de evaluación de la estructura y después de haber analizado las distintas estrategias de rehabilitación, se propone el empleo de las siguientes técnicas de rehabilitación para el edificio en estudio.

- **Estrategia a: Modificación de componentes estructurales**
 - a. Reparación de grietas de muros con rajuelas, relleno de mortero y reemplazo de piezas aplastadas.
 - b. Adición de nuevos castillos en toda la altura del edificio, anclados a la cimentación y a las losas de entrepiso.
- **Estrategia c: Rigidización global de la estructura**
 - a. Encamisado de muros con malla de alambre soldado y con recubrimiento de mortero.
- **Estrategia d: Reforzamiento global de la estructura**
 - a. Encamisado de muros con malla de alambre soldado y con recubrimiento de mortero.
- **Estrategia f: Reducción de masa reactiva**
 - a. Retiro de los depósitos de agua de la azotea.
 - b. Construcción de una cisterna en la cimentación.

ANÁLISIS DEL EDIFICIO CON CASTILLOS Y REPARACIÓN DE GRIETAS

Reparación de grietas

La propuesta de rehabilitación estructural para el edificio de este ejemplo contempla, como parte de la estrategia de modificación de componentes estructurales, la reparación de grietas en muros mediante rajuelas, colocación de mortero de cemento y reemplazo de piezas aplastadas en los muros que así lo quieran. En el edificio Roma Sur, se repararían únicamente las grietas del primer y segundo nivel, dado que no se observaron grietas en los muros del tercer nivel.

La reparación de grietas tiene como objetivo principal recuperar parte de la capacidad estructural (resistencia, rigidez y ductilidad) con la que contaban los muros en su estado original (sin daño). Para este ejemplo se considerará la reparación de grietas con mortero de cemento con espesor de hasta 10 mm; para grietas mayores a 10 mm se considerará la aplicación de la técnica de “rajueleo”, la cual consiste en la colocación y pegado de pedazos o rajuelas de tabique de barro recocido.

De acuerdo con la tabla 6.3.1 de INIFED (2020a), la cual se muestra a continuación en la tabla D18, los muros de mampostería reparados pueden recuperar parte de sus propiedades estructurales (resistencia, rigidez y ductilidad) según la técnica aplicada.

Tabla D18. Niveles de recuperación de la capacidad de elementos reparados (INIFED,2020a).

Material	Ancho de grieta	Nivel de recuperación %		
		Resistencia	Rigidez	Ductilidad
Resina epóxica	0.02 – 0.5 mm	70 – 90	30 – 80	75 – 90
Mortero epóxico	0.3 – 0.5 mm	70 – 90	30 – 80	75 – 90
Mortero de cemento	>0.5 mm	80	50	80

En el caso del edificio Roma Sur se considerará que la resistencia de cada muro reparado será igual a 0.80 veces la resistencia nominal, sin daño, del muro (aplicable a muros del primer y segundo nivel). Es decir, se supone $I_R=0.8$. En términos de rigidez, para los muros del primer nivel se considerará 0.50 veces la rigidez inicial (sin daño), mientras que para los muros del segundo nivel se considerará como 0.80 veces la rigidez inicial, esto debido al tamaño de las grietas. Por lo tanto, se supondría, para los muros del primer nivel $I_k=0.5$ y para los del segundo nivel $I_k=0.8$.

Adición de castillos

Con objeto de mejorar la capacidad de deformación lateral, así como incrementar su resistencia a cargas laterales, se propone añadir castillos en los extremos de los muros, así como en sus bordes verticales libres. Los castillos, debidamente anclados en sus extremos y con un adecuado mecanismo de transmisión de cortante con la mampostería existente, proveerían de confinamiento al muro ante nuevas sollicitaciones sísmicas.

La adición de castillos se considera para los muros de todos los niveles. Los castillos se deben anclar en la cimentación. El proyecto no considera la adición de dadas, debido a que su construcción resulta compleja y laboriosa, por lo que se aprovechará la losa como elemento de confinamiento y se anclará el refuerzo longitudinal de los castillos a ésta. Se propone la adición de castillos de 14 x 14 cm, el detallado y cálculo del refuerzo se puede consultar más adelante en este documento.

Modelo numérico de la estructura Roma Sur reparada y con castillos nuevos

Debido a que ahora la estructura debe de ser analizada como una estructura de mampostería confinada, el análisis y modelado de la misma debe llevarse bajo consideraciones especiales para tomar en cuenta este cambio. Existen diversos métodos de modelación para estructuras. De manera breve se puede nombrar al método simplificado, al método de columna ancha o al método de análisis por elementos finitos. Cualquiera puede llevarse a cabo y obtener resultados satisfactorios (sujetos al nivel de refinamiento con el que se modele el complejo arreglo tridimensional formado por muros, losas, castillos y pretiles). Para el caso de este ejemplo, el análisis y modelado de la estructura con reparación de grietas y adición de castillos se llevó a cabo mediante el método de columna ancha, siguiendo las recomendaciones de la Guía de Análisis (SMIE, 2015).

En la figura D17 se muestra la distribución de los castillos adicionados, así como la nueva numeración de muros (producto de la división de muros largos debido a la adición de castillos). En la figura se indica también la posición de los ejes de las columnas anchas usadas para modelar los muros.

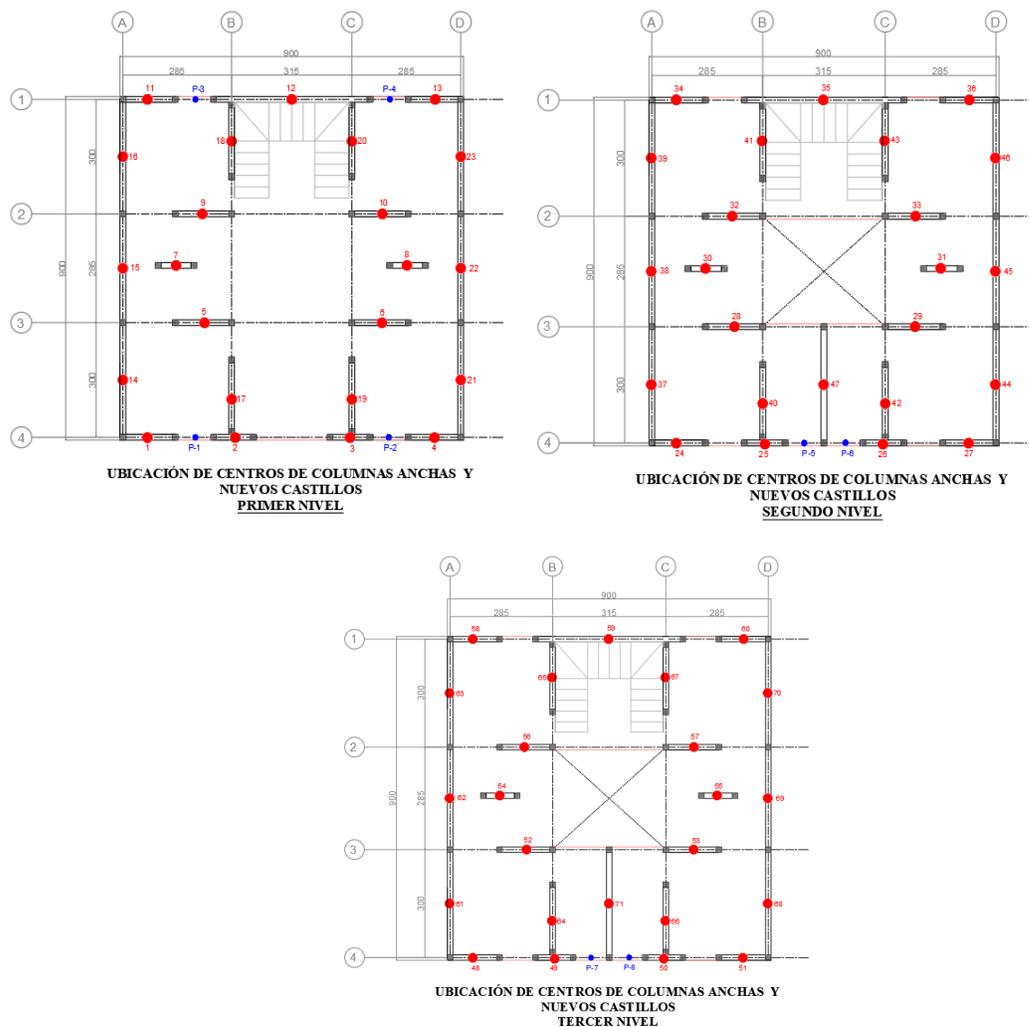


Figura D17. Distribución de nuevos castillos, numeración de muros y ubicación de ejes de columnas anchas del edificio Roma Sur rehabilitado.

Método de columna ancha

Toda la metodología desarrollada a continuación se siguió de acuerdo con lo sugerido por la Guía de Análisis (SMIE, 2015).

Condiciones de diseño

Además de las condiciones de diseño tomadas en consideración para el modelo de análisis de la estructura original, se añaden las siguientes condiciones para el análisis de la estructura Roma Sur rehabilitada:

- a) La sección transversal del elemento barra será la sección transversal del muro incluyendo las secciones transformadas de los castillos. La sección transversal de castillos que sean continuos a dos o más segmentos de muro deberá incluirse, solamente, en uno de esos segmentos.
- b) Los ejes de las columnas anchas se localizarán en el centro del muro, el cual no siempre coincidirá con el centroide de la sección (se considerará la sección de los castillos).

Propiedades de las secciones

a) Área transversal

Se considerará el área transversal de cada muro más el área transformada de los castillos considerados en la sección del muro (cuidando no duplicar secciones de castillos). El área transformada de cada sección se calculará con la siguiente fórmula:

$$A = A_m + 2n A_c \quad \text{(Guía de Análisis SMIE,2015. Secc.4.4)}$$

donde:

A_m = Área del muro de mampostería

$2 A_c$ = Área de dos castillos (en caso de que solo se considere un castillo, se usará A_c)

n = Relación modular E_c / E_m

b) Momento de inercia de las secciones

- Respecto al eje perpendicular al eje del muro

El momento de inercia respecto al eje “fuerte” considerará la suma del momento de inercia de la sección de mampostería y el momento de inercia transformado de los castillos considerados en la sección, respecto al eje centroidal de la sección se calculará con la siguiente ecuación:

$$I_x = I_{mx} + 2n (I_{cx} + A_c d^2) \quad \text{(Guía de Análisis SMIE,2015. Secc.4.4)}$$

- Respecto al eje paralelo al eje del muro

Respecto al eje “débil” del muro el momento de inercia se calculará como:

$$I_x = I_{mx} + 2n (I_{cx}) \quad \text{(Guía de Análisis SMIE,2015. Secc.4.4)}$$

donde:

d = Distancia al centroide del castillo al centroide del muro

I_{cy} = Momento de inercia del castillo respecto a su eje transversal

I_{my}, I_{mx} = Momento de inercia del muro de mampostería

c) Área de cortante

- Respecto al eje perpendicular al eje del muro

Se tomará en cuenta el área transversal de la mampostería más el área transformada de los castillos, todo dividido entre el factor de forma de cortante de la sección transversal (1.2 para secciones rectangulares).

$$A_{vy} = \frac{A_m + 2nA_c}{1.2} \quad (\text{Guía de Análisis SMIE, 2015. Secc. 4.4})$$

- Respecto al eje paralelo al eje del muro

El área de cortante de una sección de muro, hecha de un solo material, comúnmente se expresa en término de un factor de forma:

$$A_{vx} = \frac{A}{k} = \frac{A_m + 2A_c}{k} \quad (\text{Guía de Análisis SMIE, 2015. Secc. 4.4})$$

donde:

A_m = Área transversal de la sección del muro, obtenida de la multiplicación de la longitud de cada muro por su espesor, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A_m = L_m t_m$$

A_c = Área transversal de la sección de los castillos, calculada de la siguiente manera:

$$A_c = b_c h_c = (14\text{cm})(14\text{cm}) = 196\text{cm}^2$$

Considerando que los castillos son de concreto, se obtiene el factor de forma mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{6}{5} + \frac{6\alpha(n-1)}{5(2-2\alpha)} \quad (\text{Guía de Análisis SMIE, 2015. Secc. 4.4.1})$$

donde:

$$\alpha = \sum b_i / L$$

$\sum b_i$ = Suma de las longitudes de los castillos

L = Longitud total del muro en el plano del muro

d) Constante de torsión de Saint Venant

Para la obtención de esta constante se supone una sección abierta de pared delgada. Esta constante se calcula de la siguiente manera:

$$J = \frac{Lt^3}{3} \quad (\text{Guía de Análisis SMIE, 2015. Secc. 4.4.1})$$

donde:

L = Longitud total del muro en el plano del muro

t = Espesor del muro

e) Ancho efectivo de losa

Dado que, para este ejemplo, los muros se encuentran acoplados a nivel de la losa, se modeló un elemento cuya sección tiene el espesor de la losa t_l y su ancho es $3t_l$, como se muestra en la figura D18. Estos elementos deberán ser modelados como elementos de concreto y deberá tomarse en consideración el agrietamiento de las secciones. Para tomar en cuenta el agrietamiento de la losa, se redujo el momento de inercia a la mitad.

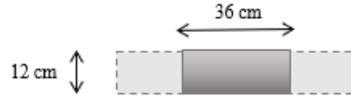


Figura D18. Ancho efectivo de la losa.

f) Pretil

Para el caso del edificio Roma Sur, resulta relevante conocer la interacción de los pretil (muros bajo ventanas) con el resto de los muros, por lo que se considerará el modelado de los mismos. Para ello, los pretil fueron modelados como columnas anchas equivalentes. Los pretil fueron modelados en todos los niveles en los que se encuentren presentes y se consideró además la colocación de elementos rígidos articulados en sus extremos para asegurar la conexión con el resto de los elementos (muros). Las vigas correspondientes a los pretil se modelarán como una sección tipo "L", hecha de concreto y considerando un agrietamiento mediante la reducción del momento de inercia igual a 0.5, con las características que se muestran en la figura y tabla D19:

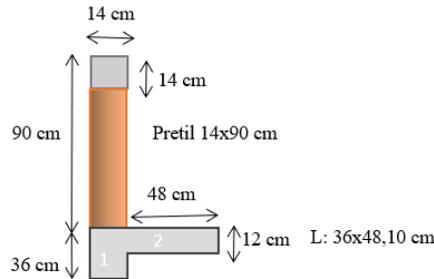


Figura D19. Características geométricas de la sección "L" para modelado de pretil

Tabla D19. Propiedades de la sección "L" para modelado de pretil.

No.	b	h	y_i	A	$A_i Y_i$	I _x	I _{x-x}
	cm	cm	cm	cm ²	cm ³	cm ⁴	cm ⁴
1	14	36	18	504	9,072	54,432	75,076
2	48	12	30	576	17,280	6,912	24,975
SUMA				1,080	26,352		100,051

yc=	24.4
-----	------

g) Elementos rígidos

Los elementos rígidos que conectarán al sistema de columnas anchas serán modelados como vigas hechas a base de un material con un módulo de elasticidad mucho mayor que el de la mampostería. En este caso fue 100 veces mayor.

h) Efecto de las grietas reparadas

Dado que el modelo de análisis contempla la recuperación del 50% de la rigidez de cada muro del primer nivel y del 80% en cada muro del segundo nivel, esto debido a la reparación de grietas, este efecto se verá aplicado sobre el área de cortante de cada una de las secciones de columna ancha.

En la tabla D20 se muestran las propiedades transformadas para cada sección empleada para conformar el modelo. En la figura D20 se muestran las vistas en elevación de la nueva configuración del edificio Roma Sur con castillos nuevos, así como de la conformación de marcos equivalentes para el análisis con el método de columna ancha

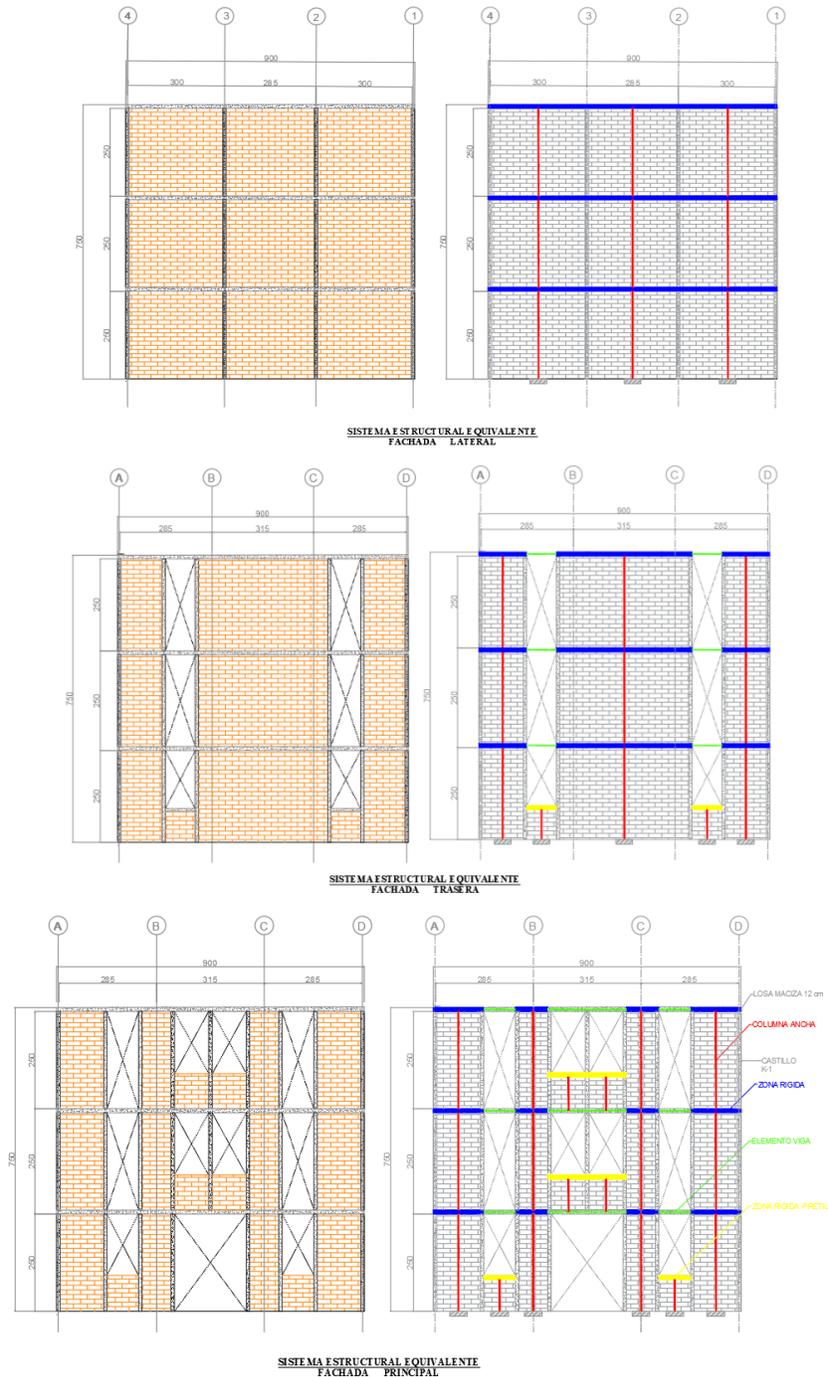


Figura D20. Vista en elevación de la configuración de castillos para el edificio Roma Sur y ubicación del sistema de columna ancha.

Tabla D20. Propiedades para el modelado del edificio Roma Sur con el método de columna ancha

PROPIEDADES PARA EL ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE COLUMNA ANCHA																
Propiedades generales											Propiedades transformadas					
Muro	Dirección	Longitud	Altura	Espesor	Área	Inercia X	Inercia Y	Castillos		d	Inercia X	Inercia Y	Área	Área de cortante	Área de cortante	Torsión
		L_m	h		A_m	I_{xm}	I_{ym}	Izq	Der		I_{XT}	I_{YT}	A_T	$A_T V_x$	$A_T V_y$	J
Tipo		m	m	m	m ²	cm ⁴	cm ⁴			m	cm ⁴	cm ⁴	m ²	m ²	m ²	cm ⁴
M01-X	X	1.0	2.5	0.14	0.14	22,867	1,166,667	-	Sí	0.57	83,232	13,234,714	0.32	0.13	0.27	91,467
M02-X		0.7	2.5		0.09	14,863	320,396	-	Sí	0.40	75,228	6,147,146	0.28	0.09	0.23	59,453
M03-X		2.0	2.5		0.28	45,733	9,333,333	Sí	Sí	1.14	106,098	57,424,428	0.65	0.27	0.54	182,933
M04-X		1.1	2.5		0.15	25,153	1,552,833	Sí	Sí	0.69	85,518	19,208,943	0.52	0.16	0.44	100,613
M05-X		3.6	2.5		0.50	82,320	54,432,000	Sí	Sí	1.94	142,685	193,587,820	0.87	0.45	0.73	329,280
P01-X		1.7	0.9		0.23	37,730	5,240,813	-	Sí	0.90	98,095	34,905,529	0.42	0.21	0.35	150,920
P02-X	1.2	0.9	0.16	26,297	1,774,354	Sí	-	0.65	86,662	17,210,207	0.35	0.15	0.29	105,187		
M06-Y	Y	3.0	2.5	0.14	0.42	68,600	31,500,000	-	Sí	1.57	128,965	122,658,353	0.60	0.37	0.50	274,400
M07-Y		2.9	2.5		0.40	65,170	27,007,313	-	Sí	1.50	125,535	109,669,925	0.58	0.35	0.49	260,680
M08-Y		2.0	2.5		0.27	44,590	8,650,688	Sí	Sí	1.12	104,955	54,658,270	0.64	0.26	0.54	178,360
M09-Y		3.0	2.5		0.42	68,600	31,500,000	Sí	Sí	1.64	128,965	130,962,835	0.79	0.38	0.66	274,400

Tabla D21. Clasificación de muros para el modelado con columna ancha.

TIPO	Muros N1	Muros N2	Muros N3
M01-X	1, 4, 11, 13	24, 27, 34, 36	48, 51, 58, 60
M02-X	2, 3	25, 26	49, 50
M03-X	5, 6, 9, 10	28, 29, 32, 33	52, 53, 56, 57
M04-X	7, 8	30, 31	54, 55
M05-X	12	35	59
M06-Y	14, 16, 21, 23	37, 39, 44, 46	61, 63, 68, 70
M07-Y	15, 22	38, 45	62, 69
M08-Y	17, 18, 19, 20	40, 41, 42, 43	64, 65, 66, 67
M09-Y	-	47	71
P01-X	P1, P2, P3, P4	-	-
P02-X	-	P5, P6	P7, P8

Espectro para el análisis

De acuerdo con el capítulo 4 de INIFED (2020a), para fines de rehabilitación se usó un valor del factor de comportamiento sísmico $Q=2$, por lo que es necesario volver a obtener el espectro de diseño correspondiente a la estructura adaptado al cambio de valor en el factor de comportamiento sísmico. Se obtendrán, a través del programa SASID, los espectros de diseño y elástico para conocer nuevamente la respuesta de la estructura en términos de estado límite último (seguridad contra colapso) y estado límite de servicio (limitación de daños ante sismos frecuentes, respectivamente). En la figura D21, se muestran los espectros y valores obtenidos.

Es conveniente mencionar que la estructura se seguirá analizando bajo las mismas hipótesis establecidas en este documento. El objetivo principal de analizar la estructura considerando la reparación de grietas y la adición de castillos es poder evaluar la manera en que estos dos factores contribuyen a la “recuperación” de la capacidad de la estructura, así como determinar si el encamisado de muros con malla de alambre soldado resulta una técnica óptima para mitigar las deficiencias de esta estructura o es necesario emplear otra técnica.

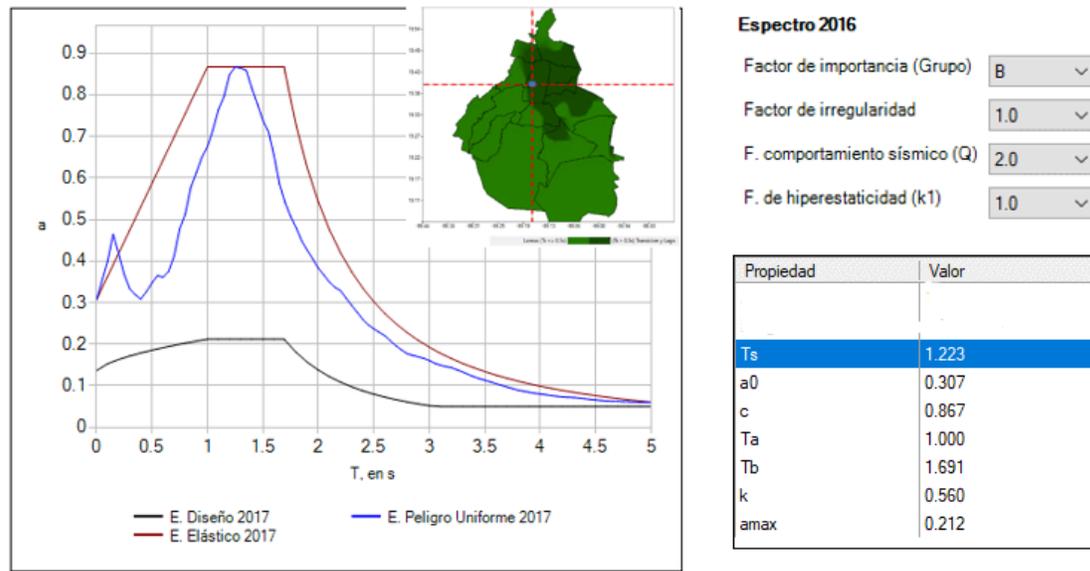


Figura D21. Espectros obtenidos del SASID para el análisis de la estructura con castillos nuevos y grietas reparadas.

Resultados del análisis

A continuación, se presentan los resultados del análisis de la estructura con grietas reparadas y nuevos castillos en términos del periodo de vibración de la estructura, desplazamientos y distorsiones de entrepiso, así como los cocientes demanda de resistencia a carga lateral/capacidad de cada muro.

Periodos de vibración

En la tabla D22 se muestran los periodos de vibración del edificio Roma Sur considerando las grietas reparadas en el primer y segundo nivel, con una recuperación del 50 y 80% en la rigidez de los muros, respectivamente. Los resultados consideran también la adición de nuevos castillos para los muros de todos los niveles. Los periodos se presentan para el estado límite de seguridad contra colapso (ELSC) y para el estado de limitación de daños ante sismos frecuentes (LDSF).

Tabla D22. Periodos de vibración de la estructura Roma Sur con grietas reparadas y nuevos castillos.

Modo	Estructura con grietas reparadas y nuevos castillos					
	ELSC			LDSF		
	Periodo	Participación modal		Periodo	Participación modal	
	s	Ux	Uy	s	Ux	Uy
1	0.243	0.828	0.001	0.24	0.820	0.006
2	0.189	0.830	0.892	0.195	0.832	0.883
3	0.152	0.873	0.899	0.153	0.879	0.909
4	0.08	0.980	0.991	0.079	0.980	0.910

Como puede observarse en la tabla D22, la estructura con grietas reparadas y nuevos castillos mostró, para el ELSC y para LDSF, una reducción en el periodo de vibrar de la estructura del 26% con respecto a la estructura original con daño. Esta reducción del periodo se atribuye al aumento

de rigidez en la estructura generado por los nuevos castillos y, en menor medida, por el incremento de rigidez debido a la reparación de grietas. Es importante mencionar que para el caso de la estructura con grietas reparadas y nuevos castillos se presentan resultados hasta el cuarto modo de vibrar, debido a que es en éste que se presenta el 90% de participación de la masa efectiva.

Desplazamientos laterales

En la tabla D23 se pueden consultar los desplazamientos laterales calculados para ELSC y LDSF para la estructura con grietas reparadas y nuevos castillos. Como era de esperarse, las demandas de desplazamiento disminuyeron. Esto debido a la reparación de grietas en el primer y segundo nivel, por la cual los muros se supusieron con una rigidez lateral equivalente al 50 y 80% de la original, respectivamente, así como a la adición de nuevos castillos. Por ejemplo, para el nivel de azotea (Nivel 3) el desplazamiento en la dirección X, δ_x se redujo en 61% para el ELSC y en 53% para LDSF, respecto a la estructura original con daño. Es importante mencionar que los desplazamientos para LDSF son mayores respecto a los del ELSC debido a que, para LDSF se analiza la estructura directamente usando el espectro elástico obtenido con SASID, por lo que las fuerzas incidentes sobre la estructura resultan mayores. En contraste, para el ELSC, se empleó el espectro reducido por el factor de comportamiento $Q=2$ y el factor de sobrerresistencia R .

El perfil de desplazamientos máximos para los dos estados límite y las dos direcciones se muestran en la figura D22. Por la forma del perfil es claro que el comportamiento está dominado por el primer modo de vibración de traslación en ambas direcciones.

Tabla D23. Desplazamientos laterales para la estructura con grietas reparadas y nuevos castillos.

DESPLAZAMIENTOS			
ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO			
Estructura con grietas reparadas y castillos			
Nivel	H	δ_x	δ_y
	m	cm	cm
3	7.5	0.41	0.24
2	5	0.30	0.18
1	2.5	0.16	0.10
Base	0	0	0

DESPLAZAMIENTOS			
LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMIOS FRECUENTES			
Estructura con grietas reparadas y castillos			
Nivel	H	δ_x	δ_y
	m	cm	cm
3	7.5	0.96	0.62
2	5	0.72	0.49
1	2.5	0.39	0.28
Base	0	0	0

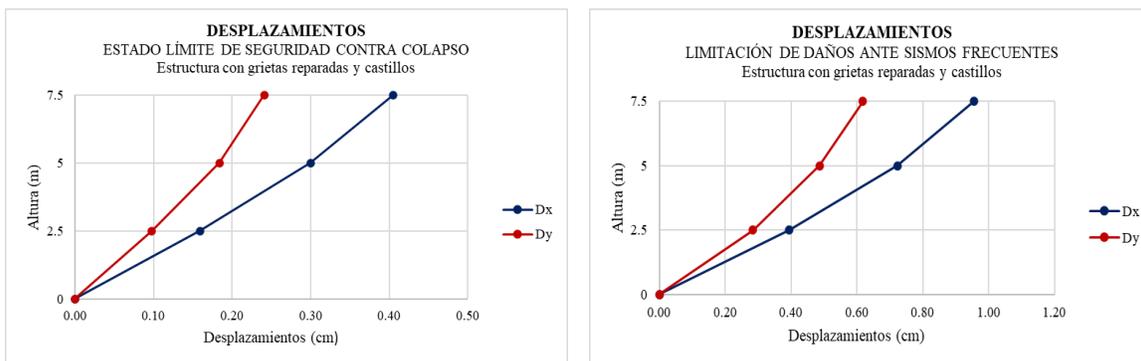


Figura D22. Desplazamientos laterales para la estructura con grietas reparadas y nuevos castillos.

Tabla D24. Distorsiones de entrepiso para el ELSC en la estructura con grietas reparadas y castillos nuevos.

DISTORSIONES									
ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA EL COLAPSO									
Estructura con grietas reparadas y castillos									
Nivel	γ_x	γ_y	T	k_2	Q	R	γ_x	γ_y	γ NTC-2017
	%	%	s				%	%	%
3	0.04	0.02	0.24	0.25	2	2.25	0.19	0.10	0.50
2	0.06	0.03					0.26	0.15	0.50
1	0.06	0.04					0.29	0.18	0.50

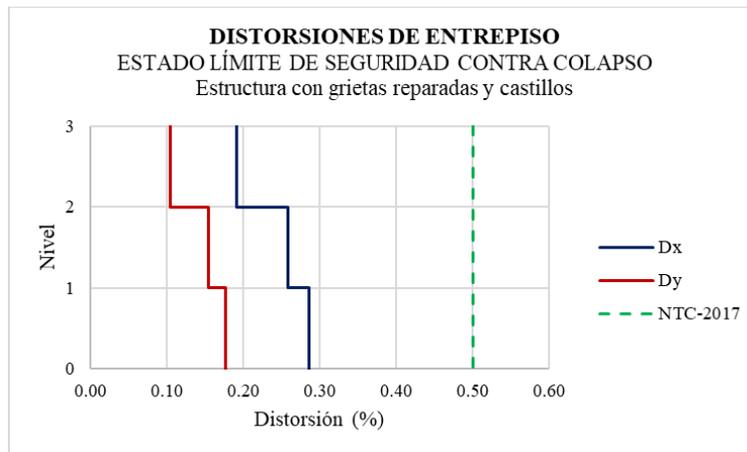


Figura D23. Distorsiones de entrepiso para ELSC en la estructura con grietas reparadas y castillos nuevos.

Como puede observarse en la tabla D24 y la figura D23, las distorsiones obtenidas para el ELSC quedan dentro de los límites establecidos por la NTC-Sismo (2017). Con la adición de castillos y reparación de grietas, la estructura Roma Sur ya no muestra deficiencias en términos de distorsión. Queda pendiente estudiar su capacidad de resistencia a fuerzas laterales. Esto se abordará en más adelante.

En la tabla D25 se muestran las distorsiones para el caso de limitación de daños ante sismos frecuentes. Las distorsiones obtenidas del análisis (parte izquierda de la tabla D15) se multiplicaron por el factor k_s , el cual, para el caso de esta estructura (debido al periodo del suelo) es igual a 0.25 (obteniendo así las distorsiones de la parte derecha de la tabla). En la figura D24 se muestra la distribución de distorsiones en la altura del edificio para este estado límite.

Tabla D25. Distorsiones de entrepiso para LDSF para la estructura con grietas reparadas y castillos nuevos.

DISTORSIONES						
LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES						
Estructura con grietas reparadas y castillos nuevos						
Nivel	γ_x	γ_y	k_s	γ_x	γ_y	γ NTC-2017
	%	%		%	%	
3	0.09	0.05	0.25	0.02	0.01	0.20
2	0.13	0.08		0.03	0.02	0.20
1	0.16	0.11		0.04	0.03	0.20

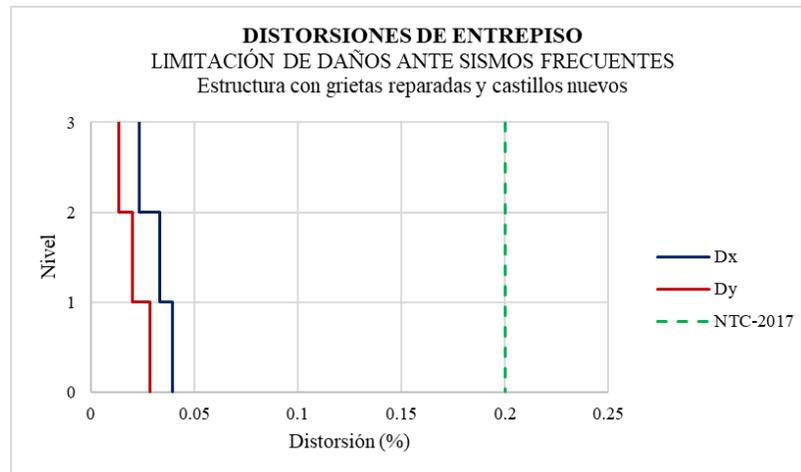


Figura D24. Distorsiones de entrepiso para LDSF en la estructura con grietas reparadas y castillos nuevos.

De la tabla D25 y figura D24 se observa que se cumplen los límites establecidos en la NTC-Sismo.

Una vez que se ha confirmado que la estructura con castillos y reparación de grietas cumple con los límites permisibles establecidos por la NTC-Sismo (2017), es necesario revisar la condición de resistencia a fuerza cortante de cada muro. La revisión de la resistencia cortante de cada muro permitirá decidir en qué muros es necesario colocar un encamisado con malla de alambre soldado recubierta con mortero, de modo de satisfacer los objetivos de la rehabilitación.

La revisión de la resistencia de los muros de la estructura original se hizo partiendo de la base de que era de mampostería simple y, por tanto, se usaron las ecuaciones del capítulo 11 de la NTC-Mampostería (2017). Ahora, dado que la estructura rehabilitada contaría con castillos y la losa se supone que funcionaría como una dala, se revisará a la estructura como de mampostería confinada. Como consecuencia, se utilizarán las ecuaciones y criterios establecidos en el capítulo 5 de la misma NTC, como se muestra a continuación:

Resistencias

a) Resistencia a carga vertical

La carga vertical resistente P_R de cada uno de los muros de mampostería confinada, considerando la recuperación de resistencia por la reparación de grietas se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P_R = \lambda_R [F_R F_E (f_m' A_T + \sum A_s f_y)] \quad \text{(NTC-Mampostería. Ec. 5.3.1)}$$

donde:

- $\lambda_R = 0.8$ (Muros del primer y segundo nivel)
- $\lambda_R = 1.0$ (Muros del tercer nivel)
- $A_T =$ Área del muro considerando castillos (sin transformar la sección)
- $A_s = 1.87 \text{ cm}^2$ (4#3)
- $F_R = 0.6$
- $F_E = 0.7$ (Muros interiores)
- $F_E = 0.6$ (Muros exteriores)
- $f_m' = 20 \text{ kg/cm}^2$
- $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

Nuevamente se usará λ_R para aproximar la resistencia a cargas verticales, aunque este factor es estrictamente aplicable para la resistencia ante cargas laterales. Se puede argumentar que el daño por sismo afecta la capacidad resistente a fuerzas laterales. Se considera que, tras la reparación de las grietas con mortero, $\lambda_R=0.8$.

Al igual que en el análisis de la estructura original con daño, para el análisis de la estructura con grietas reparadas y castillos nuevos se buscó conocer el cociente D_R/C para la resistencia a cargas verticales.

En la tabla D26 se muestra la revisión de muros por carga vertical en la estructura con grietas reparadas y castillos nuevos. Se indica con el símbolo ✓ que el cociente D_R/C es menor que 1, es decir, que el muro resiste carga vertical, mientras que con el símbolo X se marca que el cociente D_R/C mayor que 1, por lo que el muro no resiste carga vertical (obtenidas del análisis).

Tabla D26. Cocientes de demanda de resistencia a carga vertical / capacidad en la estructura con grietas reparadas y castillos nuevos.

REVISIÓN POR CARGA VERTICAL										
PRIMER NIVEL (PB)										
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	# Castillos	AT	P_R	P_u	D_R/C	Estado
		cm	cm			cm^2	t	t		
1	X	114	250	2.19	1	1,596	11.45	-4.01	0.35	✓
2		79	250	3.16	1	1,106	8.63	-3.63	0.42	✓
3		79	250	3.16	1	1,106	8.63	-3.58	0.41	✓
4		114	250	2.19	1	1,596	11.45	-3.44	0.30	✓
5		228	250	1.10	2	3,192	26.73	-6.73	0.25	✓
6		228	250	1.10	2	3,192	26.73	-6.72	0.25	✓
7		138	250	1.81	2	1,932	18.26	-4.08	0.22	✓
8		138	250	1.81	2	1,932	18.26	-4.12	0.23	✓
9		228	250	1.10	2	3,192	26.73	-6.48	0.24	✓
10		228	250	1.10	2	3,192	26.73	-6.64	0.25	✓
11		114	250	2.19	1	1,596	11.45	-3.99	0.35	✓
12		388	250	0.64	2	5,432	35.81	-7.24	0.20	✓
13		114	250	2.19	1	1,596	11.45	-3.51	0.31	✓
P-1		179	90	0.50	1	2,506	16.70	-2.05	0.12	✓
P-2		179	90	0.50	1	2,506	16.70	-2.22	0.13	✓
P-3		179	90	0.50	1	2,506	16.70	-1.52	0.09	✓
P-4	179	90	0.50	1	2,506	16.70	-1.39	0.08	✓	
14	Y	314	250	0.80	1	4,396	27.58	-4.99	0.18	✓
15		299	250	0.84	1	4,186	26.37	-4.31	0.16	✓
16		314	250	0.80	1	4,396	27.58	-5.83	0.21	✓
17		223	250	1.12	2	3,122	26.26	-6.56	0.25	✓
18		223	250	1.12	2	3,122	26.26	-5.21	0.20	✓
19		223	250	1.12	2	3,122	26.26	-6.54	0.25	✓
20		223	250	1.12	2	3,122	26.26	-6.74	0.26	✓
21		314	250	0.80	1	4,396	27.58	-4.68	0.17	✓
22		299	250	0.84	1	4,186	26.37	-4.35	0.17	✓
23		314	250	0.80	1	4,396	27.58	-5.66	0.21	✓

REVISIÓN POR CARGA VERTICAL											
SEGUNDO NIVEL											
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	#	AT	P _R	P _u	D _{R/C}	Estado	
		cm	cm		Castillos	cm ²	t	t			
24	X	114	250	2.19	1	1,596	11.45	-2.27	0.20	✓	
25		79	250	3.16	1	1,106	8.63	-1.71	0.20	✓	
26		79	250	3.16	1	1,106	8.63	-1.67	0.19	✓	
27		114	250	2.19	1	1,596	11.45	-1.99	0.17	✓	
28		228	250	1.10	2	3,192	26.73	-4.26	0.16	✓	
29		228	250	1.10	2	3,192	26.73	-4.25	0.16	✓	
30		138	250	1.81	2	1,932	18.26	-2.66	0.15	✓	
31		138	250	1.81	2	1,932	18.26	-2.68	0.15	✓	
32		228	250	1.10	2	3,192	26.73	-2.68	0.10	✓	
33		228	250	1.10	2	3,192	26.73	-4.11	0.15	✓	
34		114	250	2.19	1	1,596	11.45	-4.23	0.37	✓	
35		388	250	0.64	2	5,432	35.81	-4.18	0.12	✓	
36		114	250	2.19	1	1,596	11.45	-2.17	0.19	✓	
P-5		129	90	0.70	1	1,806	12.66	1.14	0.09	✓	
P-6		129	90	0.70	1	1,806	12.66	-1.14	0.09	✓	
37		Y	314	250	0.80	1	4,396	27.58	-3.29	0.12	✓
38			299	250	0.84	1	4,186	26.37	-2.80	0.11	✓
39			314	250	0.80	1	4,396	27.58	-3.78	0.14	✓
40	223		250	1.12	2	3,122	26.26	-4.15	0.16	✓	
41	223		250	1.12	2	3,122	26.26	-3.94	0.15	✓	
42	223		250	1.12	2	3,122	26.26	-4.14	0.16	✓	
43	223		250	1.12	2	3,122	26.26	-3.74	0.14	✓	
44	314		250	0.80	1	4,396	27.58	-2.99	0.11	✓	
45	299		250	0.84	1	4,186	26.37	-2.81	0.11	✓	
46	314		250	0.80	1	4,396	27.58	-3.66	0.13	✓	
47	328		250	0.76	2	4,592	36.14	-1.77	0.05	✓	

REVISIÓN POR CARGA VERTICAL											
TERCER NIVEL											
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	#	AT	P _R	P _u	D _{R/C}	Estado	
		cm	cm		Castillos	cm ²	t	t			
48	X	114	250	2.19	1	1,596	14.32	-0.94	0.07	✓	
49		79	250	3.16	1	1,106	10.79	-0.95	0.09	✓	
50		79	250	3.16	1	1,106	10.79	-0.93	0.09	✓	
51		114	250	2.19	1	1,596	14.32	-0.88	0.06	✓	
52		228	250	1.10	2	3,192	33.41	-1.96	0.06	✓	
53		228	250	1.10	2	3,192	33.41	-1.95	0.06	✓	
54		138	250	1.81	2	1,932	22.83	-1.24	0.05	✓	
55		138	250	1.81	2	1,932	22.83	-1.25	0.05	✓	
56		228	250	1.10	2	3,192	33.41	-1.88	0.06	✓	
57		228	250	1.10	2	3,192	33.41	-1.98	0.06	✓	
58		114	250	2.19	1	1,596	14.32	-0.99	0.07	✓	
59		388	250	0.64	2	5,432	44.77	-1.90	0.04	✓	
60		114	250	2.19	1	1,596	14.32	-0.96	0.07	✓	
P-7		129	90	0.70	1	1,806	15.83	1.42	0.09	✓	
P-8		129	90	0.70	1	1,806	15.83	1.42	0.09	✓	
61		Y	314	250	0.80	1	4,396	34.48	-1.48	0.04	✓
62			299	250	0.84	1	4,186	32.97	-1.27	0.04	✓
63			314	250	0.80	1	4,396	34.48	-1.67	0.05	✓
64	223		250	1.12	2	3,122	32.82	-1.86	0.06	✓	
65	223		250	1.12	2	3,122	32.82	-1.96	0.06	✓	
66	223		250	1.12	2	3,122	32.82	-1.85	0.06	✓	
67	223		250	1.12	2	3,122	32.82	-1.80	0.05	✓	
68	314		250	0.80	1	4,396	34.48	-1.34	0.04	✓	
69	299		250	0.84	1	4,186	32.97	-1.25	0.04	✓	
70	314		250	0.80	1	4,396	34.48	-1.61	0.05	✓	
71	328		250	0.76	2	4,592	45.17	-0.90	0.02	✓	

Del análisis de los cocientes de demanda a capacidad D_R/C para carga vertical en cada muro se observó que la reparación de grietas y la adición de castillos contribuyeron para que todos los muros del edificio Roma Sur cuenten con la suficiente capacidad para resistir cargas verticales.

b) Resistencia a cargas laterales

$$V_{mR} = \lambda_R \{ F_R [(0.5 v'_m A_T + 0.3P)f] \} \leq \lambda_R (1.5 F_R v'_m A_T) \quad (\text{NTC-Mampostería. Ec. 5.4.2})$$

donde:

$\lambda_R = 0.8$ (Muros del primer y segundo nivel) $F_R = 0.7$ (Muros confinados)

$\lambda_R = 1.0$ (Muros del tercer nivel) $v'_m = 1.5 \text{ kg/cm}^2$

$A_T =$ Área del muro considerando castillos (sin transformar la sección)

$P =$ Carga vertical, definida de la siguiente manera:

$$P = \sigma A_T$$

$\sigma_{\text{Nivel 1}} = 3 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_{\text{Nivel 2}} = 2 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_{\text{Nivel 3}} = 1 \text{ kg/cm}^2$

$f =$ Factor de relación de aspecto

$$f = \begin{cases} 1.5 & \text{si } \frac{H}{L} \leq 0.2 \\ 1.0 & \text{si } \frac{H}{L} \geq 1.0 \end{cases} \quad \text{ó se interpolará para casos intermedios} \quad (\text{NTC-Mampostería. Ec. 5.4.3})$$

En la tabla D27 se muestran los cocientes de demanda de resistencia a cargas laterales a capacidad D_R/C de cada uno de los muros de la estructura, calculado para el estado límite de seguridad contra el colapso (espectro de diseño) y tomando en consideración la recuperación de resistencia de los muros para el primer nivel y segundo nivel en 80%. El tercer nivel se exime de esta consideración, puesto que no hubo presencia de grietas, únicamente se adicionaron nuevos castillos.

Para la obtención de estos cocientes se tomó en cuenta la siguiente consideración.

$$\frac{D_R}{C} = \frac{\text{Demanda}}{\text{Capacidad}} = \frac{V_u}{\lambda_R V_{mR}} \text{ para Nivel 1 y Nivel 2}$$

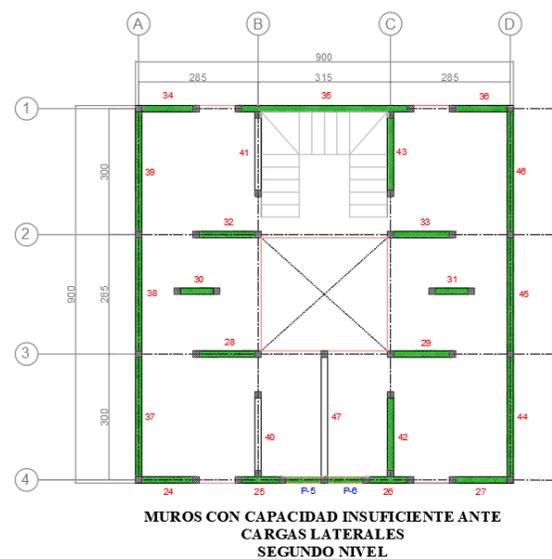
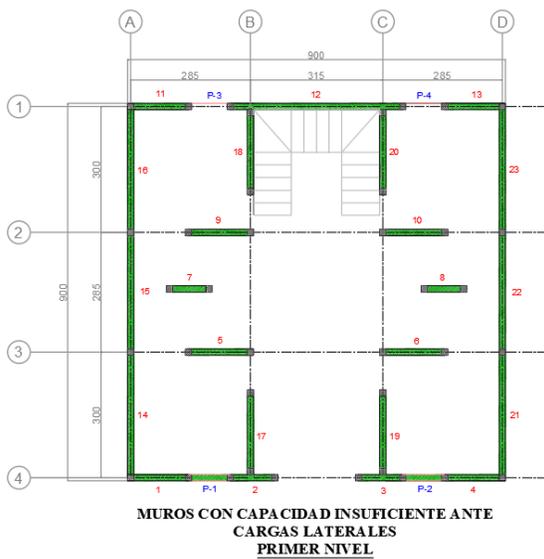
En la figura D25 se muestran los muros en planta que, aún con la reparación de grietas y la adición de castillos, no logran cubrir la demanda de resistencia a carga lateral, incluso para el tercer nivel también existen muros que no cumplen con la condición $D_R/C \leq 1$. Debido a esto, se estudiará el efecto del encamisado de los muros con malla de alambre soldado y mortero en la respuesta de cada muro, que así lo requiera, para resistir las demandas de resistencia a cargas laterales.

Tabla D27. Cociente de demanda de resistencia lateral / capacidad para los muros de la estructura con grietas reparadas y castillos nuevos.

REVISIÓN POR FUERZACORTANTE												
PRIMER NIVEL (PB)												
No. Muro	Dirección	Longitud cm	Altura cm	H/L	# Castillos	AT cm ²	P t	f	V _{mR} t	V _u t	D _R /C	Estado
1	X	114	250	2.19	1	1,596	4.79	1.00	0.67	-2.04	3.05	✗
2		79	250	3.16	1	1,106	3.32	1.00	0.47	-1.53	3.29	✗
3		79	250	3.16	1	1,106	3.32	1.00	0.47	1.54	3.32	✗
4		114	250	2.19	1	1,596	4.79	1.00	0.67	2.06	3.08	✗
5		228	250	1.10	2	3,192	9.58	1.00	1.34	-2.63	1.96	✗
6		228	250	1.10	2	3,192	9.58	1.00	1.34	2.68	2.00	✗
7		138	250	1.81	2	1,932	5.80	1.00	0.81	-1.34	1.65	✗
8		138	250	1.81	2	1,932	5.80	1.00	0.81	1.36	1.68	✗
9		228	250	1.10	2	3,192	9.58	1.00	1.34	-2.16	1.61	✗
10		228	250	1.10	2	3,192	9.58	1.00	1.34	2.19	1.63	✗
11		114	250	2.19	1	1,596	4.79	1.00	0.67	-0.96	1.43	✗
12		388	250	0.64	2	5,432	16.30	1.23	2.80	4.45	1.59	✗
13		114	250	2.19	1	1,596	4.79	1.00	0.67	0.97	1.45	✗
P-1		179	90	0.50	1	2,506	7.52	1.31	1.38	-1.75	1.27	✗
P-2	179	90	0.50	1	2,506	7.52	1.31	1.38	1.76	1.28	✗	
P-3	179	90	0.50	1	2,506	7.52	1.31	1.38	-0.99	0.72	✓	
P-4	179	90	0.50	1	2,506	7.52	1.31	1.38	0.88	0.64	✓	
14	Y	314	250	0.80	1	4,396	13.19	1.13	2.09	-4.88	2.33	✗
15		299	250	0.84	1	4,186	12.56	1.10	1.94	-3.02	1.56	✗
16		314	250	0.80	1	4,396	13.19	1.13	2.09	-4.87	2.33	✗
17		223	250	1.12	2	3,122	9.37	1.00	1.31	-1.83	1.40	✗
18		223	250	1.12	2	3,122	9.37	1.00	1.31	2.48	1.89	✗
19		223	250	1.12	2	3,122	9.37	1.00	1.31	-1.84	1.40	✗
20		223	250	1.12	2	3,122	9.37	1.00	1.31	-2.88	2.20	✗
21		314	250	0.80	1	4,396	13.19	1.13	2.09	-3.03	1.45	✗
22		299	250	0.84	1	4,186	12.56	1.10	1.94	-2.95	1.52	✗
23		314	250	0.80	1	4,396	13.19	1.13	2.09	-3.02	1.45	✗

REVISIÓN POR FUERZACORTANTE												
SEGUNDO NIVEL												
No. Muro	Dirección	Longitud cm	Altura cm	H/L	# Castillos	AT cm ²	P t	f	V _{mR} t	V _u t	D _R /C	Estado
24	X	114	250	2.19	1	1,596	3.19	1.00	0.67	-1.36	2.02	✗
25		79	250	3.16	1	1,106	2.21	1.00	0.47	-1.70	3.66	✗
26		79	250	3.16	1	1,106	2.21	1.00	0.47	1.71	3.69	✗
27		114	250	2.19	1	1,596	3.19	1.00	0.67	1.31	1.95	✗
28		228	250	1.10	2	3,192	6.38	1.00	1.34	-2.32	1.73	✗
29		228	250	1.10	2	3,192	6.38	1.00	1.34	2.31	1.72	✗
30		138	250	1.81	2	1,932	3.86	1.00	0.81	-1.03	1.27	✗
31		138	250	1.81	2	1,932	3.86	1.00	0.81	1.04	1.28	✗
32		228	250	1.10	2	3,192	6.38	1.00	1.34	-1.93	1.44	✗
33		228	250	1.10	2	3,192	6.38	1.00	1.34	1.89	1.41	✗
34		114	250	2.19	1	1,596	3.19	1.00	0.67	-0.76	1.13	✗
35		388	250	0.64	2	5,432	10.86	1.23	2.80	-4.35	1.55	✗
36		114	250	2.19	1	1,596	3.19	1.00	0.67	0.69	1.03	✗
P-5		129	90	0.70	1	1,806	3.61	1.88	1.38	-1.71	1.24	✗
P-6	129	90	0.70	1	1,806	3.61	1.88	1.38	1.75	1.27	✗	
37	Y	314	250	0.80	1	4,396	8.79	1.13	1.38	3.43	2.48	✗
38		299	250	0.84	1	4,186	8.37	1.10	1.38	3.36	2.43	✗
39		314	250	0.80	1	4,396	8.79	1.13	2.09	3.41	1.63	✗
40		223	250	1.12	2	3,122	6.24	1.00	1.94	-1.51	0.78	✓
41		223	250	1.12	2	3,122	6.24	1.00	2.09	1.94	0.93	✓
42		223	250	1.12	2	3,122	6.24	1.00	1.31	-1.35	1.03	✗
43		223	250	1.12	2	3,122	6.24	1.00	1.31	1.61	1.23	✗
44		314	250	0.80	1	4,396	8.79	1.13	1.31	2.74	2.09	✗
45		299	250	0.84	1	4,186	8.37	1.10	1.31	2.67	2.03	✗
46		314	250	0.80	1	4,396	8.79	1.13	2.09	2.72	1.30	✗
47	328	250	0.76	2	4,592	9.18	1.15	1.94	-1.80	0.93	✓	

REVISIÓN POR FUERZACORTANTE													
TERCER NIVEL													
No. Muro	Dirección	Longitud	Altura	H/L	# Castillos	AT	P	f	V _{mR}	V _u	D _{R/C}	Estado	
		cm	cm			cm ²	t		t	t			
48	X	114	250	2.19	1	1,596	1.60	1.00	0.84	-0.82	0.98	✓	
49		79	250	3.16	1	1,106	1.11	1.00	0.58	-1.22	2.10	✗	
50		79	250	3.16	1	1,106	1.11	1.00	0.58	1.22	2.10	✗	
51		114	250	2.19	1	1,596	1.60	1.00	0.84	0.81	0.96	✓	
52		228	250	1.10	2	3,192	3.19	1.00	1.68	-1.15	0.68	✓	
53		228	250	1.10	2	3,192	3.19	1.00	1.68	1.15	0.69	✓	
54		138	250	1.81	2	1,932	1.93	1.00	1.02	-0.46	0.45	✓	
55		138	250	1.81	2	1,932	1.93	1.00	1.02	0.47	0.46	✓	
56		228	250	1.10	2	3,192	3.19	1.00	1.68	-0.94	0.56	✓	
57		228	250	1.10	2	3,192	3.19	1.00	1.68	0.95	0.56	✓	
58		114	250	2.19	1	1,596	1.60	1.00	0.84	-0.55	0.65	✓	
59		388	250	0.64	2	5,432	5.43	1.23	3.50	-3.22	0.92	✓	
60		114	250	2.19	1	1,596	1.60	1.00	0.84	0.50	0.60	✓	
P-7		129	90	0.70	1	1,806	1.81	1.88	1.73	-1.62	0.94	✓	
P-8		129	90	0.70	1	1,806	1.81	1.88	1.73	1.64	0.95	✓	
61		Y	314	250	0.80	1	4,396	4.40	1.13	1.73	2.23	1.29	✗
62			299	250	0.84	1	4,186	4.19	1.10	1.73	2.19	1.27	✗
63			314	250	0.80	1	4,396	4.40	1.13	2.61	2.22	0.85	✓
64			223	250	1.12	2	3,122	3.12	1.00	2.42	-0.72	0.30	✓
65			223	250	1.12	2	3,122	3.12	1.00	2.61	1.25	0.48	✓
66	223		250	1.12	2	3,122	3.12	1.00	1.64	-0.67	0.41	✓	
67	223		250	1.12	2	3,122	3.12	1.00	1.64	1.10	0.67	✓	
68	314		250	0.80	1	4,396	4.40	1.13	1.64	1.82	1.11	✗	
69	299		250	0.84	1	4,186	4.19	1.10	1.64	1.79	1.09	✗	
70	314		250	0.80	1	4,396	4.40	1.13	2.61	1.81	0.69	✓	
71	328		250	0.76	2	4,592	4.59	1.15	2.42	-1.10	0.45	✓	



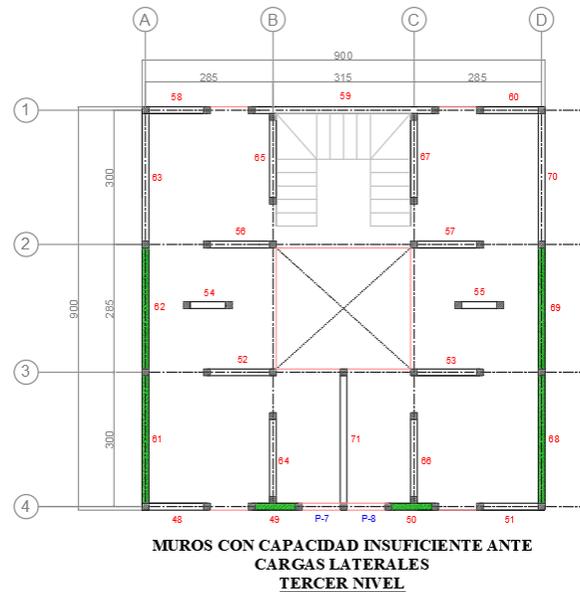


Figura D25. Muros y pretilas con capacidad insuficiente ante cargas laterales con grietas reparadas y castillos nuevos.

DISEÑO DE LA REHABILITACIÓN

A partir del análisis realizado en la sección anterior de este documento, se pudo observar que la adición de castillos y la reparación de grietas no fueron suficientes para cubrir las demandas de resistencia en los muros de la estructura (en la mayoría de ellos), por lo que se optó por proponer su reforzamiento mediante un encamisado con malla de alambre soldado y mortero.

Esta técnica es considerada confiable, eficiente y económica, además de que es aplicable para cualquier condición de daño en los muros. De acuerdo con “Edificaciones de Mampostería” (SMIE, 2019), la eficacia de esta técnica depende de cuatro factores principales:

1) Cuantía del refuerzo de la malla

Esta debe ser suficiente para resistir las solicitaciones sísmicas, en conjunto con el aporte de resistencia de la mampostería (80% de la resistencia calculada, aproximadamente). La contribución de la malla a la resistencia está en función de la cuantía de refuerzo horizontal y un factor de eficiencia que considera que la transmisión de fuerza cortante entre el refuerzo y el muro depende de la calidad de la mampostería.

2) Fijación de la malla

La calidad del sistema de anclaje de la malla con el muro estará en función de la transmisión de fuerza cortante del muro a la malla a través de los conectores. Deben seleccionarse conectores que aporten la suficiente rigidez y resistencia para que las mallas puedan alcanzar deformaciones plásticas.

3) Resistencia y rigidez del recubrimiento

Ya sea con mortero o concreto, una adecuada dosificación y colocación determinarán la calidad final del reforzamiento y darán paso al comportamiento monolítico entre la mampostería, la malla y la capa de recubrimiento.

4) Adecuada continuidad y traslape de la malla

El hecho de anclar la malla no sólo al muro, sino también a los elementos de confinamiento (en este caso, castillos, únicamente), promueve un mecanismo resistente y dúctil cuando el agrietamiento inclinado del muro penetre en los extremos (superiores e inferiores) de los castillos. De igual manera, al asegurar un encamisado continuo en muros transversales favorecerá al desarrollo de un campo resistente de tensión.

Propuesta y desarrollo del análisis

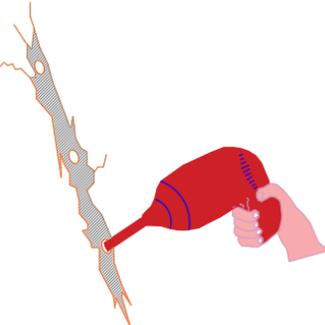
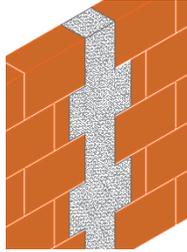
A partir de las fuerzas (demandas) obtenidas en el análisis previamente mostrado para muros con adición de castillos y reparación de grietas, se procedió a determinar la propuesta de muros que serán rehabilitados con malla de alambre soldado y mortero. Es importante considerar que el Proyectista debe establecer un criterio muy claro para determinar cuáles muros deberán ser rehabilitados y cómo se llevará a cabo el proyecto de reforzamiento.

Criterios de análisis

El diseño del encamisado se hará de conformidad con lo establecido en la NTC-Mampostería (2017) e INIFED (2020a).

Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales se determinarán de acuerdo con 6.9.5.1 de INIFED (2020a).

INYECCIÓN DE GRIETAS	
Mortero fluido de cemento sin contracción	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Tipo</u> Mortero a base de cemento hidráulico, aditivos especiales y agregados de granulometría fina, de fácil aplicación, rápido fraguado, impermeable y sin contracción. • <u>Resistencia nominal a la compresión</u> $f_j' = 46 \text{ MPa} \left(460 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$ (Resistencia y características dadas por el fabricante de mortero fluido) 	
CASTILLOS	
Concreto	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Concreto clase 1</u> • <u>Resistencia a la compresión</u> $f_c' = 25 \text{ MPa} \left(250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$ 	

Acero de refuerzo

- Acero longitudinal
No. 3 (3/8 pulg, 9.5 mm)

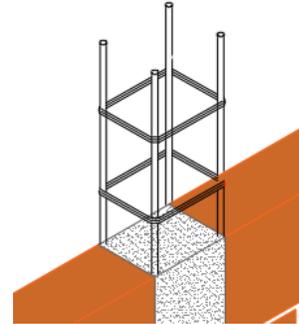
Esfuerzo especificado de fluencia

$$f_y = 420 \text{ MPa} \left(4,200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

- Acero transversal
No. 2 (1/4 pulg, 6.4 mm)

Esfuerzo especificado de fluencia

$$f_y = 210 \text{ MPa} \left(2,100 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$



ENCAMISADO

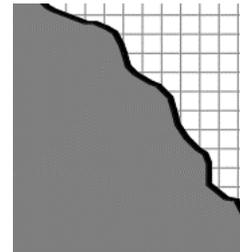
Mortero para recubrimiento

- Mortero tipo I
- Resistencia nominal a la compresión

$$f_j' = 12.5 \text{ MPa} \left(125 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

- Espesor del recubrimiento

$$t_r = 3.00 \text{ cm}$$



Malla de alambre soldado

- Calibre de la malla
La nomenclatura de la malla indica el calibre del alambre y la dimensión de la cuadrícula en pulgadas.

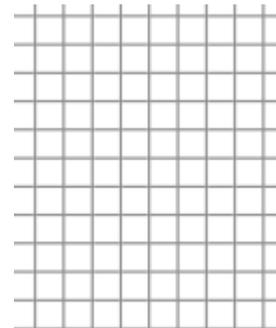
Malla 6x6 – 8/8

6x6 = Separación entre cada alambre longitudinal (6 pulgadas)

8/8 = Calibre de los alambres, siendo el primer número para el alambre transversal y el segundo para el longitudinal.

- Esfuerzo especificado de fluencia

$$f_{yh} = 500 \text{ MPa} \left(5,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$$



Conectores	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Tipo</u> Para este ejemplo se emplearán clavos instalados a través de medios carga explosiva de potencia controlada. • <u>Longitud</u> $L = 50 \text{ mm}$ • <u>Arandela</u> $\phi = 50 \text{ mm}$ 	

Diseño de la malla

El análisis y diseño de la aportación de la malla de alambre soldado a la mampostería se hará de acuerdo con lo indicado en la NTC-Mampostería (2017).

- **Separación máxima del refuerzo horizontal de la malla**

$$s_h = 15 \text{ cm}$$

- **Área del refuerzo horizontal de la malla**

$$A_{sh} = 0.1326 \text{ cm}^2$$

- **Cuantía de refuerzo horizontal de la malla**

$\rho_h = \frac{A_{sh}}{s_h t}$	(NTC-Mampostería. Ec.5.4.6)
---------------------------------	-----------------------------

$$\rho_h = \frac{0.1326 \text{ cm}^2}{(15\text{cm})(14\text{cm})} = 0.000631$$

- **Revisión de la cuantía mínima del refuerzo horizontal de la malla**

$\rho_h f_y \geq 3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	(NTC-Mampostería. Ec.6.1.1)
---	-----------------------------

$$(0.000631) \left(5,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 3.16 > 3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}, \text{ por lo tanto, se cumple con la cuantía mínima}$$

- **Factor de reducción de la resistencia a fuerza cortante normalizada por unidad**

$$\alpha = 0.045 \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)^{-1}$$

- **Factor de reducción de la resistencia a cortante**

$$k_1 = 1 - \alpha \rho_h f_{yh} \quad (\text{NTC-Mampostería. Ec.5.4.8})$$

$$k_1 = 1 - \left(0.045 \left(\frac{kg}{cm^2}\right)^{-1}\right) (0.000631) \left(5,000 \frac{kg}{cm^2}\right) = 0.86$$

Sin embargo, en la norma se menciona que el factor k_1 no debe ser menor que la siguiente expresión:

$$k_1 \geq (1 - 0.1 f_{an} f_m' \alpha)$$

$$k_1 \geq \left(1 - 0.1(1) \left(20 \frac{kg}{cm^2}\right) \left(0.045 \frac{kg}{cm^2}\right)^{-1}\right) = 0.91$$

0.86 < 0.91 por lo tanto, no se cumple esta condición, y para el cálculo se utiliza el valor más alto (0.91)

- **Factor de eficiencia del refuerzo horizontal (muro en compresión)**

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R \rho_h f_{yh} A_T} (k_0 - 1) + \eta_s \quad (\text{NTC-Mampostería. Ec.5.4.5})$$

$$\eta_s = 0.55, \text{ por tener una } f_m' < 60 \frac{kg}{cm^2}$$

$$k_0 = \begin{cases} 1.3 & \text{si } \frac{H}{L} \leq 1.0 \\ 1.0 & \text{si } \frac{H}{L} \geq 1.5 \end{cases} \quad (\text{o interpolación}) \quad (\text{NTC-Mampostería. Ec.5.4.7})$$

- **Fuerza cortante resistida por el refuerzo horizontal de la malla**

$$V_{sR} = F_R \eta \rho_h f_{yh} A_T \quad (\text{NTC-Mampostería. Ec.5.4.7})$$

$$F_R = 0.7$$

- **Fuerza cortante total resistida en el muro (mampostería con castillos y grietas reparadas + malla)**

$$V_R = V_{mR} + V_{sR} \quad (\text{NTC-Mampostería. Ec.6.4.1})$$

En la tabla D28 se incluye la resistencia a fuerza cortante de cada muro de los tres niveles del edificio Roma Sur, considerando la contribución del encamisado con malla de alambre soldado recubierto con mortero. En la tabla se presenta, con el símbolo \checkmark a aquellos muros para los que el cociente D_R/C es menor que 1, es decir, que el muro resiste adecuadamente la carga lateral (ya sea con o sin malla de alambre soldado). Mientras que con el símbolo \times se indica que el cociente D_R/C es mayor que 1, por lo que el muro no cuenta con la capacidad de carga suficiente para resistir ante las cargas laterales.

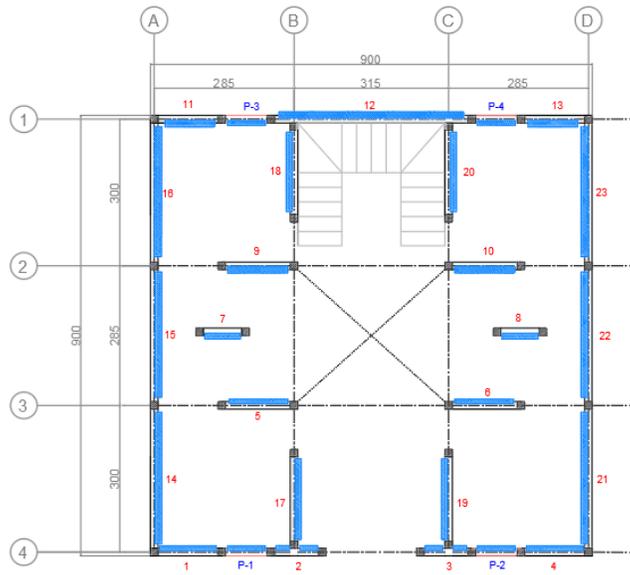
En la figura D26 se indican los muros que se deben rehabilitar con encamisado con malla de alambre soldado recubierto con mortero. En el primer nivel se optó por rehabilitar los pretiles P-3 y P-4, para asegurar la continuidad del encamisado de los muros adyacentes a estos, a pesar de haber mostrado una recuperación de resistencia a carga lateral después de haber reparado sus grietas. Para el segundo nivel se decidió rehabilitar los muros 40 y 41 con malla de alambre soldado, esto para mantener la simetría en la distribución de muros encamisados en este nivel.

Tabla D388. Cortante resistente en cada muro del edificio Roma Sur considerando un encamisado con malla 6x6-8/8.

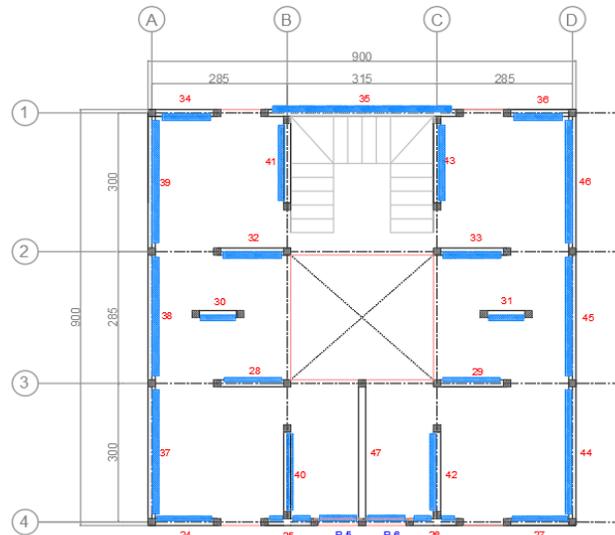
PRIMER NIVEL (PB)														
CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS			ESTRUCTURA SIN MALLA					ESTRUCTURA REHABILITADA						
No. Muro	Dirección	H/L	AT cm ²	V _{mR} t	V _u t	D _{R/C}	Estado	k _o	η	# Caras	V _{sR} t	V _R t	D _{R/C}	Estado
1	X	2.19	1,596	0.67	-2.04	3.05	✗	1	0.5	1	1.76	2.43	0.84	✓
2		3.16	1,106	0.47	-1.53	3.29	✗	1	0.5	1	1.22	1.69	0.91	✓
3		3.16	1,106	0.47	1.54	3.32	✗	1	0.5	1	1.22	1.69	0.91	✓
4		2.19	1,596	0.67	2.06	3.08	✗	1	0.5	1	1.76	2.43	0.85	✓
5		1.10	3,192	1.34	-2.63	1.96	✗	1.33	0.5	1	3.53	4.87	0.54	✓
6		1.10	3,192	1.34	2.68	2.00	✗	1.33	0.5	1	3.53	4.87	0.55	✓
7		1.81	1,932	0.81	-1.34	1.65	✗	1	0.5	1	2.13	2.95	0.45	✓
8		1.81	1,932	0.81	1.36	1.68	✗	1	0.5	1	2.13	2.95	0.46	✓
9		1.10	3,192	1.34	-2.16	1.61	✗	1.33	0.5	1	3.53	4.87	0.44	✓
10		1.10	3,192	1.34	2.19	1.63	✗	1.33	0.5	1	3.53	4.87	0.45	✓
11		2.19	1,596	0.67	-0.96	1.43	✗	1	0.5	1	1.76	2.43	0.39	✓
12		0.64	5,432	2.80	4.45	1.59	✗	1.3	0.5	1	6.00	8.80	0.51	✓
13		2.19	1,596	0.67	0.97	1.45	✗	1	0.5	1	1.76	2.43	0.40	✓
P-1		0.50	2,506	1.38	-1.75	1.27	✗	1.3	0.5	1	2.77	4.15	0.42	✓
P-2	0.50	2,506	1.38	1.76	1.28	✗	1.3	0.5	1	2.77	4.15	0.43	✓	
P-3	0.50	2,506	1.38	-0.99	0.72	✓	1.3	0.5	1	2.77	4.15	0.24	✓	
P-4	0.50	2,506	1.38	0.88	0.64	✓	1.3	0.5	1	2.77	4.15	0.21	✓	
14	Y	0.80	4,396	2.09	-4.88	2.33	✗	1.3	0.5	1	4.86	6.95	0.70	✓
15		0.84	4,186	1.94	-3.02	1.56	✗	1.3	0.5	1	4.63	6.56	0.46	✓
16		0.80	4,396	2.09	-4.87	2.33	✗	1.3	0.5	1	4.86	6.95	0.70	✓
17		1.12	3,122	1.31	-1.83	1.40	✗	1.3	0.5	1	3.45	4.76	0.39	✓
18		1.12	3,122	1.31	2.48	1.89	✗	1.3	0.5	1	3.45	4.76	0.52	✓
19		1.12	3,122	1.31	-1.84	1.40	✗	1.3	0.5	1	3.45	4.76	0.39	✓
20		1.12	3,122	1.31	-2.88	2.20	✗	1.3	0.5	1	3.45	4.76	0.61	✓
21		0.80	4,396	2.09	-3.03	1.45	✗	1.3	0.5	1	4.86	6.95	0.44	✓
22		0.84	4,186	1.94	-2.95	1.52	✗	1.3	0.5	1	4.63	6.56	0.45	✓
23		0.80	4,396	2.09	-3.02	1.45	✗	1.3	0.5	1	4.86	6.95	0.43	✓

SEGUNDO NIVEL														
CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS			ESTRUCTURA SIN MALLA					ESTRUCTURA REHABILITADA						
No. Muro	Dirección	H/L	AT cm ²	V _{mR} t	V _u t	D _{R/C}	Estado	k _o	η	# Caras	V _{sR} t	V _R t	D _{R/C}	Estado
24	X	2.19	1,596	0.67	-1.36	2.02	✗	1	0.50	1	1.76	2.43	0.56	✓
25		3.16	1,106	0.47	-1.70	3.66	✗	1	0.50	1	1.25	1.72	0.99	✓
26		3.16	1,106	0.47	1.71	3.69	✗	1	0.50	1	1.26	1.73	0.99	✓
27		2.19	1,596	0.67	1.31	1.95	✗	1	0.50	1	1.76	2.43	0.54	✓
28		1.10	3,192	1.34	-2.32	1.73	✗	1.33	0.50	1	3.53	4.87	0.48	✓
29		1.10	3,192	1.34	2.31	1.72	✗	1.33	0.50	1	3.53	4.87	0.48	✓
30		1.81	1,932	0.81	-1.03	1.27	✗	1	0.50	1	2.13	2.95	0.35	✓
31		1.81	1,932	0.81	1.04	1.28	✗	1	0.50	1	2.13	2.95	0.35	✓
32		1.10	3,192	1.34	-1.93	1.44	✗	1.33	0.50	1	3.53	4.87	0.40	✓
33		1.10	3,192	1.34	1.89	1.41	✗	1.33	0.50	1	3.53	4.87	0.39	✓
34		2.19	1,596	0.67	-0.76	1.13	✗	1	0.50	1	1.76	2.43	0.31	✓
35		0.64	5,432	2.80	-4.35	1.55	✗	1.3	0.50	1	6.00	8.80	0.49	✓
36		2.19	1,596	0.67	0.69	1.03	✗	1	0.50	1	1.76	2.43	0.28	✓
P-5		0.70	1,806	1.38	-1.71	1.24	✗	1.3	0.50	1	2.00	3.38	0.51	✓
P-6	0.70	1,806	1.38	1.75	1.27	✗	1.3	0.50	1	2.00	3.38	0.52	✓	
37	Y	0.80	4,396	1.38	3.43	2.48	✗	1.3	0.50	1	4.86	6.24	0.55	✓
38		0.84	4,186	1.38	3.36	2.43	✗	1.3	0.50	1	4.63	6.01	0.56	✓
39		0.80	4,396	2.09	3.41	1.63	✗	1.3	0.50	1	4.86	6.95	0.49	✓
40		1.12	3,122	1.94	-1.51	0.78	✓	1.3	0.50	1	3.45	5.39	0.28	✓
41		1.12	3,122	2.09	1.94	0.93	✓	1.3	0.50	1	3.45	5.54	0.35	✓
42		1.12	3,122	1.31	-1.35	1.03	✗	1.3	0.50	1	3.45	4.76	0.28	✓
43		1.12	3,122	1.31	1.61	1.23	✗	1.3	0.50	1	3.45	4.76	0.34	✓
44		0.80	4,396	1.31	2.74	2.09	✗	1.3	0.50	1	4.86	6.17	0.44	✓
45		0.84	4,186	1.31	2.67	2.03	✗	1.3	0.50	1	4.63	5.94	0.45	✓
46		0.80	4,396	2.09	2.72	1.30	✗	1.3	0.50	1	4.86	6.95	0.39	✓
47	0.76	4,592	1.94	-1.80	0.93	✓	1.3	0.50	0	0.00	1.94	0.93	✓	

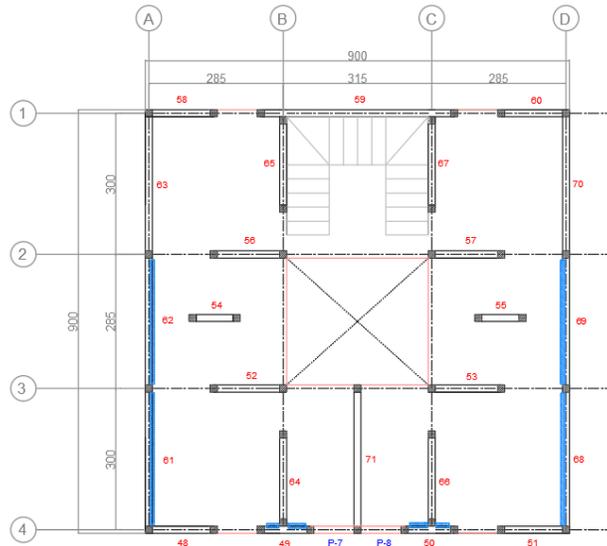
TERCER NIVEL															
CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS			ESTRUCTURA SIN MALLA					ESTRUCTURA REHABILITADA							
No. Muro	Dirección	H/L	AT	V_{mR}	V_u	D_R/C	Estado	k_o	η	# Caras	V_{sR}	V_R	D_R/C	Estado	
			cm ²	t	t						t	t			t
48	X	2.19	3,248	0.84	-0.82	0.98	✓	1	0.50	0	0.00	0.84	0.98	✓	
49		3.16	2,758	0.58	-1.22	2.10	✗	1	0.50	1	3.05	3.63	0.34	✓	
50		3.16	2,758	0.58	1.22	2.10	✗	1	0.50	1	3.05	3.63	0.34	✓	
51		2.19	3,248	0.84	0.81	0.96	✓	1	0.50	0	0.00	0.84	0.96	✓	
52		1.10	6,496	1.68	-1.15	0.68	✓	1.33	0.50	0	0.00	1.68	0.68	✓	
53		1.10	6,496	1.68	1.15	0.69	✓	1.33	0.50	0	0.00	1.68	0.69	✓	
54		1.81	5,236	1.02	-0.46	0.45	✓	1	0.50	0	0.00	1.02	0.45	✓	
55		1.81	5,236	1.02	0.47	0.46	✓	1	0.50	0	0.00	1.02	0.46	✓	
56		1.10	6,496	1.68	-0.94	0.56	✓	1.33	0.50	0	0.00	1.68	0.56	✓	
57		1.10	6,496	1.68	0.95	0.56	✓	1.33	0.50	0	0.00	1.68	0.56	✓	
58		2.19	3,248	0.84	-0.55	0.65	✓	1	0.50	0	0.00	0.84	0.65	✓	
59		0.64	8,736	3.50	-3.22	0.92	✓	1.3	0.50	0	0.00	3.50	0.92	✓	
60		2.19	3,248	0.84	0.50	0.60	✓	1	0.50	0	0.00	0.84	0.60	✓	
P-7		0.70	3,458	1.73	-1.62	0.94	✓	1.3	0.50	0	0.00	1.73	0.94	✓	
P-8		0.70	3,458	1.73	1.64	0.95	✓	1.3	0.50	0	0.00	1.73	0.95	✓	
61		Y	0.80	6,048	1.73	2.23	1.29	✗	1.3	0.50	1	6.68	8.41	0.27	✓
62			0.84	5,838	1.73	2.19	1.27	✗	1.3	0.50	1	6.45	8.18	0.27	✓
63			0.80	6,048	2.61	2.22	0.85	✓	1.3	0.50	0	0.00	2.61	0.85	✓
64			1.12	6,426	2.42	-0.72	0.30	✓	1.3	0.50	0	0.00	2.42	0.30	✓
65			1.12	6,426	2.61	1.25	0.48	✓	1.3	0.50	0	0.00	2.61	0.48	✓
66	1.12		6,426	1.64	-0.67	0.41	✓	1.3	0.50	0	0.00	1.64	0.41	✓	
67	1.12		6,426	1.64	1.10	0.67	✓	1.3	0.50	0	0.00	1.64	0.67	✓	
68	0.80		6,048	1.64	1.82	1.11	✗	1.3	0.50	1	6.68	8.32	0.22	✓	
69	0.84		5,838	1.64	1.79	1.09	✗	1.3	0.50	1	6.45	8.09	0.22	✓	
70	0.80		6,048	2.61	1.81	0.69	✓	1.3	0.50	0	0.00	2.61	0.69	✓	
71	0.76		7,896	2.42	-1.10	0.45	✓	1.3	0.50	0	0.00	2.42	0.45	✓	



MUROS REHABILITADOS CON MALLA
PRIMER NIVEL



**MUROS REHABILITADOS CON MALLA
SEGUNDO NIVEL**



**MUROS REHABILITADOS CON MALLA
TERCER NIVEL**

Figura D26. Distribución de muros encamisados con malla de alambre soldado y mortero en el edificio Roma Sur.

DETALLADO DE LA REHABILITACIÓN

El adecuado detallado de una rehabilitación es muy importante en el resultado final del proyecto. Un correcto detallado y estudio de todas las variables que intervienen en el proceso de rehabilitación determinarán, en gran parte, la calidad y eficiencia de las técnicas empleadas. Ello se traducirá en el cumplimiento del objetivo principal de la rehabilitación o reforzamiento de una estructura que es, principalmente, brindar seguridad a los usuarios.

En los siguientes puntos de esta sección se abordará el detallado correspondiente a cada estrategia seleccionada para el proyecto de rehabilitación del edificio Roma Sur. El detallado deberá considerar siempre la normatividad vigente en la localidad donde se desarrolle el proyecto.

Diseño de los castillos

El detallado de los castillos se realizará de conformidad con lo sugerido en el capítulo 5 de la NTC-Mampostería (2017).

Sección propuesta

Por simplicidad en su construcción, se propuso una sección cuadrada, cuyas dimensiones tengan el mismo espesor que los muros de mampostería.

$$\begin{aligned} b_c &= 14 \text{ cm} \\ h_c &= 14 \text{ cm} \\ A_c &= 196 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Refuerzo longitudinal

- **Área total de acero de refuerzo longitudinal**

El refuerzo longitudinal propuesto estará anclado con la cimentación, así como con las losas de cada entrepiso, de manera que pueda desarrollarse el esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo.

$$A_s = 0.2 \frac{f'_c}{f_y} b_c h_c \quad \text{(NTC-Mampostería. Ec.5.1.1)}$$

$$A_s = 0.2 \frac{250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{4,200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} (14 \text{ cm})(14 \text{ cm}) = 2.33 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto, para cumplir con el área de acero longitudinal requerida, se propone lo siguiente:

$$4 \text{ barras del no. 3} = 2.850 \text{ cm}^2$$

Refuerzo transversal

El refuerzo transversal de los castillos estará conformado por estribos cerrados, con remate a 135 grados.

- Separación máxima entre refuerzo transversal

$$\begin{aligned} s &= 1.5t \\ s &= 1.5 (14 \text{ cm}) = 21 \text{ cm} \end{aligned}$$

- Área de acero requerida para el refuerzo transversal (contemplando dos ramas de estribos rectangulares).

$$A_{sc} = \frac{1,000 s}{f_y h_c} \quad \text{(NTC-Mampostería. Ec.5.1.2)}$$

$$A_{sc} = \frac{1,000 (21 \text{ cm})}{2,100 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} (14 \text{ cm})} = 0.71 \text{ cm}^2$$

Para cumplir con los requisitos de refuerzo transversal establecidos en la NTC-Mampostería (2017), se propone lo siguiente:

Estribos del no. 2, cerrados con remates a 135 grados

En la figura D27 se muestra la propuesta de armado longitudinal y transversal para los castillos del edificio Roma Sur.

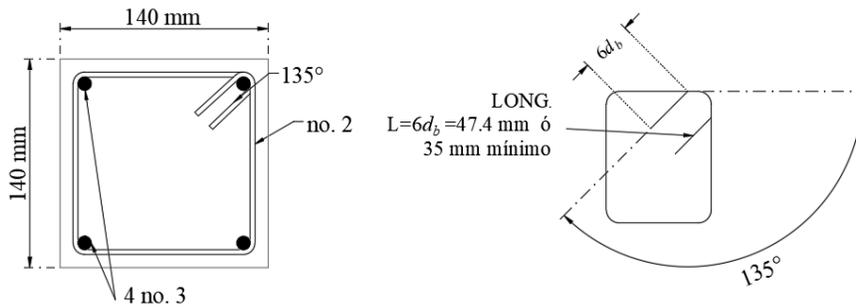


Figura D114 Detalle de armado longitudinal y transversal de castillos para el edificio Roma Sur.

Longitud de desarrollo

Dado que la cimentación es a base de zapatas corridas, la profundidad (altura) de la caja de armado será al menos igual a la longitud de desarrollo de las barras del refuerzo longitudinal de los castillos con doblez a 90 grados. A partir de la ecuación 6.1.2 de la NTC-Concreto (2017):

- Longitud de desarrollo básica en barras rectas

$$L_{db} = \frac{a_s f_y}{3(c+K_{tr})\sqrt{f'_c}} \geq 0.11 \frac{d_b f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (\text{NTC-Concreto. Ec.6.1.1})$$

$$L_{db} = \frac{(0.71 \text{ cm}^2) \left(4,200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)}{3(1.5 \text{ cm} + 0) \sqrt{250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}} \geq 0.11 \frac{(0.95 \text{ cm}) \left(4,200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)}{\sqrt{250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}}$$

$$41.91 \text{ cm} > 27.75 \text{ cm} \therefore L_{db} = 41.91 \text{ cm}$$

- Longitud de desarrollo básica en barras con dobleces

$$L_{dh} = 0.076 d_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (\text{NTC-Concreto. Ec.6.1.2})$$

$$L_{dh} = 0.076 (0.96 \text{ cm}) \frac{4,200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}} = 19.38 \text{ cm} \approx 20 \text{ cm}$$

De acuerdo con la tabla 6.1.2 de la NTC-Concreto (2017), los factores que modifican la longitud básica de desarrollo de las barras con dobleces, para este caso, son iguales a 1.0.

Longitud de traslape

De acuerdo con la NTC-Concreto (2017), la longitud de traslape para las barras de los castillos se calculará como se muestra a continuación:

$$\text{La longitud de traslape no será menor que: } \begin{cases} 1.33L_{db} \\ (0.01f_y - 6) d_b \end{cases} \quad (\text{NTC-Concreto. 6.6.1.2})$$

$$L_{dt} = 1.33 (41.91 \text{ cm}) = 55.74 \text{ cm}$$

$$L_{dt} = \left(0.01 \left(4,200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) - 6 \right) 0.95 \text{ cm} = 34.2 \text{ cm}$$

En la figura D28 se muestra la vista en elevación del detallado de anclaje de castillos con la cimentación.

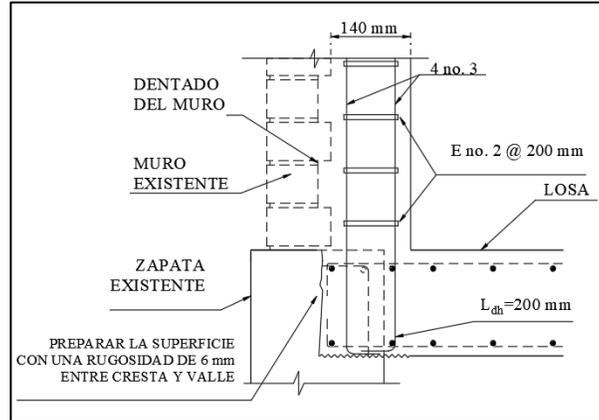


Figura D28. Desplante de muros y nuevos castillos para el edificio Roma Sur.

Dentado del muro

Los extremos de los muros que serán confinados con castillos de concreto reforzado deberán seguir un patrón en “zigzag” denominado “dentado”. Es importante que los muros queden “dentados” para permitir el comportamiento monolítico entre los muros de mampostería y los castillos. Se sugiere que el dentado tenga entre 50 a 70 mm, además de dejar 35 mm entre el último tabique del dentado y el refuerzo longitudinal, para permitir que el concreto cubra las barras correctamente. Además de lograr que el acero transfiera los esfuerzos de adherencia al concreto, una adecuada colocación de concreto permitirá proteger a las barras de la corrosión. En la figura D29 se muestra la vista en elevación de la propuesta de dentado para los muros del edificio Roma Sur.

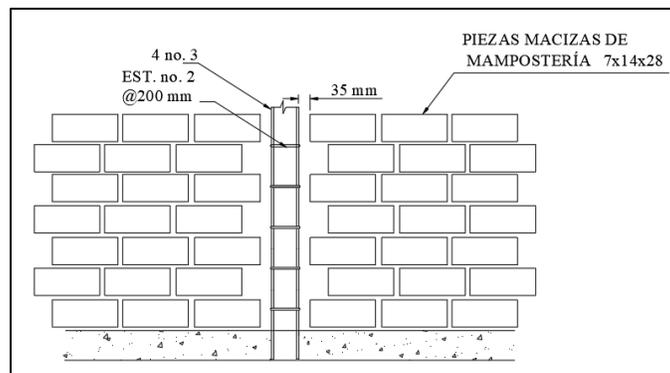


Figura D29. Detalle de dentado en muros de mampostería con nuevos castillos

Detallado del encamisado

El detallado del encamisado se hará de conformidad con lo estipulado en la NTC-M (2017) e INIFED (2020a).

Anclaje de la malla

Como se mencionó en la sección de materiales, el anclaje de la malla al muro se realizará mediante clavos de 50 mm con arandela de 36 mm de diámetro, colocados mediante un dispositivo de impacto de potencia controlados en tresbolillo a cada 450 mm. Se aceptará considerar anclar la malla a los elementos de confinamiento, que en este caso son la losa de concreto y los nuevos castillos, mediante grapas hechas con barras del no. 2 y colocadas a una separación de 450 mm en las losas y de 250 mm en el caso de los castillos, como se muestra en las figuras D30 a D32.

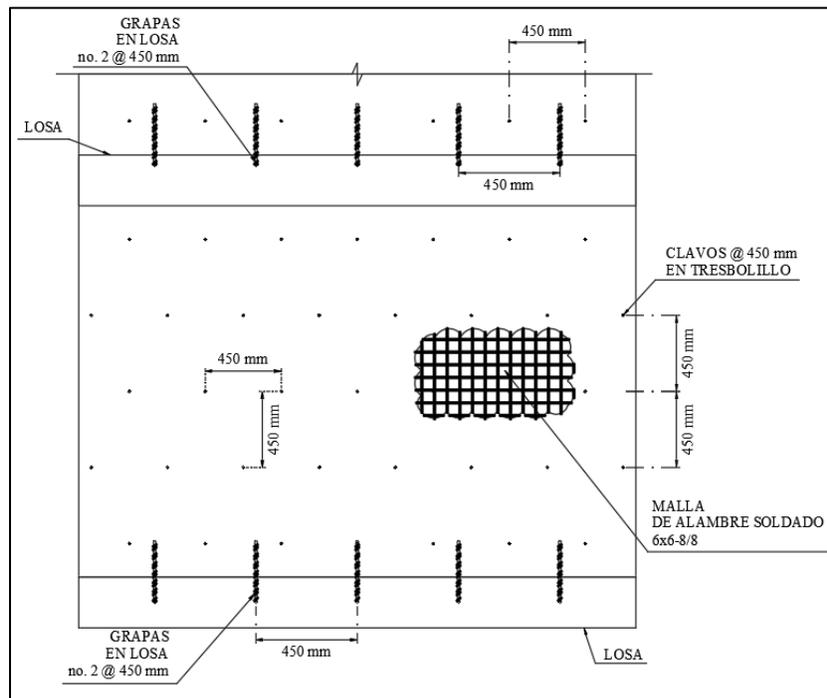


Figura D30. Distribución de anclaje en muros encamisados del edificio Roma Sur.

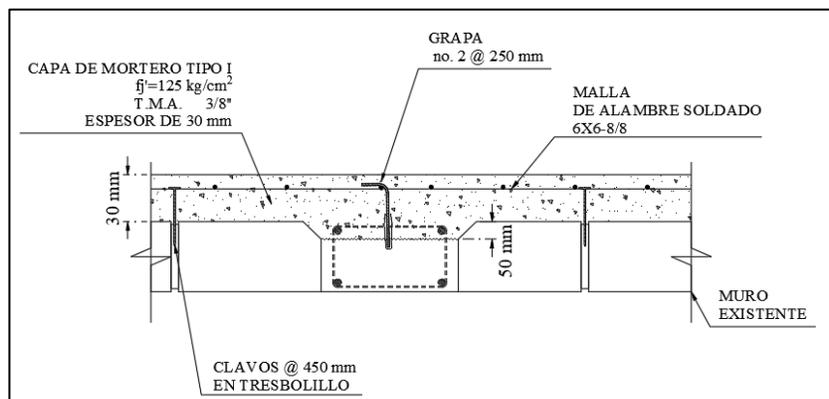


Figura D31. Anclaje de la malla de alambre soldado a los nuevos castillos del edificio Roma Sur.

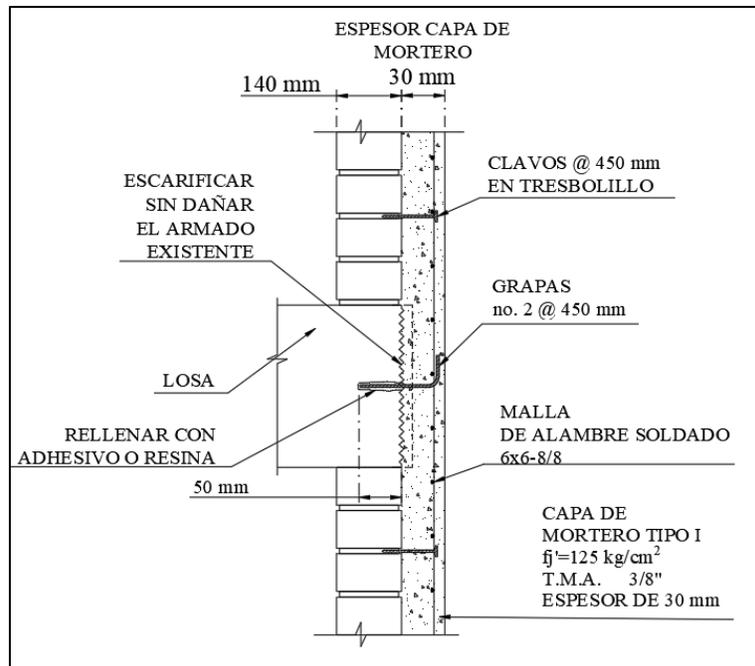


Figura D115 Anclaje de malla de alambre soldado a las losas del edificio Roma Sur.

Traslapes y dobleces de la malla

La malla deberá colocarse de tal manera que rodee ambos bordes verticales de cada muro. La malla deberá cubrir los castillos, deberá extenderse y rodear los bordes de ventanas o aberturas de la estructura. Para el caso del edificio Roma Sur, deberán cubrirse puertas, ventanas y también los pretilas (los cuales por sí mismos llevarán también una capa de compresión con mortero).

Dado que el encamisado, para este ejemplo, se llevará a cabo únicamente por una cara de cada muro, la porción de malla que rodea los bordes libres de los muros deberá extenderse al menos dos veces la separación entre alambres horizontales. La malla deberá ser continua en muros transversales y deberá evitarse que ésta sea cortada o seccionada. En caso de que sea necesario realizar traslapes de malla, éstos deberán ser colocados a una distancia al menos igual a cuatro veces la separación entre alambres verticales.

Por cuestión de simplicidad, la malla no se ahogará en los castillos, ya que esto, a pesar de resultar ser muy eficiente estructuralmente para asegurar el comportamiento monolítico, puede resultar muy complicado durante la construcción y se corre el riesgo de no hacerlo correctamente.

ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN

A continuación, se enuncian las especificaciones y aspectos importantes a tomar en cuenta durante el proceso de construcción; estas especificaciones se basan en lo descrito en INIFED (2020 a).

Reparación de grietas

Preparación del muro

- a) Antes de comenzar a inyectar grietas o reemplazar piezas, es necesario tratar la superficie, ya que esto permitirá asegurar el comportamiento monolítico del encamisado. Deben

retirarse los acabados y revestimientos del muro en su totalidad, para posteriormente preparar la superficie de mampostería mediante un martelinado suave, con el fin de lograr una rugosidad de 3 mm (1/8 pulg).

- b) Deberán retirarse los fragmentos y piezas sueltas de la superficie de los muros y se limpiará el polvo y las partículas en el interior de grietas mediante un chorro de agua limpia.

Inyección con lechada y/o mortero de cemento (grout) por gravedad

Se propone reparar las grietas con un mortero fluido sin contracción mediante gravedad, para ello, se seguirán los siguientes puntos:

- a) Para llevar a cabo la inyección, deberá barrenarse el muro (con cuidado de no comprometer las piezas de mampostería) a lo largo de la grieta o grietas, para colocar las boquillas de inyección. Estas boquillas deberán tener una separación de 70 mm entre sí.
- b) Los barrenos serán de 3/8 pulg (9.5mm), y una profundidad de 50 mm. Se recomienda usar un sellador de silicón para fijar y sellar las boquillas al muro. Si las grietas son de mayor anchura, se pueden usar boquillas de superficie (con bases metálicas que se adhieren al muro) y un tubo perpendicular que se conecta a la manguera de inyección.
- c) En agrietamientos por corte con forma de escalera se recomienda colocar boquillas a la mitad de la altura de las juntas verticales (ya que es menos probable la presencia de finos o partículas que bloqueen el flujo del mortero).
- d) Posterior al barrenado, se limpiará la grieta del polvo y material flojo o suelto mediante un chorro de agua limpia.
- e) Las grietas deberán sellarse con algún material de fraguado rápido y capaz de resistir la presión de inyección, se recomienda el uso de una pasta de vinilo.
- f) Posteriormente se retirarán las partículas de la grieta con agua a presión (1 kg/cm²), empezando desde la parte más alta y deberá dejarse que el agua fluya hasta salir de las boquillas sin partículas. Con este proceso logrará saturarse el muro de modo que se pueda retrasar o evitar el fraguado prematuro de la lechada. Es conveniente realizar esta práctica 24 horas antes de la inyección, y 30 minutos antes aplicar también un ligero flujo de agua.
- g) La inyección se hará por gravedad, o si se requiere, a presiones de 0.5 a 1 kg/cm² (de acuerdo con lo comunicado por el fabricante del mortero), aunque la presión también dependerá del nivel de daño en el muro y la calidad de la mampostería, por lo que para este ejemplo se utilizará la presión más baja posible.
- h) La inyección se hará de abajo hacia arriba, una vez que el mortero salga por la boquilla inmediata superior se sugiere mantener la inyección por 30 segundos adicionales para asegurar la compactación de la lechada.
- i) Para inyectar se usará un dispositivo a presión que posea un regulador y un manómetro para verificar y mantener la presión de la inyección seleccionada.
- j) Para lograr un curado adecuado se retirará el sellador de grietas cuando menos 24 horas después de la inyección.

Rajueleo

- a) La técnica de “rajueleo” deberá llevarse a cabo para grietas con anchos superiores a 10 mm. Las rajuelas son piezas de mampostería (se buscará que sea una mampostería lo más similar posible a la del muro) que se insertarán en las grietas con la finalidad de completar las piezas fragmentadas.
- b) Las rajuelas deberán acunarse debidamente y pegarse con mortero tipo I (125 kg/cm²).
- c) Antes de colocar el mortero, deberán limpiarse y humedecerse las superficies que estarán en contacto con él.

- d) Se recomienda el uso de algún aditivo estabilizar de volumen en el mortero, de modo que puedan controlarse los cambios volumétricos y la contracción por fraguado que pueda sufrir.

Adición de castillos de concreto

Elaboración de mezcla

- a) El concreto para los castillos será clase 1, con peso volumétrico en estado fresco mayor que 2 t/m^3 .
- b) El concreto se fabricará en obra con agregados gruesos con peso específico superior a 2.6 t/m^3 . El tamaño máximo del agregado TMA será de $3/8$ pulg (9.5 mm).
- c) El concreto tendrá una resistencia de diseño a la compresión de $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$ con un revenimiento nominal máximo de 15 cm .

Armado

- a) El armado longitudinal de los castillos constará de 4 barras corrugadas del no.3 con un esfuerzo especificado de fluencia $f_y=420 \text{ MPa}$ (4200 kg/cm^2).
- b) El refuerzo longitudinal será continuo en el primer nivel y se anclará con los elementos de confinamiento superiores (losas) o inferiores (losa o cimentación). Para el caso de la cimentación, el refuerzo de los castillos se extenderá hasta 200 mm en las zapatas corridas para asegurar la conexión. El refuerzo longitudinal se doblará en sus extremos en gancho, y el tramo recto después del doblez será igual a 120 mm .
- c) Todos los estribos serán cerrados, de una pieza, hechos con barras del no. 2 y deberán rematarse en una esquina con dobleces de 135 grados con la finalidad de evitar que los estribos se abran. Los estribos deberán colocarse a cada 200 mm a lo largo de los castillos.
- d) La longitud mínima de traslape en barras longitudinales será de 55 cm .
- e) El recubrimiento libre del refuerzo longitudinal no será menos que su diámetro ni menor que 15 mm .

Colado

- a) Para el colado de los castillos se hará un dentado previo de entre 50 y 70 mm en los tabiques adyacentes a los castillos. Además, se procurará dejar una separación de 35 mm entre el tabique y el armado para permitir el colado de los castillos.
- b) Se sugiere la apertura de ventanas de colado en las losas inmediatas superiores, para facilitar la colocación de concreto en los castillos. Se sugiere que el colado se haga por mitades de altura de castillos. La primera mitad colada incluye el anclaje del castillo en la cimentación, la segunda mitad se cuela desde la losa perforada.
- c) El concreto deberá curarse de manera continua durante al menos 7 días posteriores al colado.

Encamisado de muros de mampostería

Colocación del refuerzo

- a) Previo a la colocación de la malla, es indispensable que la superficie de los muros se encuentre limpia, las grietas se encuentren reparadas, y las piezas que así lo hayan requerido, se hayan sustituido y pegado de manera adecuada.

- b) Una vez que la superficie del muro se encuentre limpia, se fijará la malla calibre 6x6-8/8 directamente sobre la mampostería. Es importante que no se utilicen separadores (silletas, corcholatas o alguna otra clase de elemento que separe a la malla del muro).
- c) Para la fijación de la malla a la mampostería se utilizarán clavos de 50 mm de longitud con arandela que serán fijados con una pistola de impacto controlado. La colocación de estos conectores se hará en tresbolillo y tendrán una separación vertical y horizontal de 450 mm.
- d) La malla se fijará a la losa mediante alcayatas o grapas hechas con barras del no. 2 y se colocarán a 450 mm a lo largo de la losa que confina a cada muro.
- e) Adicionalmente, la malla se fijará en los castillos, mediante alcayatas (grapas) hechas con barras del no. 2 a una separación de 250 mm entre fijadores. Las mallas deberán rodear a los castillos.
- f) En muros ortogonales las mallas serán continuas. Se aceptará traslapar la malla de los muros con malla 6x6-10/10. Las mallas también deberán rodear los bordes de las ventanas.

Colocación de mortero

- a) Antes de aplicar el recubrimiento de mortero, es necesario saturar la superficie del muro con agua limpia.
- b) El mortero para el recubrimiento será tipo I con una resistencia de diseño a la compresión $f'_j=125$ kg/cm². Se recomienda que la arena utilizada para el mortero no contenga demasiados finos. Deberá usarse arena bien graduada para cumplir con la norma NMX-C-111-ONNCCE.
- c) El espesor del recubrimiento de mortero será de 30 mm.
- d) El encamisado deberá curarse por al menos 7 días posteriores al colado para evitar sangrado de la mezcla o el agrietamiento.
- e) Es recomendable la impermeabilización del encamisado.

RECOMENDACIONES PARA SUPERVISIÓN

Deberá siempre de tenerse cuidado en las etapas previas y posteriores, así como durante la construcción. El aseguramiento de la calidad es muy importante para lograr los resultados esperados obtenidos a través de los modelos analíticos de la rehabilitación. Se recomienda al supervisor revisar el capítulo 9 de INIFED (2020a) relativo a la supervisión de estructuras rehabilitadas.

En la mayoría de las ocasiones, el descuido y los “errores” de supervisión cometidos durante la obra pueden comprometer la calidad final de la rehabilitación, por lo que se recomienda, al supervisor de la obra tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Se debe verificar que los materiales seleccionados para el encamisado cumplan con las especificaciones establecidas en los planos y en las memorias de cálculo.
- El mortero no deberá fabricarse en contacto con el suelo.
- La dosificación del mortero deberá controlarse para obtener la resistencia de diseño.
- Habrá de verificarse la correcta instalación de los conectores en la mampostería y el concreto, así como la adecuada cuantía y separación establecida en planos.
- Deberá verificarse la continuidad de las mallas, así como la adecuada colocación de traslapes.
- Saturar en agua limpia la superficie del muro y de los elementos de confinamiento.
- El mortero deberá colocarse en un tiempo menor o igual a dos horas posteriores a su fabricación, si esto no es así, deberá desecharse.

- Aunque la NTC-Concreto (2017) recomienden un curado durante 3 días, se recomienda que este se haga durante 7 días, para verificar que no se generen agrietamientos, y si estos se generan, repararlos a tiempo.
- Habrá de revisarse la calidad de los materiales que se emplearán para la rehabilitación, por ejemplo, la calidad del acero de refuerzo para los castillos (que no se encuentren oxidados), que se hagan pruebas de revenimiento al concreto, etc.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Akin, E., Canbay, E., Binici, B., Özcebe, G. (2015). **Scale Effect on CFRP Strengthening of Infilled Reinforced Concrete Frames**. Journal of Advanced Concrete Technology, volume 13, pp. 355-366, Ankara, Turkey.

Alcocer, S. (1997). **Comportamiento Sísmico de Estructuras de Mampostería: Una Revisión**. XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Ver., México.

Alcocer, S. M. (2019). **Rehabilitación de estructuras de mampostería. Edificaciones de Mampostería** (pp. 281-337). México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Limusa.

ACI, Committee 440. (2010). 440.7R-10: **Guide for the design and Construction of externally bonded fiber-reinforced polymer systems for strengthening unreinforced masonry structures**. (7 ed). Farmington Hills: American Concrete Institute.

ACI, Committee 440. (2017). 440.2R-17: **Guide for the design and Construction of externally bonded fiber-reinforced polymer systems for strengthening concrete structures**. Farmington Hills: American Concrete Institute.

ACI, Committee 549. (2013). 549.4R-13: **Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix and steel-reinforced grout systems for repair and strengthening of concrete structures**. Farmington Hills: American Concrete Institute.

Araoz, T., Velezmoro, J. y San Bartolomé, A. (2012). **Reforzamiento de viviendas existentes construidas con muros confinados hechos con ladrillos pandereta**. Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú.

Arifuzzaman, S. y Saatcioglu, M. (2012). **Seismic Retrofit of Load Bearing Masonry Walls by FRP Sheets and Anchors**. 15 World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.

ASCE 41-13. (2014). **Seismic evaluation and retrofit of existing buildings**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers

Aykaç, B., Özbek, E., Babayani, R., Baran, M., y Aykaç, S. (2017). **Seismic strengthening of infill walls with perforates steel plates**. Engineering Structures 152 (2017) 168-179. Turkey.

Binici, B., Özcebe, G. y Özçelik, R. (2007). **Analysis and Design of FRP Composites for Seismic Retrofit of Infill Walls in Reinforced Concrete Frames**, Composites Part B: Engineering, Volume 38, pp. 575-583.

Brzez S., Perez J. (2014). **Masonry construction around the world : an overview**, short course on seismic design of reinforced and confined masonry buildings-IIT Gandhinagar.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2015). **Ley Federal del Trabajo**. Gobierno de México.

Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. (CIRES, A.C.) **Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM)**. México.

Chellappa, S. y Dubey, R. (2017). **Performance Evaluation of a Reinforced Masonry Model and an Unreinforced Masonry Model Using a Shake Table Testing Facility**. American Society of Civil Engineeris. India.

Churilov, S. y Dumova-Jovanoska, E. (2013). **In-plane shear behavior of unreinforced and jacketed brick masonry walls**. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 50 (2013) 85-105. Macedonia.

CNR-DT 200 R1/20133 (2013). **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures**. National Research Council, Rome.

CNR-DT 215 (2018). **Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione e il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica**, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma.

De Santis S., A. Hadad, De Caso B., de Felice G. and Nanni A. (2018). **Acceptance criteria for tensile characterization of fabric-reinforced cementitious matrix systems for concrete and masonry repair**. ASCE. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CC.1943-5614.0000886>.

Díaz, M., Zavala, C., Gallardo, J. y Lavado, L. (2017). **Experimental study of non-engineered confined masonry walls retrofitted with wire mesh and cement-sand mortar**. 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017. Santiago, Chile.

Elsanadedy, H. M., Abbas, H., Almusallam, T. H., & Al-Salloum, Y. A. (2019). **Organic versus inorganic matrix composites for bond-critical strengthening applications of RC structures – State-of-the-art review**. Composites Part B: Engineering, 106947. doi:10.1016/j.compositesb.2019.10.

Escalante, D., y Azahuata, T. (2018). **Effective retrofit planning for masonry housing using steel mesh**. LAP Lambert Academic Publishing. Perú.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1996). **Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings**. Applied Technology Council (ATC).

Ferrara, G., Coppola, B., Di Maio, L., Incarnato, L., y Martinelli, E. (2019). **Tensile strength of flax fabrics to be used as reinforcement in cement-based composites: Experimental tests under different environmental exposures**. Composites Part B: Engineering. doi:10.1016/j.compositesb.2019.03.062

Flores, L., Marcelino, J., Lazalde, G. y Alcocer, S. (1999). **Evaluación experimental del desempeño de marcos con bloque hueco de concreto reforzados con malla electrosoldada y recubrimiento de concreto**. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.

Flores, L., Ríos, M. y Reyes, C. (2004). **Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas**. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Acapulco, Guerrero. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. México.

Flores, L., Pacheco, M. y Carrillo, J. (2012). **Rehabilitación de muros de mampostería de piezas multiperforadas reforzados con mortero con fibras o con mortero y malla de**

alambre. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. México.

Gaytán, A. (2002). **Compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP) en la ingeniería civil.** Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED) (2020a). **Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica.** Ciudad de México, INIFED.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED) (2020b). **Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 1: Metodología.** Ciudad de México, INIFED.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED) (2020c). **Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 2: Introducción al comportamiento sísmico de estructuras para fines de evaluación.** Ciudad de México, INIFED.

Instituto Para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México. **Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID) Ver.4.0.2.0** Ciudad de México, México.

JBIC, ICUS, OYO International Corporation (2007). **Pilot Studies for Knowledge Assistance for Verification and Promotion on a New Seismic Retrofitting method for existing masonry Houses by Polypropylene Band Mesh.** Final Report. The Islamic Republic of IRAN.

Kouris, L. y Triantafillou, T. (2018). **State of the art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM).** University of Patras, Patras, Greece.

Lubin, C. y Guerrero, H. (2021). **Comportamiento experimental de muros de mampostería ante carga cíclica reversible rehabilitados con diferentes técnicas.** Posgrado Facultad de Ingeniería UNAM. México.

Marcelino J. y Alcocer S. (2004). **Comportamiento ante cargas laterales de muros de tabicón de concreto rehabilitados con malla de alambre soldado y recubrimiento de mortero.** Posgrado Facultad de Ingeniería UNAM. México.

Meli R., Alcocer S.M. y Díaz-Infante A., (1994). **Características estructurales de la vivienda de interés social en México. Seguridad sísmica de la vivienda económica.** Cuadernos de investigación, CENAPRED, México.

Mayorca P. y Meguro K. (2003). **Proposal of a new economic retrofitting method for masonry structures.** JSCE Journal of Earthquake Engineering. Tokyo, Japan.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-Concreto) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-Mampostería) (2004). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-Mampostería) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-Sismo) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-Criterios) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Özbek, E., Aykaç, B., y Aykaç, S. (2019). **The effects of brick walls strengthened with perforated steel plates on frame behavior.** Engineering Structures 189 (2019) 62-76. Turkey.

Pérez, J., Flores, L. y Alcocer, S. (2013). **Efecto de la esbeltez en la resistencia de muros de mampostería confinada.** Revista de Ingeniería Sísmica No. 89 55-77 (2013). México.

Pineda, J., Zepeda, J. y Alcocer, S. (1995). **Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada.** Posgrado Facultad de Ingeniería UNAM. México.

Quiun, D. y Mamani, P. (2017). **Cyclic load behavior of confined masonry walls of horizontally-hollow bricks retrofitted with wire meshes.** 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017. Santiago, Chile.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) (1966). Gobierno del Distrito Federal.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) (1976). Gobierno del Distrito Federal.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Riahi, Z. (2009). **Backbone model for confined masonry walls for performance-based seismic design.** Thesis for Master of Applied Science in Civil Engineering. The University of British Columbia. Canada.

Ruiz, J., Sánchez, T. y Alcocer, S. (1995). **Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural.** Posgrado Facultad de Ingeniería UNAM. México.

San Bartolomé, A. y Castro, A. (2003). **Reparación de un muro de albañilería confinada.** Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú.

San Bartolomé, A., Barr, K. y Pineda, C. (2011). **Control de la trituración de los ladrillos huecos mediante malla electrosoldada en muros de albañilería confinada.** Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú.

Sathiparan, N. Mayorca, P., y Meguro, K. (2012). **Shake Table test on One-Quarter Scale Modelos of Masonry Houses Retrofitted with PP-Band Mesh.** Earthquake Spectra. Tokyo, Japan.

- Silva, O. (2022). **Las fibras sintéticas para concreto**. Página web: 360 En Concreto. Recuperado en mayo de 2022. <https://360enconcreto.com/blog/detalle/las-fibras-sinteticas-para-concreto/>
- Sivaramakrishnan, B. (2010). **Non-Linear Modeling Parameters for Reinforced Concrete Columns Subjected to Seismic Loads**. Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin. Master of Science in Engineering. USA.
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE) (2015). **Guía para el Análisis de Estructuras de Mampostería**. Ciudad de México.
- Solano, J. y Acuña, R. (2009). **Determinación de la resistencia al cortante en paredes de mampostería de bloques de concreto, reforzado con malla electrosoldada**. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
- Taghdi, M., Bruneau, M., y Saatciglu, M. (2000). **Seismic retrofitting of low-rise masonry and concrete walls using steel strips**. Journal of Structural Engineering Vol. 126. No.9. Paper No. 21325. Canada.
- Tena A. y Del Valle, E. (1996). **Impresiones sobre el comportamiento de las estructuras de la ciudad de Manzanillo ante el sismo del 9 de octubre de 1995**. Memorias del Z Congreso Nacional de Ingeniería Estructural (págs. 433-443). Mérida, Yucatán. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Tena, A. y Miranda, E. (2002). **Edificaciones de Mampostería para la Vivienda. Capítulo 4: Comportamiento mecánico de la mampostería**. Fundación ICA. Distrito Federal, México.
- Thomoglou, A., Rousakis, T., Achillopoulou, D., and Karabinis, A. (2020). **Ultimate shear strength prediction model for unreinforced masonry retrofitted externally with textile reinforced mortar**. Earthquake and structures, Vol.19, No. 6, 411-425.
- Triantafillou, T. (2016). **Strengthening of existing masonry structures: design models**. Textile Fibre Compos. Civil Eng.,375-388, <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-446-8.00017-3>
- Triantafillou, T. C., Karlos, K., Kefalou, K., & Argyropoulou, E. (2017). **An innovative structural and energy retrofitting system for URM walls using textile reinforced mortars combined with thermal insulation: Mechanical and fire behavior**. Construction and Building Materials, 133, 1–13. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12
- Vega, C., Torres, N. (2018). **External strengthening of unreinforced masonry walls with polymers reinforced with carbon fiber**. Ingeniería e Investigación, 38(3),15-23. DOI: 10.15446/ing.investig.v38n3.73151
- Weng, S., Lu, X. Changdong, Z. Kubo, T., y Li, K. (2004). **Experimental study of seismic retrofitting of masonry walls using GFRP**. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada. Paper No. 1981.
- Wight, G., Wilton, A., y Ingham, J. (2007). **Innovative seismic design of a post-tensioned concrete masonry house**. Canadian Journal of Civil Engineering. New Zealand.

World Bank (2018). **Practical Seismic Design and Construction Manual for Retrofitting Schools in the Kyrgyz Republic**. World Bank

Zheng, Z., Pan, X., y Bao, X. (2019). **Comparative Assessment of CFRP Retrofit Techniques for RC Frames with Masonry Infills Using Pushover Analysis**. Arabian Journal for Science and Engineering 44:4597 - 4612. China.

Zúñiga, O. (2005). **Evaluación analítica de la respuesta sísmica de las edificaciones de mampostería**. Posgrado en Ingeniería Estructural. Universidad Autónoma Metropolitana. Distrito Federal, México.

Zúñiga, O., y Terán, A. (2008). **Evaluación basada en desplazamientos de edificaciones de mampostería confinada**. Revista de Ingeniería Sísmica No.79 25-48 (2008). México.