

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERIA



**"REFORZAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CON CFRP
PARA DISEÑO SISMORRESISTENTE"**

T E S I S

Que para obtener el grado de **DOCTOR EN CIENCIAS** presenta

M. C. LUIS MARIO RODRÍGUEZ VALENZUELA

Director de Tesis

DR. ALEJANDRO MUNGARAY MOCTEZUMA

MEXICALI, B. C.

ABRIL DE 2022

RESUMEN

A lo largo de la historia se ha presentado una gran cantidad de desastres naturales que han ocasionado daños no solamente materiales sino lamentablemente también una cifra elevada de pérdidas de vidas humanas. Uno de los fenómenos o fuerzas de la naturaleza que ha sido causante de una cantidad significativa de estas pérdidas son los sismos. La nula predictibilidad de estos, así como la variación de la cantidad de energía liberada en cada evento entre otros factores hacen que su impacto sea muy negativo en la sociedad.

La historia nos ha enseñado que la infraestructura sufre daños parciales o totales cuando se presentan sismos de magnitudes e intensidades importantes, particularmente las edificaciones y aún más en específico aquellas que cuentan con uso residencial o habitacional. Quizá las viviendas al tener una importancia más baja con respecto a otras edificaciones dentro de la mayoría de los códigos de diseño cuentan con un factor de seguridad más bajo que es más susceptible de ser rebasado por sismos con períodos de retorno elevados y por lo tanto también una magnitud elevada.

En el caso de la mampostería, entiéndase por esto cualquier tipo de piedra con un material cementante, también se ha demostrado que es un material frágil y vulnerable a las fuerzas de corte generadas durante los movimientos telúricos. Edificaciones construidas a base de ladrillo, adobe e incluso bloque de concreto sufren colapsos prácticamente totales durante terremotos, en algunos casos el problema será de diseño y en otros será propiamente un problema constructivo, sin embargo, cualquiera que sea el motivo es necesario encontrar soluciones a estos problemas.

Es por lo descrito en los párrafos anteriores, que una gran parte de la investigación realizada a nivel mundial se ha centrado en encontrar materiales, técnicas, métodos, etc. que permitan reforzar o rehabilitar estructuras que tengan una mayor capacidad de resistencia ante sismos severos entendiendo que siempre se debe encontrar un equilibrio entre seguridad y costo. Comúnmente estas técnicas consisten en la adición de elementos estructurales de materiales convencionales como son acero y concreto, que si bien son materiales que aportan rigidez a la estructura al mismo tiempo están aportando masa a la misma, situación que no es recomendable para diseño por sismo.

En los últimos 20 años, los investigadores, principalmente en Europa, se han dedicado a estudiar materiales novedosos que puedan tener propiedades que hagan este reforzamiento más eficiente, sobre todo sin agregar tanto peso a la estructura. En este sentido, surge la aplicación de los materiales compuestos en la ingeniería civil, materiales que son ampliamente utilizados en industrias como la aeroespacial o la automotriz, donde son aprovechadas sus propiedades de ligereza y alta resistencia.

El refuerzo con materiales compuestos en la ingeniería civil se ha venido utilizando con un mayor auge cada vez aunque principalmente en vigas y columnas de concreto reforzado. Existen también ya algunos esfuerzos realizados en muros a base de ladrillo, tanto para el refuerzo en estructuras nuevas como en la rehabilitación de aquellas que han sufrido daños por sismo.

En esta investigación, se utilizó fibra de carbono para reforzar muros de mampostería, colocando la fibra en capas que cubrieron la totalidad de la superficie de los especímenes, los cuáles fueron elaborados de la manera que comúnmente son fabricados en sitio. Posteriormente, mediante ensayos de laboratorio se obtuvieron las resistencias a compresión y a corte de estos muros, así como los módulos de elasticidad y corte.

Se obtuvo entonces, como resultado de esta investigación, algunos de los parámetros que se consideran durante el análisis y diseño de estructuras de mampostería, destacando el incremento significativo en la resistencia a cortante de los muros reforzados con fibra de carbono, aspecto que puede aportar una mayor rigidez a estos elementos estructurales ante cargas de sismo.

Es indudable que se deberán realizar futuras investigaciones con estos materiales y métodos, buscando combinaciones distintas que permitan encontrar un punto óptimo de refuerzo que equilibre seguridad y costo. En este ejercicio, también será muy interesante realizar simulaciones en diseños reales que permitan alcanzar ese punto de equilibrio.

Palabras clave: Materiales compuestos, mampostería, reforzamiento, diseño sismorresistente.

ABSTRACT

Throughout history there have been many natural disasters that have caused not only material damage but unfortunately also a high number of human lives lost. One of the phenomena or forces of nature that has been the cause of a significant amount of these losses is earthquakes. The null predictability of these as well as the variation in the amount of energy released in each event among other factors make their impact extremely negative on society.

History has taught us that infrastructure suffers partial or total damage when earthquakes of significant magnitudes and intensities occur, particularly buildings and even more specifically those that have residential use. Perhaps the houses have a lower importance with respect to other buildings within most of the actual design codes, and have a lower safety factor that is more susceptible to being exceeded by earthquakes with long return periods and therefore also a higher magnitude.

In the case of masonry, defined as any type of stone bonded with a cementitious material, it has also been shown that it is a fragile material and vulnerable to the shear forces generated during telluric movements. Buildings built with brick, adobe and even concrete mason units suffer practically total collapse during earthquakes, in some cases the problem will be a design issue and in others it will be a construction issue, however whatever the reason is, there is a need to find solutions to these problems.

It is because of what is described in the previous paragraphs that a large part of the research carried out worldwide has focused on finding materials, techniques, methods, etc. that allow reinforcing or retrofitting of structures that might have a greater capacity for resistance to severe earthquakes, understanding that a balance must always be found between safety and cost. Commonly these techniques consist of the addition of structural elements of conventional materials such as steel and concrete, which although they are materials that provide rigidity to the structure at the same time they are adding mass to it, a situation that is not recommended for seismic design.

In the last 20 years, researchers, mainly in Europe, have been studying novel materials that may have properties that make this reinforcement more efficient, especially without adding too much weight to the structure. In this way, the use of composite materials in civil engineering arises, materials that are widely used in industries such as aerospace or automotive, where their lightness and high resistance properties are used.

The reinforcement with composite materials in civil engineering has been used more often in the last years, although mainly applied to reinforced concrete beams and columns. There are also some efforts made in brick-based walls, both for the reinforcement of new structures and for the rehabilitation of those that have suffered earthquake damage.

In this research, carbon fiber was used to reinforce masonry walls, adding the fiber in layers that covered the entire surface of the specimens, which were made in the way that they are commonly manufactured on site. Subsequently, through laboratory tests, the compressive and shear strengths of these walls as well as the elasticity and shear modulus were obtained.

Then, as a result of this research, some of the parameters that are considered during the analysis and design of masonry structures were obtained, highlighting the significant increase in the shear resistance of the walls reinforced with carbon fiber, an aspect that can provide a greater rigidity of these structural elements to resist earthquake loads.

Undoubtedly, future research should be carried out with these materials and methods, looking for different combinations that allow finding an optimal point of equilibrium of the reinforcement that balances safety and cost. In this exercise, it will also be interesting to carry out simulations in real designs that allow to reach that point of equilibrium.

Keywords: Composite materials, masonry, reinforcement, seismic design.

Índice de Contenido

1. Introducción	10
2. Antecedentes.....	13
2.1. Sismos en el mundo.....	13
2.2. Sismos en México	22
2.3. Sismos en Baja California	25
3. Hipótesis.....	29
4. Objetivo de la Investigación.....	29
5. Revisión de literatura en materia de Reforzamiento Estructural.....	30
5.1. Reforzamiento Estructural de Vigas y Columnas	38
5.2. Reforzamiento Estructural de Muros	42
6. Metodología	52
6.1. Metodología general de la investigación	52
6.2. Metodología técnica	53
6.2.1. Materiales	54
6.2.2. Especímenes.....	55
6.2.3. Prueba de compresión axial.....	58
6.2.4. Prueba de Compresión Diagonal.....	60
7. Resultados.....	62
7.1. Resistencia a compresión.....	62
7.2. Resistencia a cortante	63
7.3. Módulo de Elasticidad	64
7.4. Módulo de Corte	65
7.5. Comparación de resultados.....	66
7.6. Simulación en software de análisis estructural	67
7.6.1. Escenario 1 – Block común con $a = 0.44$ g.....	71
7.6.2. Escenario 2 – Block FRP con $a = 0.44$ g.....	71
7.6.3. Escenario 3 – Block común con $a = 0.93$ g.....	72
7.6.4. Escenario 4 – Block FRP con $a = 0.93$ g.....	73
8. Conclusiones	77
8.1. Conclusiones técnicas	77
8.2. Conclusiones socio-económicas.....	79
8.3. Conclusiones metodológicas.....	80
9. Referencias	81
10. Apéndice A.....	88

Índice de Figuras

Figura 2.1. Sismo de Japón de 1923	14
Figura 2.2. Sismo de Japón de 1995	14
Figura 2.3. Sismo de Northridge de 1994.....	15
Figura 2.4. Sismo de L´Aquila de 2009	16
Figura 2.5. Sismo de Haití de 2010.	17
Figura 2.6. Sismo de Chile de 2010.....	17
Figura 2.7. Sismo de Turquía 2011	18
Figura 2.8. Sismo de Nepal en 2015.....	20
Figura 2.9. Sismo de Italia en 2016.....	21
Figura 2.10. Sismo de Oaxaca en 2017.....	22
Figura 2.11. Sismo de Oaxaca en 2017	23
Figura 2.12. Edificio dañado en CDMX en 2017	24
Figura 2.13. Edificio dañado en CDMX en 2017	25
Figura 2.14. Vivienda dañada en sismo de 2010 en Mexicali.....	26
Figura 2.15. Vivienda dañada en sismo de 2010 en Mexicali.....	27
Figura 6.1. Bloque hueco de concreto	54
Figura 6.2. Fibra de carbono	55
Figura 6.3. Muros de mampostería no reforzados para pruebas de compresión ...	56
Figura 6.4. Muros de mampostería no reforzados para pruebas de compresión diagonal.....	56
Figura 6.5. Muros de mampostería reforzada para ensayos de compresión.....	57
Figura 6.6. Aplicación de carga axial a muestras C1	58
Figura 6.7. Aplicación de la carga diagonal a especímenes no reforzados S1.....	60
Figura 6.8. Aplicación de la carga diagonal a especímenes reforzados S2.....	60
Figura 7.1. Resistencia a la compresión para paredes de mampostería no reforzadas (C11-C13) y reforzadas (C21-C23)	63
Figura 7.2. Resistencia al corte para muros de mampostería no reforzados (S11-S13) y reforzados (S21-S23)	64
Figura 7.3. Módulo de Elasticidad para muros de mampostería no reforzados (C11-C13) y reforzados (C21-C23).....	65
Figura 7.4. Módulo de Corte para muros de mampostería no reforzados (S11-S13) y reforzados (S21-S23).....	66
Figura 7.5. Modelo 3D de la vivienda para simulación	68
Figura 7.6. Distribución de muros de mampostería de planta alta.....	69
Figura 7.7. Distribución de muros de mampostería de planta baja.....	69
Figura 7.8. Localización de muros de mampostería	70

Índice de Tablas

Tabla 5.1 Descripción de diversas técnicas de reforzamiento	32
Tabla 5.2 Conclusiones de diversas técnicas de reforzamiento	33
Tabla 5.3 Características Económicas de técnicas de reforzamiento	35
Tabla 5.4 Características de Sustentabilidad de técnicas de reforzamiento	36
Tabla 5.5 Características Constructivas de técnicas de reforzamiento	37
Tabla 6.1 Descripción de especímenes de prueba	57
Tabla 7.1 Comparativa de resultados similares entre la literatura consultada y los obtenidos en esta investigación	67
Tabla 7.2 Comparativa de resultados de los escenarios de simulación de la vivienda	74
Tabla 7.3 Relación demanda/capacidad de muros con aceleración = 0.44 g.....	75
Tabla 7.4 Relación demanda/capacidad de muros con aceleración = 0.93 g.....	76

1. Introducción

A lo largo de la historia, los desastres naturales han ocasionado pérdidas incalculables en términos de vidas humanas y daños a la infraestructura, por mencionar algunos ejemplos hablamos de edificaciones residenciales, escolares, hospitales así como puentes y carreteras.

Los sismos son probablemente el desastre natural que mayores daños haya ocasionado a lo largo de los tiempos, lamentablemente han ocurrido terremotos de magnitudes e intensidades que han tenido una naturaleza completamente destructiva. En los últimos 20 años podemos recordar algunos de ellos que han dejado la mayor cantidad de daños como los de Japón, Nepal, Turquía, Italia, Taiwan así como en nuestro continente el ocurrido en Chile, Haití y desde luego uno de los más recientes en nuestro país de septiembre de 2017 causando mayores estragos en la Ciudad de México.

Lo más importante es la cantidad de pérdidas de vidas humanas que han ocurrido en cada uno de los sismos antes mencionados, sin embargo esta investigación tiene un enfoque en la infraestructura y particularmente la destinada a la vivienda. Los edificios para uso residencial se han visto muy afectados con la ocurrencia de estos eventos, principalmente en aquellos que comparten la misma característica de material estructural: la mampostería. Este material ha demostrado que no tiene el mejor desempeño sísmico por algunas razones que se estarán abordando más adelante.

Esta fragilidad mostrada por las estructuras existentes que se utilizan en los sistemas de construcción tradicional, exigen la necesidad de incorporar nuevos materiales, métodos y técnicas de refuerzo que aumenten la seguridad estructural y confiabilidad de cada construcción. Esto trae consigo un impacto social y económico debido a fallas en edificaciones que se traducen en pérdidas.

En los últimos años, los materiales compuestos a base de fibras y polímeros (FRP) se han utilizado con mayor auge en la ingeniería civil, ya que las principales características de dichos materiales se convierten en una ventaja para la creación de elementos estructurales con mayores beneficios en términos de resistencia. Estas

propiedades hacen que este tipo de materiales representen una muy buena alternativa a la solución descrita en el párrafo anterior.

Los investigadores de todo el mundo han dedicado esfuerzos por encontrar métodos y técnicas de reforzamiento utilizando FRP, particularmente fibra de carbono y fibra de vidrio como su material base, buscando soluciones óptimas que den un mejor desempeño sísmico a distintos elementos estructurales como vigas, columnas, losas y/o muros. En la sección 3 encontraremos descritos algunos de estos esfuerzos, en donde existen variación de materiales, configuraciones, dimensiones, etc.

En este trabajo se muestran los resultados de combinar materiales compuestos utilizando fibra de carbono (CFRP) con un sistema estructural tradicional como lo es el de muros de mampostería, particularmente a base de bloques de concreto. Se ha observado que los sistemas de mampostería son frágiles cuando son sometidos a cargas laterales como las generadas por movimientos sísmicos. Es por ello, que se busca reforzar estos elementos con el objetivo de lograr mayor rigidez en los muros y evitar fallas estructurales.

Los ensayos de laboratorio en muros de mampostería permiten conocer los parámetros para el diseño sísmico, fundamentalmente los módulos elástico y de corte, así como la resistencia a compresión y cortante, de esta forma se puede estimar la rigidez de los muros reforzados. Para dicho reforzamiento se pueden implementar distintas técnicas, abarcando diferentes aspectos desde variaciones en la colocación del refuerzo hasta la utilización de diferentes fibras, polímeros, número de capas y orientaciones de las fibras.

El objetivo de este trabajo de investigación es proporcionar soluciones estructurales para reforzar edificaciones nuevas o existentes con materiales innovadores que han demostrado mejorías en algunas características como lo es peso ligero, alta resistencia y resistencia a la corrosión. Por lo tanto, probar dichos materiales en laboratorio, nos permite determinar la magnitud del incremento de la resistencia.

Los resultados de laboratorio que se obtienen con las pruebas permiten efectuar simulaciones utilizando para esto software especializado de análisis estructural con las

cuales se pueden encontrar puntos óptimos colocando el refuerzo con fibra de carbono en los muros que presentan la mayor demanda por carga sísmica en una vivienda. Los muros que comúnmente se ven más afectados son aquellos que se encuentran en la dirección corta de la edificación, aquellos que tienen vanos o aberturas de dimensiones importantes así como los que se encuentran más alejados de los centros de masa y rigidez de manera que sufren efectos de torsión.

Finalmente, una vez reforzados los muros y obteniendo algunos parámetros de su comportamiento, se puede hacer un análisis económico en el cual se puede obtener el costo por reforzamiento parcial o total de una estructura, obteniendo así un análisis de costo-beneficio al utilizar este tipo de materiales con funciones estructurales.

2. Antecedentes

Es reconocido que los sismos se producen por el constante movimiento en la corteza terrestre, integrada por placas tectónicas, con lo que se libera energía a través de diversos medios, destacando los volcanes y fallas geológicas, esta energía se cuantifica actualmente de cuatro formas; de manera local o Richter (ML), tipos de onda de cuerpo-superficiales (Mb) y magnitud de momento (Mw) (*Haktanir et al., 2012*). El impacto negativo a la población de la manifestación de sismos a nivel mundial, entre otros fenómenos naturales, es relevante en términos de pérdida de vidas humanas y afectación a la infraestructura.

Un estudio reciente indica que durante el período de 2000 a 2015, los sismos alrededor del mundo han causado alrededor de 50,000 muertes por año, esto en gran parte se ha debido a que grandes sismos han tenido su epicentro muy cerca de zonas urbanizadas, caracterizadas por una alta densidad de viviendas, así como edificaciones antiguas (*Brando et al., 2020*).

2.1. Sismos en el mundo

En Japón han ocurrido tres grandes sismos desde 1923, los cuáles han tenido consecuencias distintas debido a lo que cada uno de ellos ocasionó. El sismo de septiembre de 1923, provocó principalmente un incendio que dejó un total de 105,000 víctimas fatales, este sismo tuvo una magnitud $Mw = 7.9$. En la imagen 2.1 se puede apreciar el grado de destrucción de este sismo. Por otro lado, el terremoto ocurrido en enero de 1995, con una magnitud $Mw = 7.3$, y que causó el colapso de viviendas principalmente como se observa en la imagen 2.2, provocó la muerte de aproximadamente 6500 personas y dejó otras cerca de 44,000 lesionadas. Finalmente, el sismo ocurrido en marzo de 2011, tuvo un efecto distinto, si bien la magnitud fue de $Mw = 9.0$, la ubicación del mismo provocó un tsunami, este dejó 18,550 personas fallecidas y otras 6,000 lesionadas (*Ishigaki et al., 2013*).



Figura 2.1. Sismo de Japón de 1923. Fuente <https://www.historiajaponesa.com/el-gran-terremoto-de-1923/>



Figura 2.2. Sismo de Japón de 1995. Fuente <https://www.alamy.es/terremoto-de-kobe-de-1995-japon-image4027744.html>

Estudios realizados después del terremoto de Northridge en 1994 mostraron que más de 450 edificios reforzados con estos métodos tradicionales fallaron o colapsaron después del terremoto (*Luccioni & Rougier, 2010*). La vulnerabilidad de las estructuras de mampostería a menudo radica en la debilidad de las juntas del mortero debido a las tensiones de corte y que se han registrado de magnitud alta durante el fenómeno natural terremotos (*Bui et al., 2015*). La fragilidad mencionada se puede claramente apreciar en la imagen 2.3



Figura 2.3. Sismo de Northridge de 1994. Fuente

<https://www.businessinsider.com/photos-1994-northridge-earthquake-in-los-angeles-2019-1?r=MX&IR=T>

En septiembre de 1999 en Taiwan, ocurrió un sismo con una magnitud $M_w = 7.7$, causando grandes pérdidas y daños estructurales en edificios. Se tuvo un registro de 2432 personas fallecidas, así como 657 seriamente lesionadas. Adicionalmente cerca de 50,000 viviendas colapsaron mientras que aproximadamente otras 42000 viviendas tuvieron un colapso parcial (*Chang et al., 2004*).

En abril de 2009, se originó un sismo con una magnitud $M_w = 6.3$ en la ciudad de L' Aquila, Italia, dejando un saldo de 305 personas fallecidas y cuando menos 1500 lesionadas. El principal daño se presentó en viviendas, donde inicialmente se tuvo que evacuar a cerca de 70,000 personas y finalmente se quedaron sin vivienda aproximadamente 30,000 personas. Las edificaciones para viviendas son principalmente a base de mampostería, donde se encontraron fallas en las uniones entre muros y losas así como fallas por cortante en paredes. El otro sistema estructural utilizado en la ciudad es a base de concreto reforzado, las edificaciones construidas con este material presentaron principalmente daños no estructurales (*Liel & Lynch, 2012*). La imagen 2.4 nos permite darnos cuenta de la magnitud del impacto de este sismo en las edificaciones.



Figura 2.4. Sismo de L´ Aquila de 2009. Fuente

<https://www.britannica.com/event/LAquila-earthquake-of-2009>

Los daños que se presentaron fueron en muros de mampostería, aunque estos no eran estructurales, presentaron fisuras en forma de cruz debido a las fuerzas cortantes. En las estructuras de concreto reforzado, las principales fallas identificadas fueron debido al efecto de columna corta, defectos en el anclaje del acero así como fallas generadas por esfuerzos de compresión en las columnas (*Liel & Lynch, 2012*).

El sismo ocurrido en Haití en enero del 2010 con una magnitud $M_w = 7.0$, resultó en una estimación de 316,000 víctimas fatales, el epicentro se localizó a 25 kilómetros de la capital de este país, Puerto Príncipe, donde viven alrededor de un millón de habitantes (*Brando et al., 2020*). El colapso de las estructuras se debió a un inadecuado detallamiento en los elementos estructurales, mala calidad de los materiales así como pisos débiles en algunos edificios revisados (*Gould et al., 2011*). Durante este evento, las edificaciones a base de madera tuvieron un mejor desempeño que las de concreto reforzado, las cuales si resultaron severamente dañadas como se observa en la imagen 2.5 (*Gautam & Chaulagain, 2016*).

En febrero de 2010, un sismo de magnitud $M_w = 8.8$ se presentó en Chile, causando daños en aproximadamente 370,000 viviendas, 4000 escuelas y casi 80 hospitales, además de 523 fatalidades y unas 12,000 personas lesionadas y una pérdida económica estimada de 30 billones de US dólares. La historia de sismos del país, han llevado a muy buenas prácticas en el diseño sísmico, lo que logró aminorar las pérdidas humanas en comparación del sismo de Haití [9]. Las construcciones que

sufrieron la mayor cantidad de daños fueron aquellas construidas a base de adobe, en una de las regiones afectadas, el 90% de las viviendas de este material fueron destruidas. En comparación, los edificios con ingeniería tuvieron muy buen comportamiento, ya que de los casi 10,000 edificios que existen, solamente 4 de ellos colapsaron y 50 tuvieron que ser demolidos. En la imagen 2.6 se pueden observar los daños causados por el terremoto en este país (*Elnashai et al., 2012*).



Figura 2.5. Sismo de Haití de 2010. Fuente

<https://www.eltiempo.com/mundo/latinoamerica/diez-claves-de-haiti-diez-anos-despues-del-terremoto-451330>



Figura 2.6. Sismo de Chile de 2010. Fuente <https://radio.uchile.cl/2020/02/24/27f-los-cambios-que-genero-el-terremoto-de-2010/>

El sismo registrado en Turquía en el mes de junio de 2011, aunque tuvo una magnitud pequeña ($M_w = 5.3$) causó daños severos a las estructuras de mampostería,

que típicamente se construyen a base de piedra o tabique. Los daños en edificios de piedra se ocasionaron debido a una mala calidad en la construcción y en la mano de obra, esto ya que se encontraron fallas por aplastamiento que excedieron la resistencia a compresión del mismo, es decir, los muros se vieron afectados por la componente vertical del sismo (*Sayun et al., 2013*). Las edificaciones a base de tabiques presentaron mecanismos de falla en las esquinas, fallas por flexión y fisuras en diagonal por fuerza cortante.

Durante el sismo registrado en octubre de 2011 en la provincia de Van en Turquía, el cual registró una magnitud M_w de 7.2, se confirmaron además de daños estructurales severos como se observa en la imagen 2.7, la muerte de 609 habitantes por el evento. Las principales fallas estructurales que se presentaron en estructuras de concreto reforzado, se observó una calidad muy pobre en el concreto, encontrándose en distintas pruebas una resistencia a la compresión de menos del 50% del diseñado (*Celebi et al., 2013*). Otra de las fallas que se presentaron en las estructuras, fue un detallamiento incorrecto del acero de refuerzo, esto debido a las limitaciones del código de este país con relación a las dimensiones y detalles consideradas en las uniones de vigas y columnas.



Figura 2.7. Sismo de Turquía 2011. Fuente

http://www.cubadebate.cu/noticias/2011/10/27/sur-de-turquia-sacudido-por-otro-sismo/#.XvDvzC2ZM_U

Adicionalmente, un problema muy común que se suele encontrar en los estudios posteriores a un sismo de intensidades elevadas, es el llamado viga fuerte – columna

débil. Esto quiere decir que el elemento más débil en la unión es quien pierde su capacidad de carga, cuando este elemento es la columna, se provoca el colapso, tal como se encontró en distintas estructuras durante el sismo de 2011 en Turquía (*Celebi et al., 2013*). Las edificaciones construidas en Turquía en zonas rurales son a base de mampostería, en este sistema estructural, se encontró que las uniones de mortero tuvieron un comportamiento débil generando colapso en los muros. En resumen, en mampostería las fallas se debieron a conexiones pobres y mala calidad de los materiales.

En abril de 2015, se registró un sismo en Nepal con una magnitud $M_w = 7.8$ que provocó la muerte de aproximadamente 9,000 personas, así como otras 22,000 con lesiones severas y generó desde luego la pérdida de viviendas para millones de personas, con un registro de casi 650,000 viviendas con daño total y otras 290,000 viviendas con daños parciales en la estructura, lo que representó una pérdida de unos 7 billones de US dólares (*Khadka, 2020*). Al sismo mencionado, se le sumaron 553 réplicas con una magnitud superior a 4.0, incluyendo uno registrado en mayo de ese mismo año con una magnitud $M_w = 7.3$. La estadística en cuanto a las viviendas es que el 96% de aquellas que presentaron fallas tenían un sistema estructural a base de mampostería, mientras que solamente el 4% eran construcciones de concreto reforzado. Es importante mencionar que la mampostería con la que están fabricadas las viviendas en este país es principalmente a base de lodo.

En observaciones a edificaciones de mampostería hechas en Nepal, se detectó que el colapso de estas se debió a diversos factores como muros deteriorados, uniones débiles, suelo blando, así como fallas en la cimentación. Otro grupo de factores obedece al peso de las cubiertas en las edificaciones, donde la masa es proporcional y por lo tanto induce una mayor fuerza sísmica, convirtiendo así a las estructuras más vulnerables. Por último, también se detectó que la mampostería sin reforzar no tenía una adecuada estabilidad e integridad, haciendo que las fisuras crecieran rápidamente una vez se presentaban (*Pan et al., 2018*). Lo anterior generó que la mayoría de las estructuras de mampostería presentaran fallas por cortante.

La mayoría de la población reside en vecindarios rurales, donde es común el uso de mampostería por generaciones y sin que estas reciban un mantenimiento o

reforzamiento. La forma de construir es utilizando mano de obra que no tiene ningún entrenamiento y es basado simplemente en observaciones y criterio de aquellos con mayor experiencia (*Gautam & Chaulagain, 2016*). Esto genera que las estructuras tengan cimentaciones débiles, muros separados, mala calidad en materiales, mezcla de materiales o sistemas constructivos, cubiertas pesadas o incluso con construcciones de concreto reforzado en niveles superiores. En la imagen 2.8 se aprecia como los defectos constructivos y de diseño provocan daños severos en las edificaciones de este material.



Figura 2.8. Sismo de Nepal en 2015. Fuente <http://www.asianews.it/noticias-es/Nepal-continúa-cayendo-en-la-pobreza-extrema,-según-las-estimaciones-de-crecimiento-2015-2016--37090.html>

En el lapso comprendido de agosto de 2016 y enero de 2017, se registró una secuencia de sismos con magnitudes M_w en el rango de 5.0 hasta 6.5 en algunas regiones centrales de Italia, resultando en miles de edificios con daño estructural y no estructural. En un estudio presentado por Di Ludovico et al. se analizaron únicamente las edificaciones con uso escolar. Después de la secuencia de sismos, el porcentaje de edificios clasificados como usables corresponden al 70% y al 60% para estructuras de concreto reforzado y mampostería respectivamente. Es también de destacar en este estudio, que se hizo para ambos materiales un análisis de aquellos que contaban con diseño sísmico, en el caso particular de los edificios a base de mampostería, el solo el 50% de los que no contaban con diseño sísmico fueron clasificados como usables, mientras que de aquellos edificios que contaban con diseño sismorresistente el 80% fue declarado como usable. (*Di Ludovico et al., 2019*)

Esta secuencia de eventos sísmicos fue provocando una degradación en la rigidez de las edificaciones, ocasionando así que aquellas estructuras de mampostería que no habían sido reforzadas o reparadas presentaran colapso en los eventos ocurridos en octubre de 2016 como se puede apreciar en la imagen 2.9, afortunadamente no hubo fatalidades ya que la mayoría de estas edificaciones habían sido evacuadas después de los primeros movimientos ocurridos en agosto de ese mismo año (*Brando et al., 2020*).



Figura 2.9. Sismo de Italia en 2016. Fuente <https://elpais.com/noticias/terremoto-italia-2016/>

En un estudio realizado por Acito et al., se identifican las principales debilidades de la mampostería ante eventos sísmicos para edificaciones típicas en las regiones centrales de Italia. El estudio confirma que la calidad de la mampostería tiene un rol crucial en el desempeño sísmico de la edificación ante cargas horizontales. Cuando se tiene una mala calidad en este material, la estructura se vuelve altamente vulnerable, mientras que cuando se tiene buena calidad, es notable el mejor desempeño ante cargas sísmicas. Señala además que existen distintas técnicas de reforzamiento del material que pueden ser consideradas. (*Acito et al., 2020*)

2.2. Sismos en México

El 7 de septiembre de 2017, ocurrió un sismo con magnitud $M_w = 8.2$ en el golfo de Tehuantepec, México. Este sismo tuvo consecuencias significantes en la infraestructura de los estados de Oaxaca, Chiapas y Tabasco. Durante el evento, cientos de casas y edificios resultaron severamente dañados como se puede apreciar en la edificación de la imagen 2.10. Los niveles de aceleración tan elevados que se encontraron en algunas estaciones sismológicas ubicadas en los estados anteriormente mencionados, concuerdan totalmente con los daños encontrados en los sitios más afectados. Los espectros de aceleraciones contruidos a partir de la instrumentación son significativamente mayores a los considerados en los códigos de diseño utilizados. (Pozos *et al.*, 2019)



Figura 2.10. Sismo de Oaxaca en 2017. Fuente

<https://sintesis.com.mx/2017/09/21/autoridades-inician-labores-reconstruccion-en-oaxaca-tras-sismo/>

Los principales daños observados durante este sismo fueron en viviendas muy antiguas y a base de adobe, tal como se aprecia en la imagen 2.11, las cuáles presentaban la característica de ser auto construidas. Las viviendas construidas con mampostería también sufrieron un daño significativo. En aquellas viviendas construidas con mampostería confinada o parcialmente confinada, se encontraron fisuras en diagonal debido a las fuerzas cortantes generadas. Otra causa de fallas estructurales se debió a una mala unión entre elementos nuevos y existentes así como el fenómeno de columna corta que ocurre por colocar muros hasta una determinada altura de la

columna. En resumen, las estructuras dañadas durante este sismo del 2017, se debió a una mala calidad de materiales aunado a la auto construcción que se realiza sin ningún tipo de ingeniería en el diseño (*Pozos et al., 2019*).



Figura 2.11. Sismo de Oaxaca en 2017. Fuente

<https://megalopolismx.com/noticia/34829/lenta-reconstruccion-tras--sismos-de-septiembre-2017>

Personalmente, durante el sismo de 2017 me tocó estar en Tabasco apoyando a Protección Civil del Estado de Tabasco en la inspección y dictaminación de algunas estructuras donde se tenía un reporte de daños por este fenómeno. Los hallazgos coinciden totalmente con lo descrito en los párrafos anteriores, se observaron viviendas y escuelas donde se construye sin ningún tipo de supervisión provocando que los muros de estas edificaciones sean incapaces de soportar las fueras horizontales generadas por sismos, causando fisuras y degradación de la rigidez llevándolas en algunos casos al colapso. Las edificaciones que tenían un diseño estructural adecuado, soportaron el evento prácticamente sin presentar fisuras.

El 19 de septiembre de 2017, se presentó un sismo con una magnitud $M_w = 7.1$ con epicentro a 60 km de Puebla, México. Se estima que este evento tuvo un impacto en 28 millones de personas, 8.6 millones de residencias, 54000 escuelas y 5700 hospitales (*Franke et al., 2019*). Uno de los aspectos interesantes en los hallazgos de este evento, es que el 90% de los edificios que colapsaron fueron contruidos antes de 1985, año donde se presentó un sismo con $M_w = 8.1$, por lo que ya habían sufrido un fuerte impacto por el terremoto de ese año. La mayoría de las estructuras que presentaron los

daños más severos, tenían un diseño estructural inadecuado, caracterizado por insuficientes elementos de carga, construcciones de mampostería sin confinar y pobre detallamiento del acero de refuerzo en columnas. En la imagen 2.12 se observa un edificio de concreto con un colapso total durante el evento.



Figura 2.12. Edificio dañado en CDMX en 2017. Fuente

<https://www.dondeir.com/donde-ir-recomienda-home/zonas-mas-afectadas-por-el-sismo-19-de-septiembre-2017/2017/09/>

Las edificaciones construidas después de 1985 se comportaron adecuadamente durante el movimiento de 2017. Esto probablemente se deba a los cambios en los códigos de diseño estructural que normalmente se hacen después de la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, considerando cada vez mayores aceleraciones del terreno por lo tanto las probabilidades de falla de estas nuevas estructuras también son cada vez menores. La prueba está en que durante el evento de 2017 se registró un total de 369 vidas mientras que en 1985 hubo más de 10,000 fatalidades (*Franke et al., 2019*).

Aún con lo comentado en el párrafo anterior, los daños causados por el sismo de 2017 no son menores, además de las víctimas mencionadas, se registraron fallas estructurales en edificaciones en los estados de México, Puebla y Morelos. En total se estima que la cantidad de edificios dañados por el sismo es de 9,722 de los cuales 1,632 sufrieron un colapso total, un total de casi 300 escuelas necesitaron reparaciones y 17 hospitales también severamente afectados. En el estado de Morelos, se registró un daño estructural a 20,000 viviendas (*Mayoral et al., 2019*).

Otro de los estudios realizados sobre el sismo de 2017 en México, en el cuál se clasificaron por diferentes categorías los edificios dañados, señala que del total de construcciones afectadas, el 66% corresponden a uso residencial y otro 15% tiene un uso mixto (residencial y comercial). El resto de los edificios son de uso educacional, industrial u otro. El estudio también clasifica las pérdidas por el sistema estructural utilizado, siendo el 41% edificios con marcos de concreto reforzado, un 30% edificios con losa plana y un 26% estructuras de mampostería. Es notorio que el porcentaje de afectación en edificios con marcos de acero apenas suma el 1.2% (*Lara et al., 2020*). En la imagen 2.13 se observan daños en edificios a base de mampostería.



Figura 2.13. Edificio dañado en CDMX en 2017. Fuente <http://angular11-18mexico.com.mx/2017/09/21/19-de-septiembre-2017-sismo-7-1-richter-a-las-1314-hrs-en-la-ciudad-de-mexico/>

2.3. Sismos en Baja California

En Baja California, México, existe un peligro sísmico alto, asociado a las condiciones tectónicas de la región, la cual se localiza en los límites de las Placas del Pacífico y Norteamérica, este límite se caracteriza por un sistema transformante, en donde resalta la falla de rumbo denominado como Falla de San Andrés, el cual se extiende desde San Francisco, California, hasta el Golfo de California (*Alvarez et al., 2010*).

En el caso de la ciudad de Mexicali, ya se han registrado sismos de magnitud importante como es el caso del sismo del 15 de octubre de 1979, con $M_w = 6.5$ (*USGS,*

2009) y 04 de abril del 2010, con $M_w = 7.2$ (USGS, 2010), con afectaciones importantes a la infraestructura urbana.

El sismo mencionado del 4 de abril de 2010, con un epicentro a 18 kilómetros al sureste de Mexicali, causó graves daños en la infraestructura, como canales de riego, carreteras, puentes, escuelas, hogares, hospitales y otros tipos de edificaciones. La intensidad del evento causó daños estructurales debido a diferentes aspectos, entre ellos, falla de piso débil, efectos de columna corta y fallas en los muros de apoyo causados por el corte (Jaimes & Reinoso, 2010). En algunas escuelas se requería reforzar las columnas, vigas e incluso agregar sistemas de arriostramiento, incluidos muros de corte y tirantes de acero (Martínez, 2010). Los daños en vivienda ocurrieron principalmente en el sureste de la ciudad, más cerca del epicentro, las cuales se construyeron entre 1970 y 1990, y se observó que más del 60.0% de ellas estaban elaboradas con material resistente (Ley, 2012), principalmente mampostería u hormigón.

Las imágenes 2.14 y 2.15 corresponden a viviendas dañadas estructuralmente durante el sismo de 2010 en la ciudad de Mexicali, este patrón se registró en algunos fraccionamientos donde los muros en la dirección más corta sufrieron la mayor cantidad de daños, esto debido a que la fuerza cortante tiene una menor cantidad de superficie donde distribuirse.



Figura 2.14. Vivienda dañada en sismo de 2010 en Mexicali. Fuente Elaboración propia



Figura 2.15. Vivienda dañada en sismo de 2010 en Mexicali. Fuente Elaboración propia

En lo que se refiere al espectro de respuesta correspondiente al sismo del 4 de abril de 2010, se observó que la ordenada de la aceleración máxima corresponde al período fundamental de vibrar para viviendas de 1 o 2 niveles, por lo que se presume que estas edificaciones serán las que tengan una mayor probabilidad de daño severo en la aparición de un sismo similar, principalmente aquellas que se encuentran dañadas o construidas con deficiencias constructivas o de supervisión (*Rodríguez et al., 2020*).

Tal y como se ha descrito en esta sección, los sismos son los desastres naturales que causan la mayor cantidad de pérdidas de vidas humanas, aun cuando estas fatalidades no ocurren directamente por la aceleración del terreno sino por el colapso de las estructuras. En las últimas décadas se ha dedicado mucho tiempo de investigación para prevenir el colapso de grandes edificios y es lo que se ha plasmado en los códigos de diseño, de manera que esas estructuras tienen comportamientos adecuados durante la ocurrencia de estos eventos. Sin embargo, en áreas rurales o países con un menor desarrollo, la mayoría de las viviendas son construidas a base de mampostería y en este tipo de edificaciones no se ha realizado la misma cantidad de investigación (*Bhattacharya et al., 2014*).

Las principales fallas en estructuras a base de mampostería varían en función del material de que ésta es fabricada, por ejemplo, en las casas de adobe el principal

problema que se presenta es debido a la gran cantidad de masa en las paredes, resultando en una fuerza cortante más grande, además este material presenta muy poca ductilidad. Las fallas entonces se producen por la separación de muros o la aparición de fisuras de cortante que llevan a la falla de estos muros. En viviendas a base de ladrillo, se presentan fallas en las uniones de muros con cubiertas, esto es, fallan fuera del plano, también se debe a la aparición de grietas por cortante en las paredes, generalmente iniciadas en las aperturas de estos elementos estructurales (*Bhattacharya et al., 2014*).

3. Hipótesis

El reforzamiento de muros de bloque de concreto con fibra de carbono, aumentará la resistencia a cortante de los mismos sin añadir una masa significativa, otorgando de esta manera un mayor grado de seguridad estructural y un mejor desempeño de los muros.

4. Objetivo de la Investigación

Obtener el incremento de la resistencia a cortante de muros a base de bloque de concreto combinándolos con materiales compuestos (FRP), específicamente fibra de carbono. Los resultados obtenidos serán aplicables al reforzamiento de muros estructurales, así como a la rehabilitación de aquellos que presenten algún tipo de falla, principalmente para aquellos que serán sometidos a cargas por sismo. Los parámetros de diseño para estructuras sismorresistentes que se obtendrán serán la resistencia a cortante y módulo de corte así como la resistencia a compresión, y el módulo elástico.

Evaluar el comportamiento de un elemento estructural tipo placa, consistente en un muro de bloque de concreto reforzado con fibra de carbono mediante la aplicación del método de elemento finito.

Extrapolar y simular el desempeño por sismo de una vivienda utilizando los valores obtenidos en la experimentación de muros reforzados con fibra de carbono. Los resultados de esta simulación permitirán hacer una comparativa entre los muros con material tradicional y los muros que cuentan con un refuerzo a base de una malla de fibra de carbono.

5. Revisión de literatura en materia de Reforzamiento Estructural

Una gran cantidad de edificios existentes tienen sistemas sismorresistentes que fueron diseñados de acuerdo con las provisiones de códigos antiguos. Estos sistemas estructurales exhiben deficiencias en temas de ductilidad y pueden presentar un riesgo significativo en caso de sismos de alta o incluso moderada intensidad (*Honarparast et al., 2019*). Es por esto que se ha dedicado una gran cantidad de investigación a buscar técnicas que puedan reforzar estos sistemas estructurales de manera que se puedan conservar estos edificios sin que esto represente un riesgo para los ocupantes.

En los últimos años, los materiales compuestos a base de fibras y polímeros se han utilizado con mayor auge en la ingeniería civil, ya que las principales características de dichos materiales se convierten en una ventaja para la creación de elementos estructurales con mayores beneficios en términos de resistencia.

Los materiales compuestos de fibra se han utilizado ampliamente en una variedad de industrias como la aeroespacial, química o automotriz; sin embargo, su aplicación en la industria de la construcción comenzó hace solo 20 años cuando ingenieros civiles observaron sus propiedades para reforzar y reparar estructuras (*Tang & Saadatmanesh, 2003*). Los grandes beneficios de este tipo de materiales, incluidos la resistencia a la corrosión, el peso ligero y principalmente la alta relación resistencia-peso, han hecho que su uso en ingeniería civil refuerce las estructuras de acero, concreto, madera y mampostería durante los últimos años. La resistencia a la corrosión hace de estos materiales una alternativa para sustituir el acero de refuerzo en las estructuras de concreto, ya que tienen una buena resistencia a la tensión. El-Ragaby et al. mencionaron que la resistencia al corte de los elementos de concreto reforzado con fibra es menor que los reforzados con la misma cantidad de acero (*El-Ragaby et al., 2007*).

En el año de 1996, se dio el uso de materiales compuestos como refuerzo en la construcción del primer puente hecho completamente con estos materiales en los Estados Unidos, lo que demuestra la ventaja de incorporar polímeros reforzados con fibra (FRP) para puentes de corto alcance (*Kalny et al., 2004*). Los avances tecnológicos

en el campo de los polímeros reforzados con fibra han llevado al desarrollo de nuevos materiales para reparar estructuras de mampostería, donde las técnicas tradicionales han fallado. Estos avances incluyen la utilización de diferentes tipos de fibras, por ejemplo, carbono, vidrio o aramida.

Se han realizado también algunos estudios que muestran que los polímeros de refuerzo mejoran el rendimiento de los elementos de mampostería expuestos a la carga sísmica. En términos de ingeniería estructural, el beneficio de aplicar el refuerzo con fibras radica en el hecho de que la masa agregada a la estructura puede ignorarse, esto es fundamental ya que cada aumento en la masa de la estructura también aumenta las fuerzas sísmicas (*Luccioni & Rougier, 2010*). Existe una variedad de soluciones para reforzar estructuras de mampostería, pero el uso de FRP adherido externamente a las paredes es una opción viable debido a su peso liviano y fácil uso (*Bui et al., 2015*).

Otro aspecto para considerar y que podría aportar distintas alternativas y soluciones en el diseño consiste en el tipo de disposición de las fibras. Las fibras podrían aplicarse a toda la cara de la pared, o adherirse en una o dos direcciones en secciones rectangulares como bandas e incluso se han ensayado de manera diagonal. Otra posibilidad para el refuerzo es la utilización de diferentes orientaciones de las fibras y aplicar diferentes números de capas y adhesivos. La variación de estas características resultará en distintas opciones que puedan ser más o menos útiles de acuerdo con las condiciones propias de la estructura a reforzar, la investigación de estos materiales también se ha enfocado en encontrar las soluciones óptimas.

Los métodos y técnicas de reforzamiento de algunos de los sistemas estructurales se estarán presentando en las siguientes líneas, se consideran trabajos con métodos tradicionales e innovadores, principalmente aquellos que incluyen materiales compuestos por fibras (FRP). Se consideran en esta revisión técnicas que han sido aplicadas en vigas, columnas y muros de distintos materiales como concreto reforzado y variedades de mampostería. Es importante resaltar que el enfoque de esta investigación es en el reforzamiento de muros de mampostería a base de bloques de concreto.

En el 2014, S. Bharracharya et al. presentaron un artículo de revisión sobre los principales métodos utilizados para el reforzamiento de muros de mampostería con

resultados muy interesantes que se podrán apreciar en las siguientes tablas, las conclusiones de cada una de las técnicas están divididas para una mayor facilidad en la comparación, tomando en cuenta distintos parámetros como el desempeño, aspecto económico, de sustentabilidad y facilidad en la construcción (*Bhattacharya et al., 2014*).

A continuación, en la tabla 5.1 se describen brevemente los métodos de reforzamiento analizados en el artículo de revisión de S. Bhattacharya et al. En la tabla 5.2 se muestran los resultados generales en términos de desempeño y eficiencia de los métodos considerados durante la revisión antes mencionada.

En las tablas 5.3 y 5.4 respectivamente, se presenta una comparativa en términos económicos de manera muy general así como una discusión de las técnicas en relación con la sustentabilidad de cada una de ellas.

Finalmente, como resultado de este artículo de revisión, la tabla 5.5 establece una comparativa que nos permite identificar si los métodos de reforzamiento son realmente prácticos en sitio, considerando que es aquí donde deberán aplicarse y no en laboratorio.

Tabla 5.1. Descripción de técnicas de reforzamiento. Fuente Bhattacharya et al., 2014

Método de Reforzamiento	Descripción
Tratamiento superficial con concreto bombeado	Consiste en construir una malla de acero o polímero en la cara exterior del muro, se coloca una capa de mortero de alta resistencia y se aplica concreto en la superficie.
Costura e inyección de epóxico/lechada	En esta técnica se inyecta epóxico o una lechada dentro de los muros para rellenar cualquier vacío o fisura que se han formado por el deterioro de la estructura. Adicionalmente, las fisuras pueden ser “cosidas” utilizando barras de acero

	y mortero.
Cemento Portland (juntas)	Cuando la mampostería es de buena calidad, pero el mortero es pobre, se reemplaza el mortero con un material con una mayor fuerza de adhesión.
Bamboo	Se utiliza bamboo como un sistema de reforzamiento, que incluye vigas de cerramiento, así como refuerzo interno vertical y horizontal.
Mosaico sísmico con materiales compuestos (GFRP)	Consiste en reforzar las caras del muro utilizando tiras verticales o diagonales de fibra de vidrio unidas con resina epóxica.
Postensado con ruedas de goma	Se ensamblan ruedas de goma con barrotes de madera y se estiran para lograr el postensado, este mecanismo es colocado en el muro en distintas orientaciones.
Confinamiento	Se utilizan columnas de concreto armado para confinar los muros de mampostería tanto en los extremos como en las intersecciones.
Malla de polímero	Se coloca una malla de polímero, preferentemente el denominado geo-grid y se envuelve alrededor del muro.
Tiras de polipropileno	Se utilizan tiras de polipropileno que son unidas en forma de malla que se adjunta a la pared con perforaciones.
Reforzamiento en juntas con refuerzos tipo L	Se utilizan en esta técnica varillas de acero colocadas en las uniones de los muros, que ha demostrado ser la sección más vulnerable de la mampostería.

Tabla 5.2. Conclusiones de las técnicas de reforzamiento. Fuente Bhattacharya et al., 2014

Método de Reforzamiento	Conclusiones
Tratamiento superficial con concreto bombeado	Incremento de la resistencia a carga lateral por un factor de 3.6 ante carga estática, así como la ductilidad del muro.
Costura e inyección de epóxico/lechada	Se puede restaurar la rigidez inicial del muro.
Cemento Portland (juntas)	No se observó una mejoría en el desempeño del muro bajo carga dinámica.
Bamboo	No hay certeza del comportamiento de los refuerzos horizontales y verticales ante sismos de baja intensidad.
Mosaico sísmico con materiales compuestos (GFRP)	Mostró efectividad para incrementar la resistencia del muro ante carga lateral, la disposición óptima fue colocadas a 45°.
Postensado con ruedas de goma	La combinación de tiras de refuerzo horizontal y vertical mejoraron la resistencia lateral del muro en un 100% e incrementaron la ductilidad.
Confinamiento	El confinamiento disminuye la deformación en el plano y ayuda a la disipación de energía de los muros.
Malla de polímero	Puede prevenir el colapso parcial o total del muro de mampostería durante sismos. Colocar la malla en ubicaciones críticas del muro puede mejorar la eficiencia del método.
Tiras de polipropileno	Demostó una mejoría en la resistencia a cortante del muro bajo carga estática, así como la mejora del desempeño bajo carga dinámica.
Reforzamiento en juntas con refuerzos tipo L	Incrementa la resistencia mediante la prevención de las fallas en las uniones de los muros.

Tabla 5.3. Características Económicas. Fuente Bhattacharya et al., 2014

Método de Reforzamiento	Características Económicas
Tratamiento superficial con concreto bombeado	Requiere una inversión inicial importante en la compra de las mangueras y bombas para el concreto, aunque se pudiera eliminar con un volumen de casas. También está la elaboración del propio concreto, la malla de acero de refuerzo y la inclusión de un trabajador experimentado, lo cual lo convierte en un método caro para comunidades pobres.
Costura e inyección de epóxico/lechada	Costo mínimo pues todos los productos ya existen y son fácilmente aplicados en los muros.
Cemento Portland (juntas)	Costo mínimo ya que solo requiere de la elaboración de un mortero con alta resistencia.
Bamboo	El costo de reforzar con elementos de bamboo es de aproximadamente el 50% de utilizar varillas de acero de refuerzo.
Mosaico sísmico con materiales compuestos (GFRP)	Aún cuando es caro el material, las pruebas indican que el método es bueno en relación costo-eficiencia.
Postensado con ruedas de goma	El costo es de 0.6 US dólar por m ² de las gomas y los conectores de madera, se puede disminuir con la producción masiva de los conectores.
Confinamiento	Tiene buena relación costo-eficiencia en nuevas construcciones. Como reparaciones incluiría demoliciones y reconstrucción de muros, haciéndolo un método caro.
Malla de polímero	El costo del material industrial geo-grid es de 2.00 US dólar por m ² , más un costo de aplicación de 19.00 US dólar por m ² .

Tiras de polipropileno	El costo de este reforzamiento en un ejemplo real en Tokio fue de 5% del costo total de la vivienda.
Reforzamiento en juntas con refuerzos tipo L	Incrementa en un 5-10% del costo total de la construcción.

Tabla 5.4. Características de Sustentabilidad. Fuente Bhattacharya et al., 2014

Método de Reforzamiento	Características de Sustentabilidad
Tratamiento superficial con concreto bombeado	Al no aprovechar la masa térmica del concreto el método no es sustentable.
Costura e inyección de epóxico/lechada	Mínima cantidad de material aplicada hace que el método sea sustentable.
Cemento Portland (juntas)	Mínima cantidad de material aplicada hace que el método sea sustentable.
Bamboo	Considerando una proceduría responsable del bamboo, el método es sustentable ya que requiere muy poco procesamiento y puede ser fácilmente desechado.
Mosaico sísmico con materiales compuestos (GFRP)	Existe un riesgo alto de liberación de gases tóxicos si los materiales compuestos son quemados en un incendio. Por otro lado, son no-corrosivos y muy durables por lo que tienen una larga vida útil.
Postensado con ruedas de goma	Es considerado sustentable por el uso de un material desperdiciado (ruedas de goma) y solucionaría un problema de contaminación en los incendios de ruedas.
Confinamiento	Es una solución que añade una gran cantidad de masa a la estructura.
Malla de polímero	La elaboración de la malla requiere el uso y procesamiento

	de petroquímicos, por lo que no es sustentable, a menos que sean reciclados.
Tiras de polipropileno	Hay una gran cantidad de material que puede ser reciclado de otros usos.
Reforzamiento en juntas con refuerzos tipo L	No tiene efecto adverso en términos de sustentabilidad.

Tabla 5.5. Características Constructivas. Fuente Bhattacharya et al., 2014

Método de Reforzamiento	Características de Construcción
Tratamiento superficial con concreto bombeado	La aplicación requiere de trabajadores entrenados y aún así se detectaron dificultades en la ejecución, de destacar el excesivo polvo y ruido.
Costura e inyección de epóxico/lechada	No requiere mucho conocimiento técnico y los materiales pueden ser fácilmente transportados y aplicados.
Cemento Portland (juntas)	No requiere mucho conocimiento técnico. Sin embargo, trabajos temporales pueden necesitarse para dar soporte a la estructura.
Bamboo	Si es añadido en el exterior del muro el método es fácil de aplicar, pero generará problemas en las aberturas.
Mosaico sísmico con materiales compuestos (GFRP)	La manufactura de la fibra de vidrio debe ser bajo condiciones controladas. Para el reforzamiento, es fácil aplicar, así como inspeccionar y mantener.
Postensado con ruedas de goma	El reforzamiento es sencillo, pero se tendrán protuberancias saliendo de los muros que son difíciles de cubrir, por lo tanto, tendrá un impacto negativo arquitectónicamente hablando.

Confinamiento	La aplicación es muy intrusiva, requiere demolición de muros y se ocupa colocar vigas de atado para que sea efectivo.
Malla de polímero	La dureza y poca flexibilidad del material hace que la aplicación sea difícil.
Tiras de polipropileno	El reforzamiento con este método es muy sencillo.
Reforzamiento en juntas con refuerzos tipo L	No se requieren trabajadores expertos para utilizar este método.

En resumen, las investigaciones a través de los últimos 20 años se han enfocado en encontrar técnicas de reforzamiento estructural que se puedan utilizar tanto para la elaboración de nuevas edificaciones como para la rehabilitación de aquellas que han sido dañadas principalmente por sismos. Los investigadores han buscado nuevos materiales que posean mejores características para estas tareas que los utilizados tradicionalmente, es por eso que existe una línea de investigación importante en el uso de materiales compuestos por fibras, los cuales han tenido un gran desempeño en otras industrias como la aeroespacial y automotriz y se busca obtener beneficios similares en la industria de la construcción.

5.1. Reforzamiento Estructural de Vigas y Columnas

En el 2004, Robertson y Johnson presentaron los resultados correspondientes a reforzar las conexiones entre columna y losa utilizando polímero a base de fibra de carbono (CFRP) y material epóxico (*Robertson & Johnson, 2004*). Las fallas en estas zonas de las estructuras se han presentado a lo largo de la historia de eventos sísmicos, donde el acero de refuerzo no está bien colocado o no es suficiente para evitar el desprendimiento del muro, provocando de esta manera el colapso de estos elementos. El uso de CFRP en los edificios es relativamente simple, rápido de instalar y no es muy visible después de su colocación.

El reforzamiento colocando capas de CFRP en la conexión de la losa de concreto con la columna donde ya se presentó una falla, así como la utilización de epóxico en las fisuras de la columna, demostró ser efectivo para recuperar la capacidad de carga lateral así como reestablecer la rigidez inicial de la conexión. Si únicamente se utiliza el epóxico en fisuras solamente se recupera la capacidad de carga lateral pero no la rigidez inicial. La configuración óptima se obtiene cuando se coloca la fibra de carbono en la parte superior de la losa.

En el año 2006, Ozbakkaloglu y Saatcioglu condujeron una investigación para determinar el comportamiento sísmico de columnas de concreto reforzado de alta resistencia confinadas por tubos de polímeros reforzados con fibra (FRP), utilizando carbono como el material para estos polímeros. Para las pruebas, columnas de concreto con una resistencia a la compresión entre 50-90 MPa fueron coladas en tubos de FRP a base de carbono y fueron ensayadas con una carga axial constante y una carga lateral con incrementos, así como una fase reversa, simulando de esta manera la combinación que rige durante un sismo. La principal conclusión de estas pruebas es que las columnas confinadas con fibra de carbono pueden desarrollar un comportamiento extremadamente dúctil bajo cargas sísmicas (*Ozbakkaloglu & Saatcioglu, 2006*).

El uso de CFRP también se ha ensayado en uniones entre vigas y columnas, en el 2011 Al-Salloum et al. estudiaron la efectividad del uso de este material para incrementar la resistencia a cortante y la ductilidad de una unión deficiente de los elementos mencionados. Para llevar a cabo esta investigación, se crearon dos especímenes, el primero de ellos se elaboró conforme a la práctica mientras que el segundo se diseñó de acuerdo con los códigos modernos del ACI para concreto reforzado. Ambos especímenes fueron ensayados ante carga cíclica y el primero de ellos fue después reparado mediante la aplicación de epóxico en las fisuras y en la superficie colocando capas de fibra de carbono en la unión y partes de la viga y la columna. Las conclusiones de este estudio incluyen que el uso de capas de CFRP aumenta la resistencia a cortante y la capacidad de deformación de una unión con deficiente comportamiento sísmico. El incremento está en función de la cantidad de capas que se utilicen en el refuerzo. También se demostró que el uso de CFRP puede aumentar la capacidad para disipar energía (*Al-Salloum et al., 2011*).

En el 2014 se presentó un artículo por Motaref et al. mostrando los resultados de un estudio realizado a columnas de concreto reforzado donde se utilizó una envoltura a base de polímero de fibra de carbono (CFRP) en el cual se ensayaron en una mesa vibratoria replicando el sismo de Sylmar. Las columnas reparadas con CFRP aumentaron su resistencia y ductilidad, el aumento fue de aproximadamente 45% de acuerdo con los ensayos de laboratorio. Además de lo anterior, la envoltura la proporciona a la columna un confinamiento en zonas donde no se pudiera conseguir con acero de refuerzo (*Motaref et al., 2014*).

En el 2015, Lee realizó una investigación en la que proponía reforzar marcos de concreto reforzado con arriostramientos en forma de X a base de polímero de fibra de carbono. Tradicionalmente estos arriostramientos se colocan de acero y muestran fallas frágiles en las conexiones con el edificio o fallas por pandeo en los propios elementos de acero que se encuentran sometidos a fuerzas de compresión. Las pruebas consistieron en ensayar marcos de concreto a los cuales se les colocó arriostramientos en forma de X con cables fabricados a base de fibra de carbono unidos mediante placas y pernos a las columnas del marco. La aplicación de la carga fue tanto en sentido vertical como horizontal de forma cíclica (*Seok, 2015*).

La conclusión del estudio muestra una serie de ventajas comparado con el método tradicional con arriostramientos de acero entre las cuales se destacan una mejoría en la relación resistencia-peso, se evita la compresión en los elementos y la conexión permite controlar la deflexión de una mejor manera. La resistencia de los especímenes reforzados resultó de 1.7 veces la de los especímenes de control mientras que la deformación fue similar para ambos grupos.

En el 2016, Seok et al. utilizaron una técnica distinta a las mencionadas anteriormente en este capítulo en el reforzamiento de columnas de concreto a través de polímeros de fibra de carbono (CFRP). La diferencia con respecto a los métodos anteriores radica en el método de aplicación del refuerzo, en este estudio se utilizó en forma de espray. Como ya se ha venido mencionando, el uso de estos materiales a diferencia de las técnicas tradicionales, no añaden una significativa masa a la estructura, por lo que para refuerzo para desempeño sísmico son una muy buena alternativa que cada vez se estudia más. Sin embargo la colocación de la fibra en capas puede ser

complicada por la preparación de la superficie, dificultades en las uniones y el costo elevado, por lo que la investigación presentada consistió en generar una mezcla de fibras con resina que pudiera ser aplicada en forma de spray directamente en la superficie de las columnas.

Las pruebas consistieron en la elaboración de especímenes de columnas de concreto reforzado, dejando una como testigo y las otras fueron reforzadas con el spray antes mencionado con distintas combinaciones de cantidad de fibras y resina. El incremento en la resistencia a cortante en las columnas fue sustancial comparado con la columna testigo, este aumento fue de aproximadamente 31% para la combinación óptima encontrada. El desplazamiento también registró un resultado positivo, al disminuir en un 40% en relación a la columna sin refuerzo. La investigación concluye entonces en que la utilización de CFRP con la técnica de spray es efectiva para reforzar una columna y mejorar de esta manera su desempeño sísmico (*Seok et al., 2016*).

En el 2020 se presentó un artículo que demostraba la eficiencia de reforzar columnas de mampostería dañada con un material compuesto denominado BTRC (Basalt Textile Reinforced Concrete). Los materiales textiles (TRC) han generado un gran interés debido a sus propiedades tales como alta resistencia a la corrosión, esfuerzo último alto y un peso ligero entre otros. BTRC es un tipo de TRC que utiliza basalto en forma de fibra, el material es considerado amigable ambientalmente y con muy buenas características mecánicas. Los ensayos consistieron en reparar columnas de mampostería con este tipo de concreto y comparar el comportamiento de columnas sin el material. Uno de los resultados más importantes del estudio mencionado, es que el reforzamiento aumentó la ductilidad de la mampostería (*Wang et al., 2020*).

5.2. Reforzamiento Estructural de Muros

Las paredes de mampostería se han reforzado tradicionalmente con diferentes métodos o técnicas, por ejemplo, al incorporar marcos de concreto para reducir las cargas en las paredes, o tratamientos en la superficie de estas, utilizando barras de refuerzo de acero. Con frecuencia, estas técnicas agregan una cantidad significativa de masa a la estructura, consumen mucho tiempo y aumentan los costos de construcción (*Luccioni & Rougier, 2010*).

En el 2003, Paterson y Michell presentaron un artículo con los resultados de reforzar muros de cortante de concreto con una envoltura a base de fibra de carbón. Los muros fueron evaluados para comportamiento sísmico aplicando cargas cíclicas laterales. Los elementos reforzados corresponden a un edificio de 1960, por lo que no cumple con los códigos actuales y representa así la realidad de muchas edificaciones que quizá presentan fallas similares. Los muros se reforzaron con una configuración de bandas de horizontales de fibra de carbono (*Paterson & Mitchell, 2003*).

Los resultados de la investigación demostraron un incremento en la ductilidad de los especímenes reforzados, la ductilidad de los muros de control se determinó como 1.5 mientras que para los muros con fibra de carbono este parámetro tuvo un valor de 3.8. La capacidad de absorber energía también mostró un incremento, en este caso de 7 veces con relación a los muros sin refuerzo. Se ensayaron también muros que tenían una mejor ductilidad y el resultado fue similar, los especímenes sin refuerzo tuvieron una ductilidad de 4.0 mientras que los reforzados con fibra de carbono resultaron en 6.3. Se concluyó con esto que el método es efectivo para reforzar muros en términos de ductilidad y resistencia a fuerza cortante, es decir, su desempeño sísmico.

En este mismo año, Kuzik et al. realizaron una investigación en muros de mampostería reforzados con polímeros a base de fibra de vidrio (GFRP) en forma de hojas. El estudio estuvo enfocado en demostrar la resistencia a flexión de los muros con este tipo de refuerzo, es decir, fuerzas fuera del plano. Los muros fueron elaborados a escala real y ensayados ante carga cíclica, la particularidad del estudio es que hicieron grupos en los cuales variaron la cantidad de GFRP para obtener el impacto que este material tenía en el desempeño del muro.

Los resultados de la investigación demostraron que el desempeño de los muros de mampostería reforzados externamente con GFRP fueron excelentes. A excepción de la aparición de fisuras visibles, los muros mantuvieron su integridad estructural durante la aplicación de la carga cíclica con solamente una pequeña degradación de rigidez. Se concluyó entonces que el sistema puede ser utilizado con grandes ventajas para rehabilitar estructuras de mampostería que no son adecuados para soportar cargas sísmicas (*Kuzik et al., 2003*).

En el 2005, ElGawady et al. estudiaron la respuesta sísmica dentro del plano de muros de mampostería reforzados con polímeros a base de fibra (FRP). El experimento consistió en ensayar un grupo de muros sin refuerzo ante carga lateral dinámica y una vez que se presentó la falla estos fueron rehabilitados con FRP en una de sus caras y nuevamente sometidos a la misma carga lateral. Las conclusiones de este estudio demostraron que el uso de FRP como método de reforzamiento son prometedores ya que aumentaron la resistencia a carga lateral del muro casi 3 veces. Además observaron que ocurre un desprendimiento de las fibras adheridas al muro en el intervalo del 50 al 80% de la capacidad última por lo que esto limitaría un poco el incremento en resistencia (*ElGawady et al., 2005*).

Un año después, Korany y Drysdale probaron una técnica distinta a lo que se venía realizando en términos de reforzamiento de muros con polímeros reforzados con fibras. En esta investigación buscaron proponer una alternativa innovadora en reforzamiento que fuera aplicable a edificios históricos y otras estructuras de mampostería enfocados en que fuera costo-efectiva. La técnica propuesta consistía en la colocación de cables flexibles de FRP combinados con material epóxico en las uniones de la mampostería (*Korany & Drysdale, 2006*).

En la experimentación se utilizaron muros de tamaño real los cuales fueron sometidos a carga lateral hasta la falla, una vez que se alcanzó este punto, los muros fueron reforzados con cables de FRP y nuevamente sometidos a la carga lateral para evaluar su comportamiento. Los ensayos demostraron incrementos significativos en la capacidad de los muros, absorción de energía, así como mejor desempeño en la

deformación. La resistencia tuvo un aumento de hasta 25% en los especímenes y la energía se puede absorber de 2 a 4 veces más que los muros sin refuerzo.

En el año 2007 Almusallam y Al-Salloum investigaron la efectividad de utilizar polímeros reforzados con fibras (FRP) en el reforzamiento de muros de mampostería que están rodeados por marcos de concreto reforzado y que en teoría no deberían recibir tantas cargas. Sin embargo estos muros de mampostería comúnmente sufren daños durante eventos sísmicos por estar sometidos a cargas dentro del plano, de ahí la necesidad de buscar una solución para reforzar o reparar este tipo de estructuras (*Almusallam & Al-Salloum, 2011*).

Durante la investigación, se elaboró un espécimen de mampostería el cual fue llevado a la falla mediante la aplicación de carga cíclica lateral para ser reparado con fibra de vidrio (GFRP) y nuevamente ser sometido a carga cíclica hasta la falla. Adicionalmente se elaboró un muro que fue reforzado con GFRP desde el inicio y se sometió a la misma prueba. El refuerzo en los dos casos fue a base de bandas horizontales en ambas caras de los muros. Los resultados indicaron un considerable aumento en la resistencia y ductilidad de los muros con refuerzo así como un incremento en la capacidad de deformación de un 300%.

En el 2010, Li y Leong realizaron ensayos en muros de concreto reforzado que fueron reparados utilizando polímeros reforzados con fibras (FRP). El estudio consistió en obtener el desempeño sísmico de los muros mediante la aplicación de carga axial constante y una carga cíclica lateral hasta alcanzar la falla, una vez alcanzando el colapso, los muros se reforzaron con FRP para determinar la eficiencia del método de reforzamiento y de los materiales utilizados. Este estudio permite conocer si los muros pueden o no recuperar sus capacidades estructurales iniciales (*Li & Leong, 2010*).

Los muros fueron reforzados con capas que cubrieron toda la superficie de estos, utilizando tanto fibra de vidrio (GFRP) como fibra de carbono (CFRP) para este propósito. Los resultados demostraron un aumento en la capacidad de carga a flexión de los muros, siendo el CFRP quien mostró un mejor desempeño como material de refuerzo. La resistencia a fuerza cortante también presentó un aumento en los muros reforzados, así como la cantidad de energía disipada, la cual fue significativamente

mayor a la de los muros originales. El desprendimiento de las fibras pudiera tener un impacto negativo en estos incrementos, por lo que se deberá tener en cuenta en futuras investigaciones como mejorar la adhesión de los materiales.

Un estudio publicado en el 2011 por Santa-Maria y Alcaino, demostró la reparación de muros de mampostería que habían sufrido fallas por cortante dentro del plano, esta es la fuerza típica generada durante un evento sísmico y que se ha encontrado muy comúnmente en edificios que han sufrido daños estructurales como se indicó en la sección anterior. El refuerzo de los muros de ladrillos fue utilizando fibra de carbono (CFRP) de manera externa. Los ensayos se realizaron en muros sin daño previo y muros con daños previos, ambos grupos fueron reforzados externamente con franjas de fibra de carbono, dispuestos en un caso de manera diagonal en forma de X mientras que en el otro caso se colocaron en el sentido horizontal y todos los muros fueron sometidos a carga horizontal dentro del plano, así como carga vertical. Los resultados indicaron un incremento en la resistencia a cortante similar en todos los especímenes (*Santa-Maria & Alcaino, 2011*).

En el 2011, Kakaletsis realizó un estudio para reparar muros y marcos a base de concreto reforzado y mampostería para posteriormente ser sometidos a cargas horizontales cíclicas similares a las ocasionadas durante un sismo para ver el comportamiento de estas estructuras. Las técnicas utilizadas consistieron principalmente en el uso de resina epóxica en las fisuras generadas en los marcos dañados, colocación de capas externas de CFRP adheridas con polímero y un tercer método utilizando barras diagonales también de CFRP como un tipo de refuerzo externo (*Kakaletsis, 2011*).

Los resultados de laboratorio del estudio anterior demostraron que los muros reforzados con fibra de carbono exhibieron una igual o más alta resistencia y rigidez en los especímenes con refuerzo que aquellos que no fueron reparados. Otro aspecto importante es que los elementos con CFRP presentaron ante la misma carga cíclica una significativa cantidad menor de absorción de energía, lo que evita que lleguen al colapso. Adicionalmente se detectó que las fallas que se presentaron en los muros reforzados coinciden con una separación de las capas de CFRP de la superficie del muro, por lo que es importante para este tipo de métodos considerar un polímero con mejor capacidad de adherencia para mejorar el desempeño sísmico del elemento estructural.

La respuesta ante cargas cíclicas estáticas de los muros de mampostería reforzados con fibra de carbono (CFRP) fue estudiada en el 2012 por Farooq et al. Para esto, se elaboraron especímenes de muros solidos de ladrillo de arcilla de acuerdo con como se construyen típicamente y fueron reforzados externamente mediante la adhesión de bandas de CFRP dispuestas de forma diagonal adheridas con resina epóxica. En el estudio también se elaboraron especímenes iguales a los descritos, pero en lugar de CFRP se reforzaron con barras diagonales de acero, con esto se logró una comparación entre estas dos opciones de reforzamiento (*Farooq et al., 2012*).

Los resultados demostraron un incremento en la resistencia ante carga lateral de los muros reforzados, 2.14 y 1.57 veces los de CFRP y acero respectivamente en relación con los especímenes sin refuerzo. Los desplazamientos laterales observados en la falla fueron también mayores, en este caso de 4.28 y 3.4 veces los muros con CFRP y acero. Finalmente, también la ductilidad registró un aumento en ambos materiales utilizados en factores de 1.97 y 2.67 veces para el espécimen con CFRP y acero respectivamente, esto resulta en una mejoría significativa en el desempeño sísmico de los muros de mampostería.

En este mismo sentido, Layssi et al. presentaron en este mismo año los resultados de una investigación en donde determinaron la respuesta sísmica de muros de cortante de concreto reforzado antes y después de repararlos con fibra de carbono (CFRP). Para esto se elaboraron muros de escala real con el espesor mínimo requerido por el ACI de 15 cm los cuales fueron sometidos a carga cíclica lateral hasta llevarlos a la falla. Posteriormente se repararon utilizando una envoltura de fibra de carbono y volvieron a ser sometidos al mismo tipo de carga para evaluar su desempeño. Los resultados de los ensayos demostraron que el refuerzo con una mínima cantidad de CFRP permite demorar el colapso del muro y evitar la falla por cortante al aumentar la ductilidad y capacidad de desplazamiento de los muros. También se observó que el refuerzo ayuda a incrementar la energía disipada (*Layssi et al., 2012*).

Otro esfuerzo por determinar el comportamiento sísmico de muros reforzados con polímeros de fibras, en este caso de carbono, fue realizado por El-Sokkary y Galal en el 2013. En su investigación crearon 3 muros de cortante a base de concreto

reforzado, uno de los especímenes fue solamente para control mientras que los otros dos fueron reforzados externamente con fibra de carbono en dos esquemas distintos de reforzamiento. El primer esquema consistió en colocar bandas de manera vertical y horizontal en una sola cara del muro mientras que el segundo consideró bandas diagonales en las dos caras del muro. Una vez elaborados los elementos fueron sometidos a carga axial constante y carga lateral con incrementos (*El-Sokkary & Galal, 2012*).

Los resultados nuevamente demostraron un mejor desempeño de los muros reforzados. La configuración del primer esquema tuvo incrementos del 46% y del 50% en la resistencia ante carga lateral y ductilidad respectivamente en relación con el muro control sin refuerzo. El segundo esquema de reforzamiento arrojó un incremento del 19% y del 15% en la resistencia lateral y ductilidad, para estas pruebas, el primer esquema de refuerzo obtuvo los mejores resultados. Adicionalmente, la capacidad de flexión también aumentó en un 80% y 50% para los esquemas de reforzamiento 1 y 2 respectivamente.

En el mismo 2013 se presentó un estudio por Popa et al. en donde utilizó polímeros reforzados con fibra para reforzar muros de mampostería, considerando que estas estructuras representan el tipo de edificio más vulnerable ante cargas sísmicas en Rumania. La investigación buscaba demostrar la eficiencia de distintas técnicas de reforzamiento y estaba enfocada en la resistencia lateral así como la capacidad de desplazamiento de los muros. Los especímenes fueron contruidos a base de ladrillos solidos y fueron posteriormente reforzados con capas de polímeros, algunos de fibra de vidrio (GFRP) y otros de fibra de carbono (CFRP). Estos especímenes fueron ensayados aplicando carga vertical constante y aplicaciones de carga lateral estática. Esta investigación demostró que el uso de una cantidad moderada de capas de fibras en ambas caras es el mejor mecanismo para reforzar muros. El incremento en la resistencia en los muros resultó de aproximadamente 20% aunque el aumento en la capacidad de desplazamiento no fue significativo (*Popa et al., 2013*).

Durante el 2014, Bischof et al. publicaron una investigación sobre la reparación de muros de mampostería utilizando hojas de CFRP, adicionalmente en el estudio también analizaron detalles referentes a la adhesión de las hojas a los muros para encontrar una posible relación entre la falla del anclaje y la resistencia a cortante del

muro. Es decir, el estudio se centró en encontrar el beneficio de utilizar CFRP así como la influencia que tiene el mecanismo de anclaje en el desempeño de la solución (*Bischof et al., 2014*).

La investigación se realizó con especímenes a base de ladrillo de arcilla reforzados con dos tipos de CFRP y resina para la adherencia de las fibras a los muros. Se utilizó un grupo de muros testigo sin ningún tipo de refuerzo y además se crearon distintos grupos con diferentes configuraciones de refuerzo que incluían solamente bandas verticales y grupos con una combinación de bandas diagonales y verticales. Los resultados de los ensayos demostraron un incremento en la resistencia ante carga lateral de los muros reforzados de un 70% en relación a los especímenes testigo mientras que se obtuvo también un aumento del 10% en la capacidad de deformación con la utilización de CFRP.

En un artículo presentado en el 2019, Honarparast et al. se muestran los resultados del reforzamiento con polímero de fibra de carbono de manera externa sobre muros de cortante y vigas de concreto reforzado, la disposición de las fibras fue de manera diagonal en ambos elementos. Para determinar la cantidad de refuerzo de fibra, se calculó el equivalente a este mismo refuerzo con barras de acero, que es como tradicionalmente se utiliza, pero es complicado por métodos constructivos, así se obtuvo entonces el ancho, longitud y número de capas requerido para que la resistencia a tensión sea equivalente a la provista por el acero de refuerzo (*Honarparast et al., 2019*).

Los resultados obtenidos en el estudio mencionado anteriormente, demostraron que el uso de capas de CFRP genera un aumento sustancial en la capacidad de carga, deformación, resistencia, ductilidad y capacidad de disipación de energía con respecto a los especímenes no reforzados. También se observó un importante incremento en cuanto a la resistencia a cortante de los elementos reforzados (*Honarparast et al., 2019*).

Cuando se refiere a diseño por sismo, la ductilidad es un parámetro muy favorable para evitar el colapso en las estructuras, recordemos que este es el principal objetivo de diseño para cualquier tipo de estructura y cualquier intensidad esperada de los eventos sísmicos. En el estudio anterior, el espécimen de concreto reforzado

únicamente mostró una ductilidad de 1.2 la cual es muy baja, mientras que el espécimen que se reforzó con CFRP alcanzó una ductilidad de 6.2.

Durante el 2019, se presentó un estudio para el reforzamiento de estructuras de mampostería que presentaba daños similares a los producidos por fuerzas sísmicas en un laboratorio. El método consistía en la colocación de mallas de cables metálicos en cuadrículas, dispuestas como si fueran bandas de curación médicas, estas bandas se adherían al muro y se colocaba algún material cementante. Este método puede rápidamente reestablecer la resistencia de los muros dañados. Los resultados publicados indican que la técnica descrita permite recuperar el total de su rigidez y resistencia ya que los ensayos efectuados en especímenes con falla y sin falla resultaron prácticamente iguales. Existen distintas posibilidades aún sin explorar, por ejemplo, cubrir un área mayor del muro con las mallas, cambiar la orientación o forma de las mallas, así como utilizar distintos morteros como cementantes (*Soheil et al., 2019*).

En un estudio presentado por Mustafaraj y Yardim en el 2019, se observó la utilización de tres distintos materiales para reforzar muros de mampostería, uno de ellos tradicional, a base de un encamisado de acero mientras que utilizó dos métodos innovadores a base de polipropileno y polímero reforzado a base de fibra de carbono, material compuesto que ha tomado un auge en la ingeniería civil en los últimos años (*Mustafaraj & Yardim, 2019*).

Las pruebas realizadas en el estudio mencionado el párrafo anterior se iniciaron mediante la carga a compresión diagonal de muros sin reforzar, y una vez que alcanzaron la falla, fueron reforzados con las tres técnicas descritas. Los muros utilizados fueron fabricados a base de ladrillo y se crearon 3 especímenes para cada uno de los materiales de reforzamiento.

El uso del polipropileno consistió en colocar una capa de 25 mm que contiene una mezcla de cemento, arena y fibras de polipropileno. Para el método del encamisado de acero se colocó una malla de acero galvanizado anclado al muro en ambas caras cubriendo la totalidad del espécimen y también con una capa de mortero de un espesor de 25 mm. Finalmente, el refuerzo con el polímero de fibra de carbono consiste en la aplicación de bandas de 300 mm de ancho dispuestos en forma diagonal adhiriéndose al

muro con una resina epóxica, una vez colocada la banda, se agrega resina epóxica para sellar el material.

Los resultados obtenidos por Mustafaraj y Yardim, indicaron el incremento en algunos de los parámetros mecánicos más importantes en la resistencia de la mampostería, citando los incrementos relacionados con la resistencia a cortante, los muros reforzados con polipropileno resultaron tener una resistencia en promedio de 3.5 veces la de los muros sin refuerzo. Los especímenes ensayados con malla de acero mostraron un incremento de 4.23 veces con relación a los que no tenían refuerzo. Finalmente, los muros reforzados con fibra de carbono, mostraron en promedio un incremento en la resistencia a cortante de 3.5 veces con respecto a los muros sin refuerzo (*Mustafaraj & Yardim, 2019*).

Durante el 2020 se presentó una investigación en la que se buscaba aumentar la resistencia fuera del plano de muros de mampostería mediante la utilización de un material compuesto geotextil, combinado con resina epóxica. Para el estudio se crearon muretes con variaciones en la colocación del refuerzo, utilizando barras horizontales, diagonales y muros con barras diagonales y horizontales formando una cuadrícula, además se crearon muretes sin ningún tipo de refuerzo para poder hacer la comparación de resultados. Se encontró que la curva de carga-deformación fue significativamente mejorada con las opciones de reforzamiento. Adicionalmente, se observó un incremento en la capacidad de carga de los muros reforzados diagonalmente en aproximadamente un 30% y este patrón de colocación de refuerzo fue el que mejor comportamiento tuvo (*Khan & Nanda, 2020*).

Los resultados de las investigaciones presentadas coinciden en el incremento de la resistencia a cortante y rigidez de los muros de mampostería, características que proporcionan un gran beneficio al desempeño sísmico de estas estructuras, por lo que se puede utilizar para reforzamiento y rehabilitación. El material más utilizado en las pruebas de laboratorio es el ladrillo, esto debido a que es el sistema más común en Europa en lo que se refiere a mampostería.

Asimismo, se observa que existe una gran cantidad de opciones y configuraciones que se pueden adoptar para este reforzamiento, la mayoría de los

investigadores coinciden en que la fibra de carbono es la que otorga los mejores resultados. Los estudios en los años más recientes se enfocan en encontrar puntos de equilibrio costo-beneficio y entregar más resultados que se traduzcan en una confiabilidad estructural para su utilización en la práctica.

6. Metodología

6.1. Metodología general de la investigación

La metodología de esta investigación consistió en definir una problemática con un enfoque social y que esta pudiera ser resuelta de una manera técnica a través del análisis estructural. Desde un inicio se buscó generar una solución a los problemas detectados ante la ocurrencia de eventos sísmicos no solamente en la región de Baja California si no en todo el país e incluso en aquellos países de Latinoamérica en donde se utiliza un mismo sistema constructivo. Se llevó a cabo una recopilación de literatura con respecto a este tema en donde se definen cuáles han sido los efectos de los sismos que se han presentado en los últimos años y principalmente se buscó la afectación de estructuras para viviendas, aún más específicamente en aquellas en las que su sistema constructivo principal es a base de mampostería.

Adicionalmente, se buscó bibliografía referente a las distintas técnicas que se han utilizado a través de los años para reforzar estructuras que presentan fallas estructurales. Estas fallas se encuentran en elementos como vigas, columnas, losas y muros. En esta investigación el enfoque es hacia los muros, ya que como se mencionó anteriormente, la estructura de principal interés en este estudio es la vivienda. Las técnicas comúnmente utilizadas consisten en agregar refuerzos generalmente de acero o concreto, lo cual añade una cantidad importante de masa a la estructura, esto en términos de diseño sismorresistente no es lo más conveniente.

Durante el desarrollo de la investigación, se hizo una también una revisión de literatura sobre la utilización de materiales compuestos a base de fibras y polímeros dentro de la ingeniería civil, y más específicamente dentro de la ingeniería estructural. Los materiales descritos anteriormente han sido comúnmente utilizados en la industria aeroespacial, esto debido a que ofrecen muy buenas propiedades de resistencia y ligereza, atributo que puede ser de gran beneficio para el reforzamiento de estructuras civiles sin que esto represente añadir una gran cantidad de masa a las mismas.

En los hallazgos de las investigaciones antes mencionadas destacan el reforzamiento de elementos estructurales con un tipo de material compuesto, fibra de carbono con una resina polimérica la cual se ha utilizado en los últimos años para reforzar vigas y columnas de concreto estructural, principalmente aquellas que han presentado algún tipo de falla con la finalidad de repararlas.

Una vez definida la problemática que se buscó atender a través de esta investigación, se desarrolló una metodología técnica basada en la experimentación y análisis de resultados, con la cual se determinó la cantidad de incremento en la resistencia de los muros de mampostería al aplicar fibra de carbono para reforzarlos.

La primera parte de esta experimentación consistió en la determinación de las pruebas a utilizar, en el caso de México, la norma NMX-464-ONNCCE-2010 indica claramente las condiciones para que se lleven a cabo las pruebas y se obtengan resultados confiables. Se requiere entonces, para los parámetros que se buscaron, resistencia a la compresión, resistencia a cortante así como módulo de elasticidad y módulo de corte, todos ellos de la mampostería, efectuar la prueba de compresión axial simple así como la de tensión diagonal. Una vez que se elaboraron las muestras requeridas y se efectuaron los ensayos de laboratorio según el código referenciado, se analizan los resultados mediante una comparativa de los datos en muros no reforzados con aquellos obtenidos en los muros a los que se les aplicó refuerzo a base de fibra de carbono y resina polimérica.

6.2. Metodología técnica

Para reforzar las paredes de mampostería con FRP y evaluar el aumento de su rigidez, se construyeron cuatro grupos de unidades de mampostería hueca de concreto. Dos de ellos (grupo 1) actuaron como un grupo de control sin refuerzo y los dos restantes (grupo 2) se reforzaron con fibra de carbono.

Una vez contruidos los muros como se describió, se prueban bajo compresión axial y diagonal, obteniendo tanto la resistencia a la compresión como la resistencia al corte de la mampostería. Adicionalmente, se determinan los módulos de elasticidad y corte con dichas pruebas. Los cálculos que se realizaron son de acuerdo la norma NMX-464-ONNCCE-2010 como se muestran más adelante en este documento.

6.2.1. Materiales

Se utilizan bloques de concreto huecos para construir las paredes, los bloques enteros deben tener dimensiones de 40 centímetros de largo, 20 centímetros de ancho y 20 centímetros de espesor. Los bloques medios deben medir 20 centímetros de largo, 20 centímetros de ancho y 20 centímetros de espesor (ver imagen 6.1).

La resistencia a la compresión especificada de las unidades es de 60 kg/cm^2 , el mortero utilizado en las muestras tendrá una resistencia a la compresión de 125 kg/cm^2 .



Figura 6.1. Bloque hueco de concreto - Fuente: industrialbloquera.com.mx

El tejido utilizado para reforzar las paredes de mampostería debe ser fibra de carbono unidireccional, con una resistencia a la tracción de 28.150 kg/cm^2 y un módulo de tracción de $1.4 \times 10^9 \text{ kg/cm}^2$. Para agregar el tejido a las paredes, se usó resina epoxi para impregnar las fibras y la superficie de las paredes. Esta resina es seleccionada para maximizar la resistencia de la fibra de carbono. (Ver imagen 6.2)

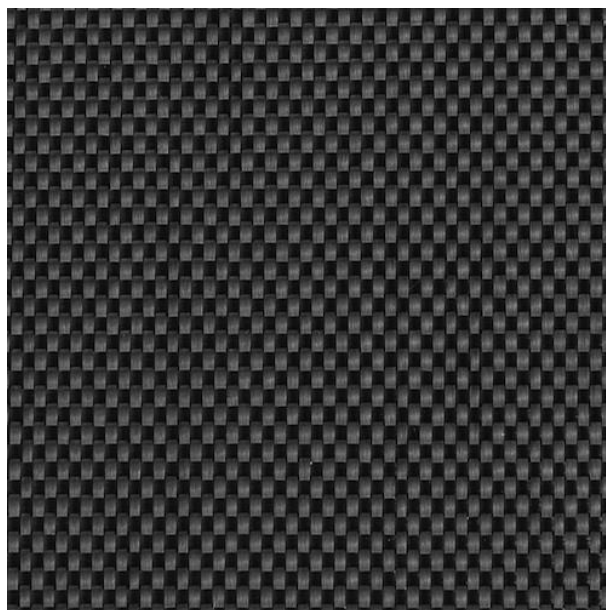


Figura 6.2. Fibra de carbono - Fuente:

<https://www.kitcarbono.com/productos/view/CARBON-UNCERTIFIED-2-Tejido-de-fibra-de-carbono-Plain-3k-10m-Kitstuff>

6.2.2. Especímenes

Los especímenes son elaborados y probados de acuerdo con las prescripciones NMX-C-464-ONNCCE-2010, que establecen que las paredes deben construirse de manera similar a como se construyen en estructuras de mampostería real en el campo.

Para la prueba de compresión axial, se elabora un muro formado por tres hileras de bloques enteros y unidos con mortero como se aprecia en la imagen 6.3. Para la prueba mencionada se deben ensayar 3 especímenes de acuerdo con el estándar considerado, por lo que se crearon 6 muestras, 3 de ellas sin refuerzo, definidas como C11, C12 y C13. Se elaboraron adicionalmente 3 muestras reforzadas con fibra de carbono, identificadas como C21, C22 y C23.

En el caso de la prueba a compresión diagonal, los muros deben estar formados por 3 hileras de bloques donde cada hilera consiste de una pieza entera y una media, unidos con mortero en ambos sentidos como se observa en la imagen 6.4. Para esta prueba se deben elaborar de acuerdo a la normativa utilizada, 3 especímenes para que tenga

validez, por lo tanto se identifican como S11, S12 y S13 las 3 muestras de mampostería sin refuerzo y S21, S22 y S23 los muros que se reforzaron con fibra de carbono.



Figura 6.3. Muros de mampostería no reforzados para pruebas de compresión - Fuente: elaboración propia.



Figura 6.4. Muros de mampostería no reforzados para pruebas de compresión diagonal - Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a lo descrito en los anteriores párrafos, se utilizaron cuatro grupos de muestras como se establece en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Descripción de los especímenes - Fuente: elaboración propia.

Grupo	Ancho (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Condición
C1	40	60	20	No Reforzado
C2	40	60	20	Reforzado con fibra de carbono
S1	60	60	20	No Reforzado
S2	60	60	20	Reforzado con fibra de carbono

La disposición utilizada para las muestras de compresión y corte consistió en cuatro capas de fibra de carbono en ambas caras de las paredes, utilizando la configuración 0/+45/-45/90 para la orientación de las fibras como se muestra en la imagen 6.5.



Figura 6.5. Muros de mampostería reforzada para ensayos de compresión - Fuente: elaboración propia.

6.2.3. Prueba de compresión axial

Las pruebas de compresión axial se realizan de acuerdo con los requisitos de NMX-C-ONNCCE-464-2010 para los especímenes C11, C12, C13, C21, C22 y C23 y con estos ensayos se determinó la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de las paredes reforzadas y no reforzadas. La aplicación de la carga así como el arreglo de las muestras se exponen en la imagen 6.6.



Figura 6.6. Aplicación de carga axial a muestras C1 - Fuente: elaboración propia.

La resistencia a la compresión se calcula a partir de la ecuación 6.1, que incluye la carga máxima aplicada a la pared, así como el grosor y el ancho de la muestra. Las especificaciones de prueba establecen que el promedio de al menos tres paredes es la resistencia a la compresión de la mampostería.

$$f_m = \frac{P}{t \cdot b}$$

Ecuación 6.1. Resistencia a compresión de mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010)

Dónde:

f_m = Resistencia a la compresión de la mampostería.

P = Carga máxima aplicada.

t = Espesor de la pared.

b = Ancho de la pared.

A partir de esta prueba se calcula el módulo de elasticidad de la mampostería con la ecuación 6.2, de acuerdo con NMX-C-464-ONNCCE-2010. Se necesita un mínimo de diez lecturas entre la carga inicial y el 50.0% de la carga máxima estimada. Esto se hace para obtener curvas de tensión-deformación.

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005}$$

Ecuación 6.2. Módulo de elasticidad de mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010)

Dónde:

E_m = Módulo de elasticidad de la mampostería.

σ_2 = Esfuerzo axial correspondiente a 0,000050 de deformación total.

σ_1 = Tensión axial correspondiente al 40% de la carga máxima.

ε_2 = Deformación producida por la tensión σ_2 .

6.2.4 Prueba de Compresión Diagonal

Las pruebas de compresión diagonal se realizan de acuerdo con los requisitos NMX-C-ONNCCE-464-2010 para las muestras S11, S12, S13, S21, S22 y S23 y con ello determinar la resistencia al corte y el módulo de corte de las paredes reforzadas y no reforzadas. Las configuraciones de prueba para muestras se exponen en las imágenes 6.7 y 6.8.

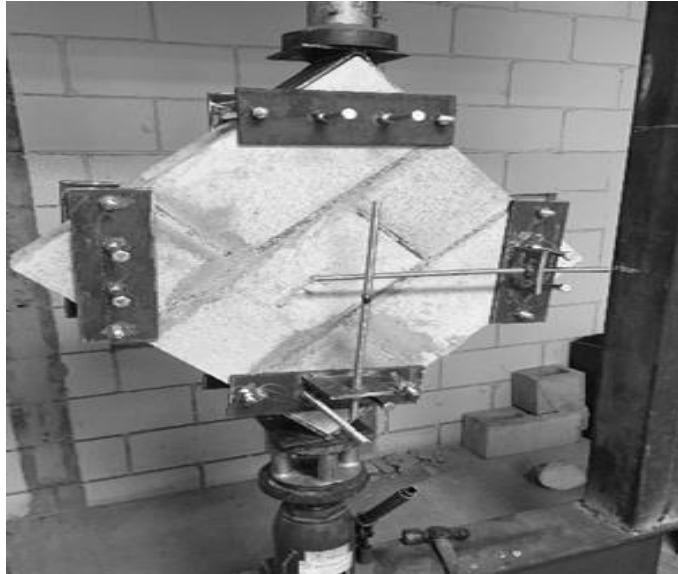


Figura 6.7. Aplicación de la carga diagonal a especímenes no reforzados S1 – Fuente: elaboración propia



Figura 6.8. Aplicación de la carga diagonal a especímenes reforzados S2 - Fuente: elaboración propia.

La resistencia al corte se calcula a partir de la ecuación 6.3, que incluye la carga máxima aplicada a la pared, así como el grosor y la longitud diagonal del espécimen. Las especificaciones de prueba establecen que el promedio de al menos tres paredes es la resistencia a la compresión de la mampostería.

$$v_m = \frac{P}{t L_c}$$

Ecuación 6.3. Resistencia a corte de mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010)

Dónde:

v_m = Resistencia al corte de la mampostería.

P = Carga máxima aplicada.

t = Espesor de la pared.

L_c = Longitud diagonal.

A partir de esta prueba se calcula el módulo de cortante de mampostería con la ecuación 6.4, de acuerdo con NMX-C-464-ONNCCE-2010.

$$G_m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005}$$

Ecuación 6.4. Módulo de corte de mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010)

Dónde:

G_m = Módulo de corte de mampostería.

τ_2 = Tensión de corte correspondiente a 0,000050 de deformación angular.

τ_1 = Esfuerzo cortante correspondiente al 40 % de la carga máxima.

γ_2 = Tensión angular producida por el estrés τ_2 .

7. Resultados

Las pruebas o ensayos de laboratorio realizadas a los muretes de bloques de concreto y con la aplicación de las ecuaciones descritas en el capítulo 6, permiten obtener la resistencia a compresión y a cortante así como los módulos de elasticidad y de corte.

La utilización de especímenes de control sin refuerzo a base de fibra de carbono ayuda a realizar una comparación más precisa y poder conocer con una mayor certeza el incremento en la resistencia y por lo tanto el beneficio de la aplicación de esta técnica en los muros de mampostería.

Adicionalmente, los resultados obtenidos se utilizaron para hacer una comparación con aquellos presentados en investigaciones previas, principalmente en términos de porcentaje de incremento pues otros investigadores han utilizado materiales distintos como ladrillo o concreto.

7.1. Resistencia a compresión

Como se muestra en la figura 7.1, hubo un aumento en la resistencia a la compresión de las paredes con el refuerzo de la laminación de fibra de carbono. Dicho aumento no es significativo y no se esperaba al inicio de esta investigación, pero se atribuye a la orientación de las fibras. En la configuración hay fibras verticales y diagonales, donde las verticales proporcionan la resistencia adicional para la carga axial aplicada. Este aumento ayuda a la resistencia a flexión de los muros, que si bien no es el objetivo de esta investigación, es también un parámetro de diseño que puede tener un impacto positivo en la estabilidad de las estructuras.

El aumento promedio real de las muestras reforzadas con fibra de carbono fue de aproximadamente el 16.0%, las paredes no reforzadas muestran una resistencia a la compresión de 59.06 kg/cm², mientras que las reforzadas resistieron 68.52 kg/cm² a medida que se aplica la carga axial.

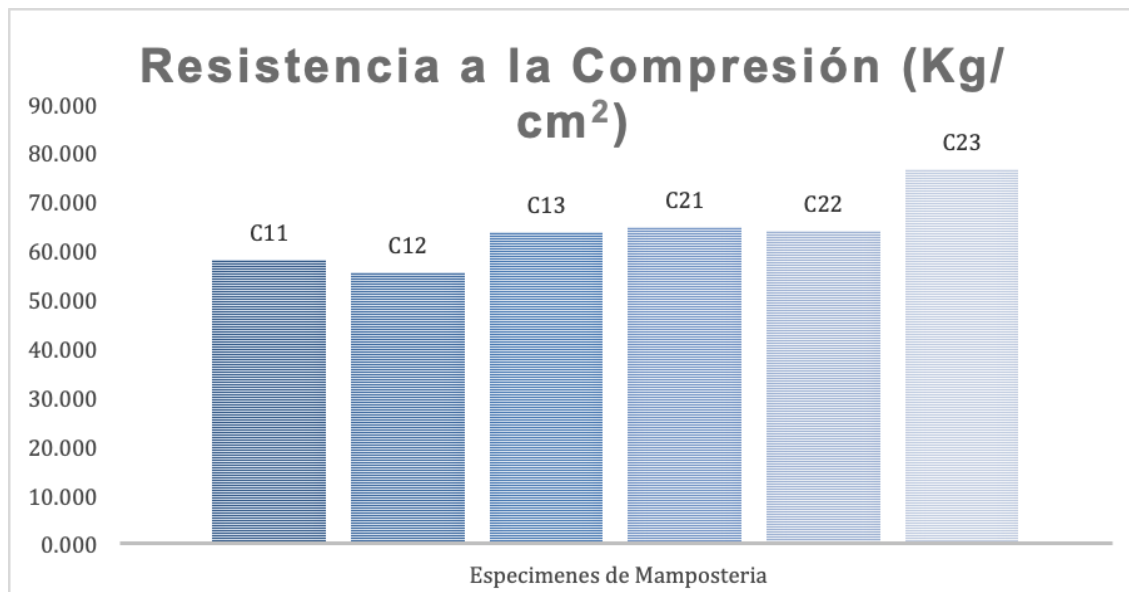


Figura 7.1. Resistencia a la compresión para paredes de mampostería no reforzadas (C11-C13) y reforzadas (C21-C23) - Fuente: elaboración propia.

7.2. Resistencia a cortante

Se obtuvo un resultado diferente en la resistencia al corte en comparación con la resistencia a la compresión. En la prueba de compresión diagonal, la resistencia al corte se incrementó significativamente, pasando de 5.23 kg/cm² a 9.11 kg/cm² en promedio, es decir, aproximadamente 74% adicional de la resistencia al corte original de las paredes de mampostería. En la figura 7.2 se muestra claramente el gran aumento obtenido.

La razón de la mayor resistencia al corte es, obviamente, la fibra de carbono, específicamente las fibras orientadas a 45 grados. Cabe mencionar que, este aumento se esperaba antes de iniciar la investigación, pero no en esa magnitud. Las técnicas utilizadas por otros investigadores y que se describieron con mayor detalle en la sección 3 de esta tesis doctoral, también resultaron en aumentos considerables en la resistencia a cortante de los muros de mampostería.

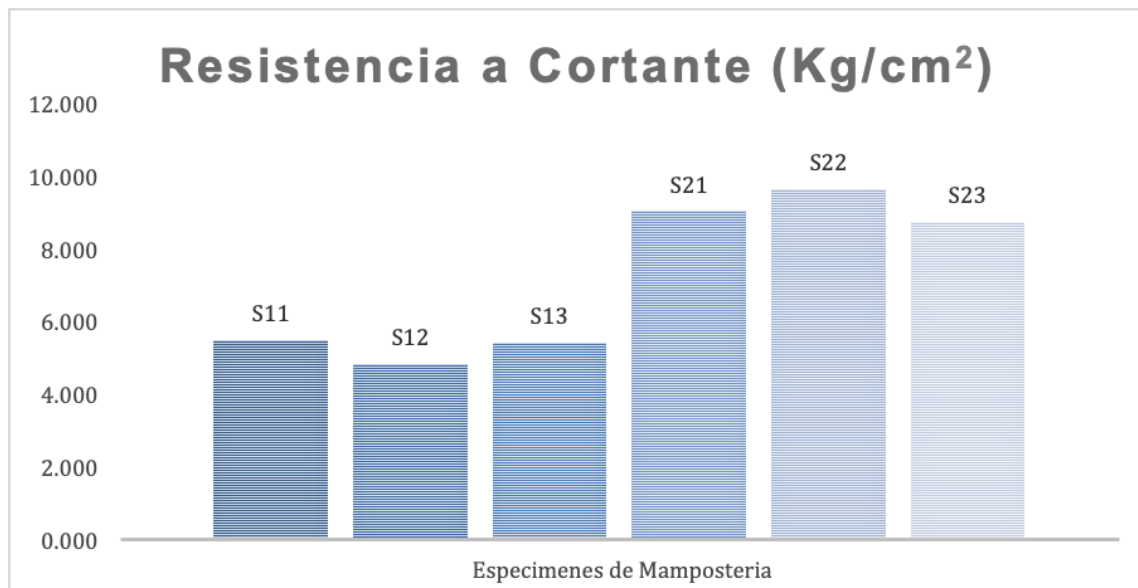


Figura 7.2. Resistencia al corte para muros de mampostería no reforzados (S11-S13) y reforzados (S21-S23). - Fuente: elaboración propia.

7.3. Módulo de Elasticidad

Los resultados obtenidos en relación al módulo de elasticidad en la prueba de compresión axial, mostró un comportamiento similar al de la resistencia a la compresión con un incremento mínimo de apenas 6% en promedio.

Los especímenes ensayados sin refuerzo a base de fibra de carbono tuvieron un módulo de elasticidad en promedio de 8,040 kg/cm² mientras que los muretes con fibra de carbono resultaron en un módulo de 8,550 kg/cm² en promedio como se aprecia en la figura 7.3.

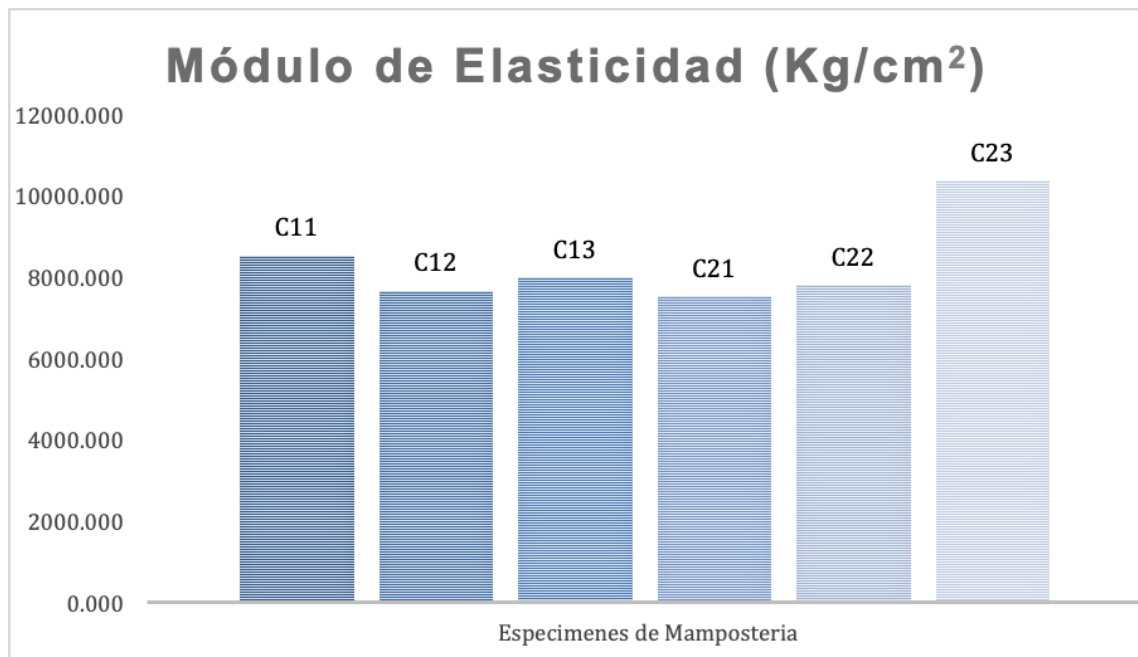


Figura 7.3. Módulo de Elasticidad para muros de mampostería no reforzados (C11-C13) y reforzados (C21-C23). - Fuente: elaboración propia.

7.4. Módulo de Corte

Finalmente, el módulo de cortante de los muros de mampostería ensayados también presentó un aumento significativo muy similar a lo que ocurrió con la resistencia a cortante como era de esperarse, el incremento en este parámetro fue de aproximadamente un 70%.

Definiendo el módulo de corte de un material como la capacidad de deformarse una vez que recibe alguna fuerza o esfuerzo cortante, como los que se producen con cargas laterales, la mayor resistencia a corte que se obtuvo supone un mejor desempeño sísmico de los muros de mampostería reforzados con fibra de carbono.

En la figura 7.4 se observan los resultados del módulo de corte de los especímenes ensayados, en los muros sin refuerzo se obtuvo en promedio un valor de 7,200 kg/cm² mientras que los muros con el refuerzo de fibra de carbono en ambas caras resultaron en un módulo de corte de 12,200 kg/cm² en promedio.

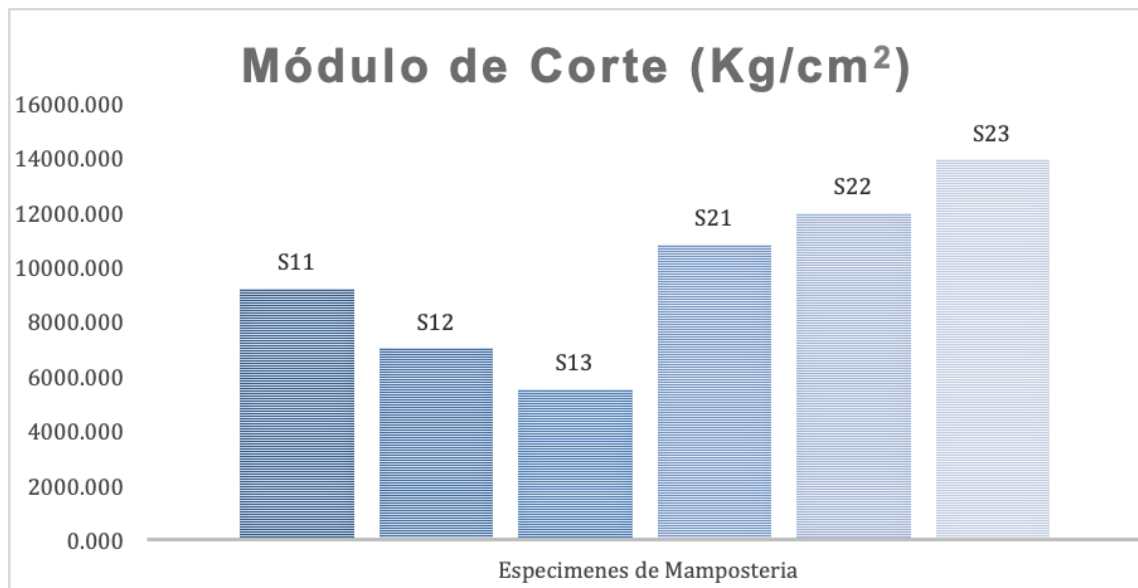


Figura 7.4. Módulo de Corte para muros de mampostería no reforzados (S11-S13) y reforzados (S21-S23). - Fuente: elaboración propia.

7.5. Comparación de resultados

Las variaciones que se han mencionado en cuanto a las opciones o técnicas de reforzamiento a lo largo de este documento, se ven reflejadas en la tabla 7.1, en donde se observan resultados distintos que dependen del material que se refuerza, el de refuerzo, la orientación y cantidad del refuerzo entre otros factores. En esta tabla se aprecia una comparativa entre técnicas similares encontradas en la investigación realizada.

Tabla 7.1. Comparativa de resultados similares entre la literatura consultada y los obtenidos en esta investigación. - Fuente: elaboración propia.

Año	Autor(es)	Material base	Material de refuerzo	Aumento de Resistencia a Cortante (%)
2005	ElGawady et al.	Ladrillo	Cuadrícula de CFRP	300
2006	Korany y Drysdale	Uniones de mampostería	Cables flexibles de CFRP	25
2012	Farooq et al.	Ladrillo	Bandas diagonales de CFRP	214
2012	El-Sokkary y Galal	Concreto	Bandas horizontales y verticales de CFRP	46
2013	Popa et al.	Ladrillo	Capa de CFRP	20
2014	Bischof et al.	Ladrillo	Bandas verticales y diagonales CFRP	70
2019	Mustafaraj y Yardim	Ladrillo	Bandas diagonales de CFRP 30 cm	350
2020	Rodríguez	Bloque de concreto	Capas de CFRP	74

Esta variación en los resultados demuestra que es necesario que se efectúen más investigaciones sobre este tema si se quiere llevar a la práctica este tipo de reforzamiento, ya que se requiere tener certeza en cuanto a los parámetros de diseño a utilizar cuando se efectúe un cálculo estructural.

7.6. Simulación en software de análisis estructural

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se utilizaron para crear un modelo con ayuda de un software para el análisis y diseño estructural de muros de mampostería, CYPECAD con el objetivo de observar el impacto que estos resultados generan en una vivienda.

Se utilizó una vivienda de 2 niveles con una distribución típica de muros para estas tipologías, la cual fue modelada en el software mencionado considerando block común de concreto con las características que se utilizan en la región en cuanto a resistencia a la compresión y cortante. Una vez que se completó el modelo, se creó otro idéntico con la única variación de que el material a utilizar fue block de concreto reforzado con fibra de carbono y con los parámetros de resistencia obtenidos en los ensayos de laboratorio tanto para compresión como para corte. Se modelaron algunos

huecos correspondientes a vanos para puertas y ventanas, esto para aumentar los esfuerzos por corte tal como ocurre comúnmente en los muros con aberturas.

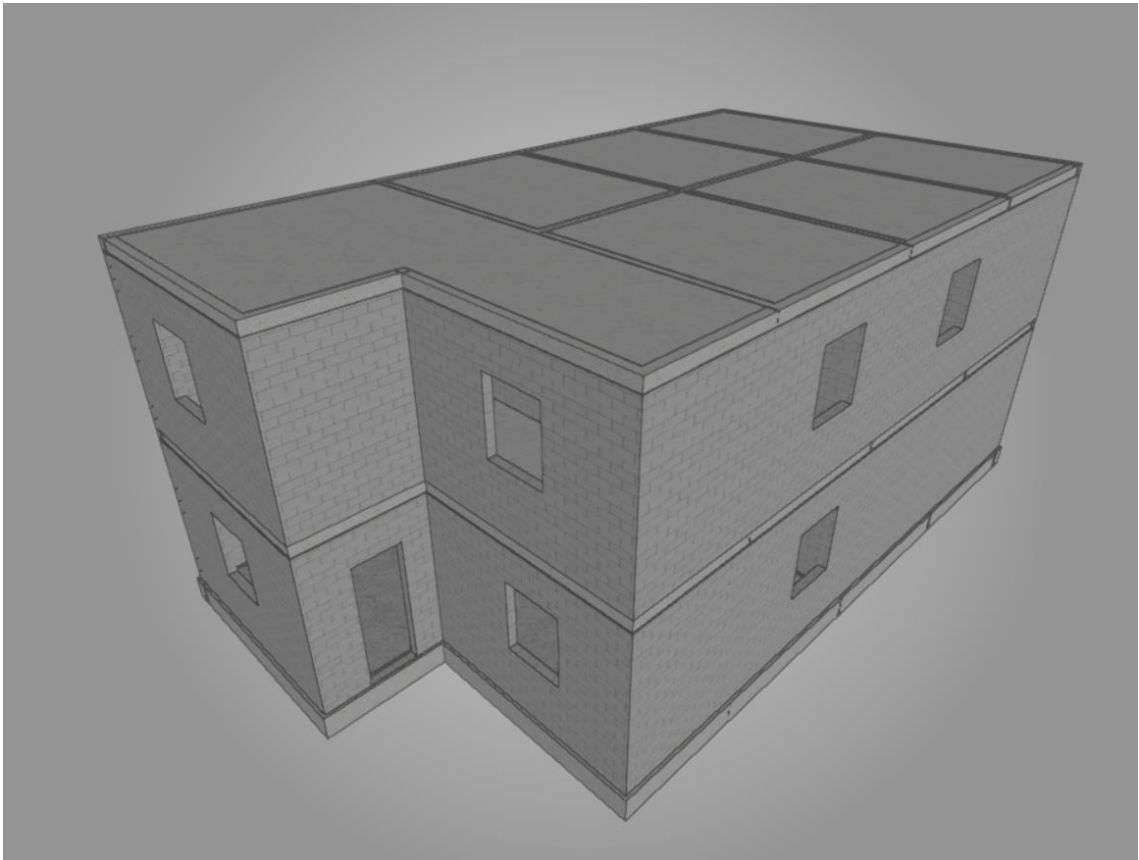


Figura 7.5. Modelo 3D de la vivienda utilizada para la simulación - Fuente: elaboración propia.

Los dos modelos se analizaron bajo la normativa aplicable para mampostería, considerando las Normas Técnicas Complementarias para el Gobierno de Baja California 2017, específicamente en el capítulo de Diseño por Sismo. La acción sísmica se aplicó para una edificación ubicada en la ciudad de Mexicali, Baja California, México, la cual se localiza en una zona sísmica D y desplantada sobre un suelo tipo III. Esta normativa considera para la zona y el suelo antes mencionados, un coeficiente sísmico de 0.44 g.

Adicionalmente, se crearon dos modelos con las características de los materiales descritos anteriormente, pero se analizaron considerando una aceleración de 0.93 g. Esta aceleración se obtuvo generando una envolvente de los registros que se tuvieron durante el sismo del 4 de abril de 2010 ocurrido en la ciudad de Mexicali.

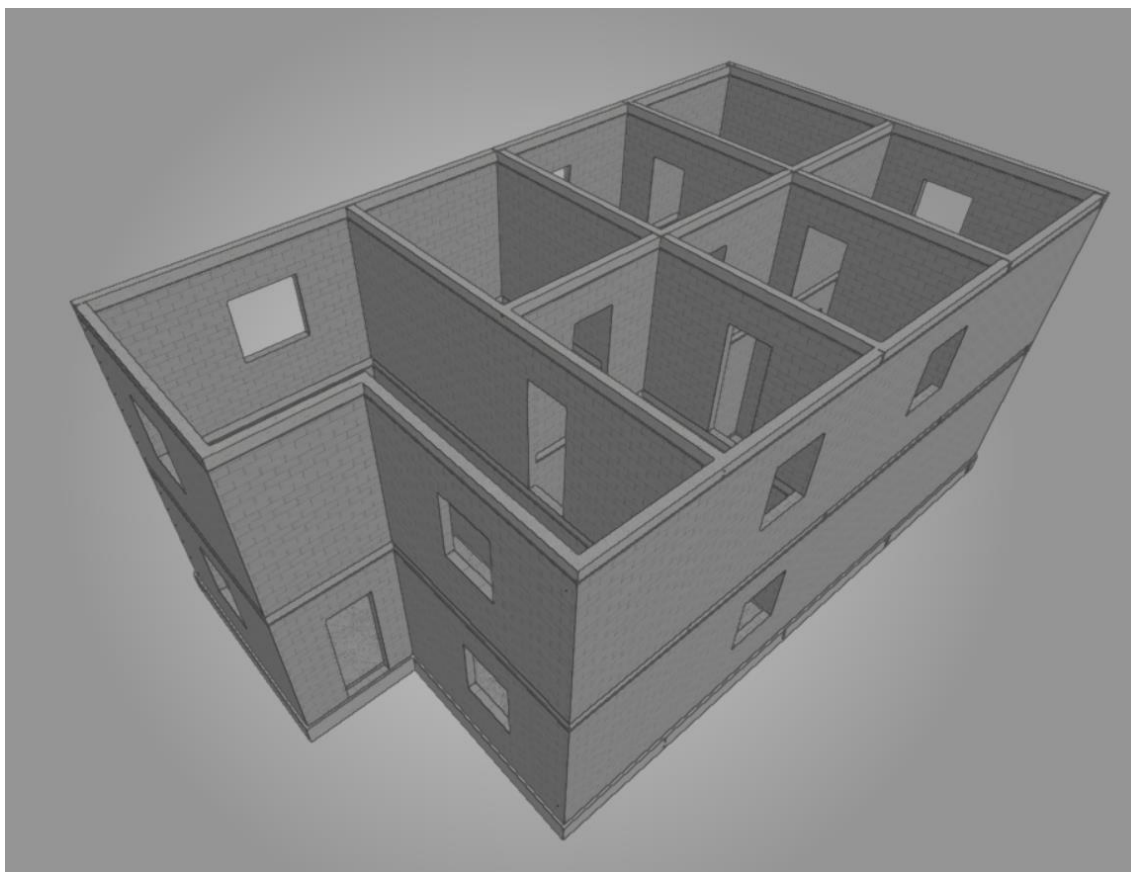


Figura 7.6. Distribución de muros de planta alta - Fuente: elaboración propia.

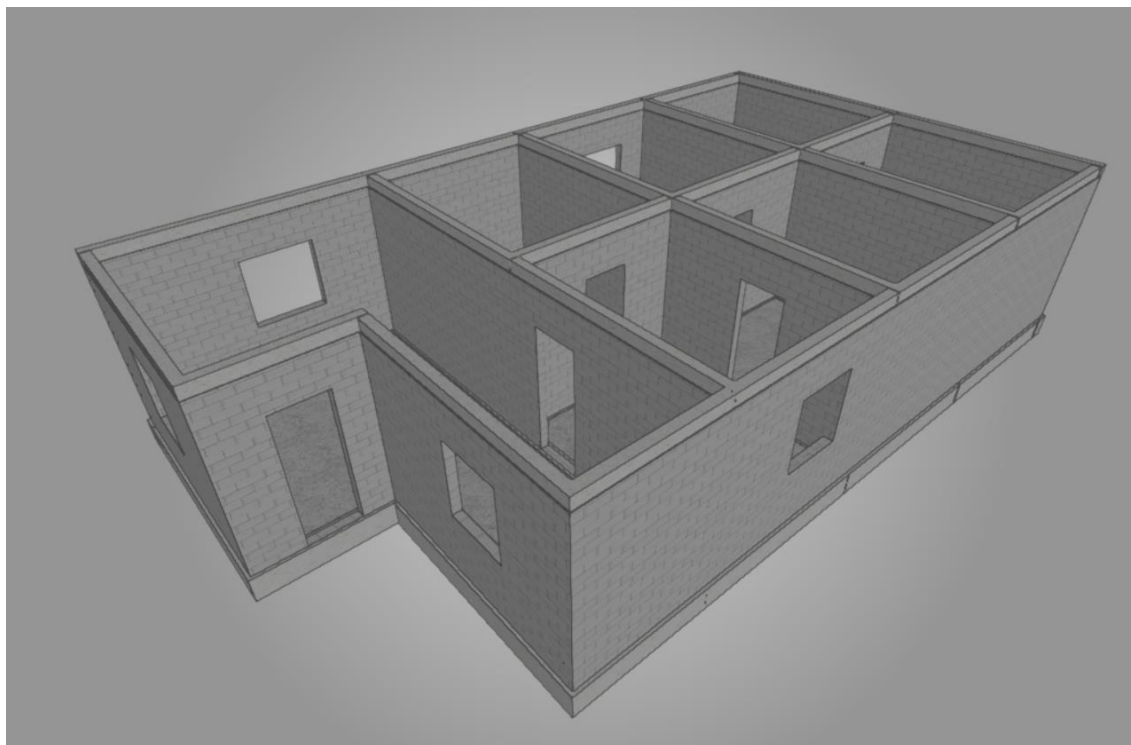


Figura 7.7. Distribución de muros de planta baja - Fuente: elaboración propia.

Las memorias de cálculo o listados que arrojó el programa se obtuvieron para comparar la fuerza cortante resistente de los distintos muros de mampostería. En el 100% de los muros de la vivienda que se modelaron con los parámetros resistentes del nuevo material, se obtuvo un incremento en la resistencia a cortante (Q_r) con respecto a los muros modelados con block tradicional, tal como se puede apreciar en la tabla 7.2

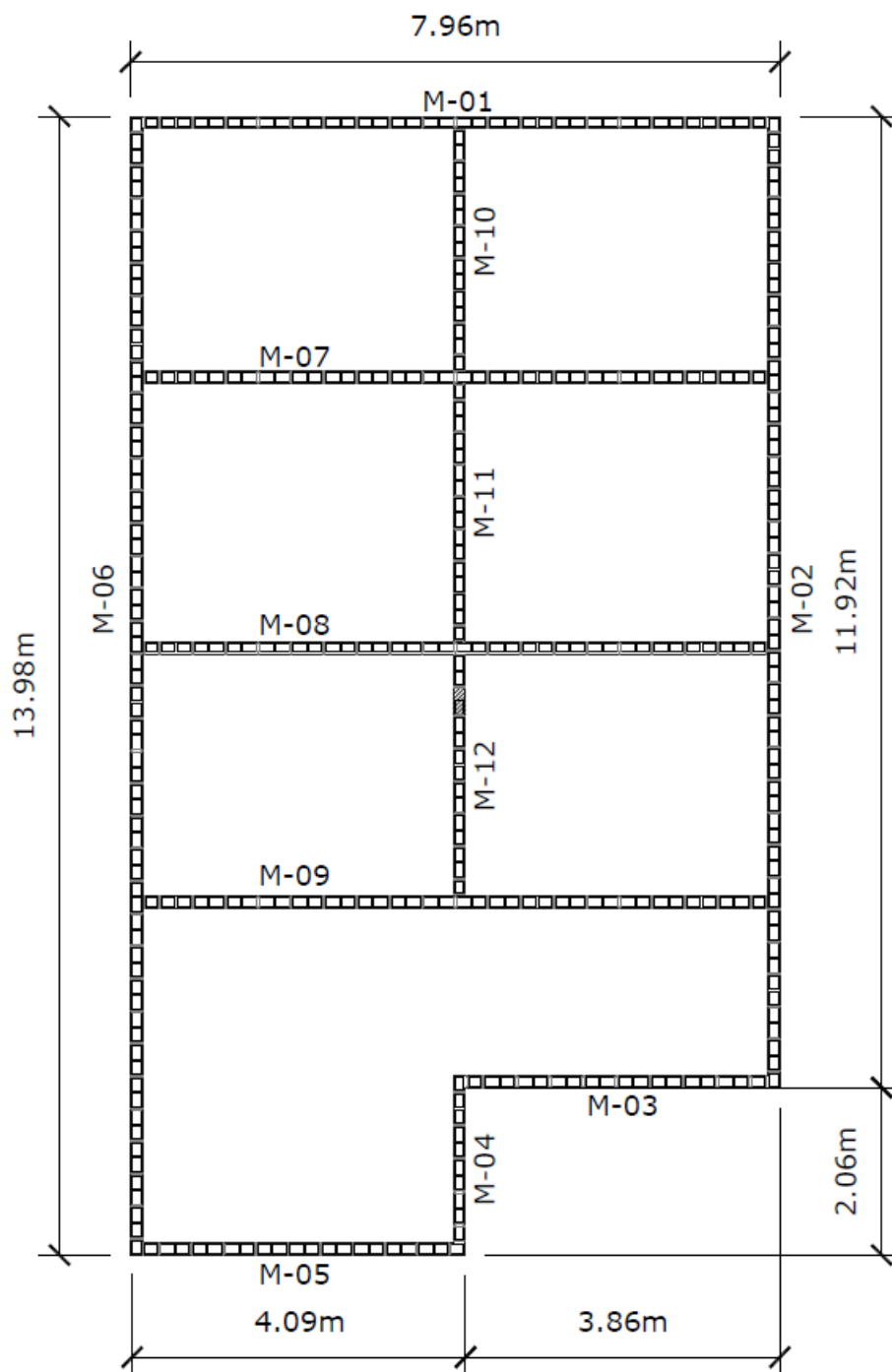


Figura 7.8. Localización de muros de mampostería - Fuente: elaboración propia.

7.6.1 Escenario 1 – Block común con $a = 0.44 g$

El primer escenario que se analizó en la simulación de la vivienda descrita en el punto anterior fue considerar el material tradicional de block hueco de concreto sin ningún tipo de refuerzo para conformar el modelo estructural. En este escenario la aceleración considerada fue la especificada para zona sísmica D con tipo de suelo III en las Normas Técnicas Complementarias de Baja California, la cual es del orden de 0.44 veces la gravedad. Los parámetros considerados en el análisis sísmico se muestran en el apéndice A.

Para el modelo analizado, el cual cuenta con una buena densidad de muros tanto en su sentido X como Y, todos los muros de mampostería cumplen con la demanda de las cargas impuestas (gravitacionales y de sismo).

La relación demanda-capacidad de los muros de mampostería que se obtuvo, específicamente aquella referente al esfuerzo cortante que se produce en estos elementos debido a las fuerzas sísmicas, fue en promedio para los 12 muros en sus dos niveles de 19.67 %. Los resultados por muro se presentan en la tabla 7.2. El registro más detallado del comportamiento de los muros se puede observar en el apéndice A.

7.6.2 Escenario 2 – Block FRP con $a = 0.44 g$

El segundo escenario que se analizó en la simulación de la vivienda descrita fue considerar el material tradicional de block hueco de concreto con refuerzo a base de fibra de carbono para conformar el modelo estructural. En este escenario la aceleración considerada fue la especificada para zona sísmica D con tipo de suelo III en las Normas Técnicas Complementarias de Baja California, la cual es del orden de 0.44 veces la gravedad.

Para el modelo analizado, el cual cuenta con una buena densidad de muros tanto en su sentido X como Y, todos los muros de mampostería cumplen con la demanda de las cargas impuestas (gravitacionales y de sismo).

La relación demanda-capacidad de los muros de mampostería que se obtuvo, específicamente aquella referente al esfuerzo cortante que se produce en estos elementos debido a las fuerzas sísmicas, fue en promedio para los 12 muros en sus dos niveles de 13.71 %. Los resultados por muro se presentan en la tabla 7.2. El registro más detallado del comportamiento de los muros se puede observar en el apéndice A.

El refuerzo con fibra de carbono en este segundo escenario le proporcionó a los muros de mampostería de la vivienda un aumento en su resistencia a cortante de 43.65 % en promedio como se aprecia en la tabla 7.3.

7.6.3 Escenario 3 – Block común con $a = 0.93 g$

El tercer escenario que se analizó en la simulación de la vivienda descrita fue considerar el material tradicional de block hueco de concreto sin ningún refuerzo para conformar el modelo estructural. En este escenario la aceleración considerada fue calculada mediante la envolvente del registro sísmico que se obtuvo durante el sismo ocurrido el 4 de abril de 2010 en la ciudad de Mexicali, Baja California, México. La envolvente presenta una aceleración máxima de 0.93 veces la gravedad. Los parámetros considerados en el análisis sísmico se muestran en el apéndice A.

En el modelo analizado, el cual a pesar de contar con una buena densidad de muros tanto en su sentido X como Y, cuenta ya con fallas estructurales causadas por la acción sísmica considerada.

La relación demanda-capacidad de los muros de mampostería que se obtuvo, específicamente aquella referente al esfuerzo cortante que se produce en estos elementos debido a las fuerzas sísmicas, fue en promedio para los 12 muros en sus dos niveles de 53.21 %. Los resultados por muro se presentan en la tabla 7.2. El registro más detallado del comportamiento de los muros se puede observar en el apéndice A.

7.6.4 Escenario 4 – Block FRP con $a = 0.93\text{ g}$

El cuarto escenario que se analizó en la simulación de la vivienda descrita fue considerar el material tradicional de block hueco de concreto reforzado con fibra de carbono para conformar el modelo estructural. En este escenario la aceleración considerada fue calculada mediante la envolvente del registro sísmico que se obtuvo durante el sismo ocurrido el 4 de abril de 2010 en la ciudad de Mexicali, Baja California, México. La envolvente presenta una aceleración máxima de 0.93 veces la gravedad.

En el modelo analizado, el cual a pesar de contar con una buena densidad de muros tanto en su sentido X como Y, presenta falla en uno de sus muros debido a la acción sísmica. En relación al modelo del escenario 3, el porcentaje de utilización de los muros de mampostería es en promedio de 45.95 % como se observa en la tabla 7.4.

La relación demanda-capacidad de los muros de mampostería que se obtuvo, específicamente aquella referente al esfuerzo cortante que se produce en estos elementos debido a las fuerzas sísmicas, fue en promedio para los 12 muros en sus dos niveles de 37.83 %. Los resultados por muro se presentan en la tabla 7.2. El registro más detallado del comportamiento de los muros se puede observar en el apéndice A.

Tabla 7.2. Comparativa de resultados de los escenarios de simulación de vivienda. -

Fuente: elaboración propia.

Nivel	Muro	Relación Capacidad/Demanda Escenario 1	Relación Capacidad/Demanda Escenario 2	Relación Capacidad/Demanda Escenario 3	Relación Capacidad/Demanda Escenario 4
Planta Baja	M-01	20.00%	13.00%	74.00%	26.00%
Planta Baja	M-02	30.00%	20.00%	120.00%	89.00%
Planta Baja	M-03	19.00%	13.00%	79.00%	64.00%
Planta Baja	M-04	8.00%	6.00%	14.00%	11.00%
Planta Baja	M-05	21.00%	14.00%	42.00%	28.00%
Planta Baja	M-06	28.00%	19.00%	136.00%	102.00%
Planta Baja	M-07	29.00%	19.00%	60.00%	40.00%
Planta Baja	M-08	23.00%	16.00%	48.00%	32.00%
Planta Baja	M-09	25.00%	17.00%	52.00%	35.00%
Planta Baja	M-10	16.00%	11.00%	24.00%	16.00%
Planta Baja	M-11	19.00%	13.00%	39.00%	27.00%
Planta Baja	M-12	19.00%	14.00%	33.00%	23.00%
Planta Alta	M-01	14.00%	9.00%	49.00%	38.00%
Planta Alta	M-02	16.00%	14.00%	65.00%	52.00%
Planta Alta	M-03	18.00%	12.00%	65.00%	52.00%
Planta Alta	M-04	29.00%	20.00%	57.00%	44.00%
Planta Alta	M-05	28.00%	23.00%	71.00%	58.00%
Planta Alta	M-06	18.00%	13.00%	72.00%	53.00%
Planta Alta	M-07	11.00%	8.00%	24.00%	16.00%
Planta Alta	M-08	17.00%	11.00%	36.00%	23.00%
Planta Alta	M-09	18.00%	12.00%	38.00%	25.00%
Planta Alta	M-10	18.00%	12.00%	28.00%	18.00%
Planta Alta	M-11	17.00%	12.00%	33.00%	23.00%
Planta Alta	M-12	11.00%	8.00%	18.00%	13.00%

Tabla 7.3. Relación Capacidad/Demanda de muros con aceleración = 0.44 g. - Fuente: elaboración propia.

Nivel	Muro	Relación Capacidad/Demanda Escenario 1	Relación Capacidad/Demanda Escenario 2	Incremento de resistencia
Planta Baja	M-01	20.00%	13.00%	53.85%
Planta Baja	M-02	30.00%	20.00%	50.00%
Planta Baja	M-03	19.00%	13.00%	46.15%
Planta Baja	M-04	8.00%	6.00%	33.33%
Planta Baja	M-05	21.00%	14.00%	50.00%
Planta Baja	M-06	28.00%	19.00%	47.37%
Planta Baja	M-07	29.00%	19.00%	52.63%
Planta Baja	M-08	23.00%	16.00%	43.75%
Planta Baja	M-09	25.00%	17.00%	47.06%
Planta Baja	M-10	16.00%	11.00%	45.45%
Planta Baja	M-11	19.00%	13.00%	46.15%
Planta Baja	M-12	19.00%	14.00%	35.71%
Planta Alta	M-01	14.00%	9.00%	55.56%
Planta Alta	M-02	16.00%	14.00%	14.29%
Planta Alta	M-03	18.00%	12.00%	50.00%
Planta Alta	M-04	29.00%	20.00%	45.00%
Planta Alta	M-05	28.00%	23.00%	21.74%
Planta Alta	M-06	18.00%	13.00%	38.46%
Planta Alta	M-07	11.00%	8.00%	37.50%
Planta Alta	M-08	17.00%	11.00%	54.55%
Planta Alta	M-09	18.00%	12.00%	50.00%
Planta Alta	M-10	18.00%	12.00%	50.00%
Planta Alta	M-11	17.00%	12.00%	41.67%
Planta Alta	M-12	11.00%	8.00%	37.50%
			Promedio	43.65%

Tabla 7.4. Relación Capacidad/Demanda de muros con aceleración = 0.93 g. - Fuente: elaboración propia.

Nivel	Muro	Relación Capacidad/Demanda Escenario 3	Relación Capacidad/Demanda Escenario 4	Incremento de resistencia
Planta Baja	M-01	74.00%	26.00%	184.62%
Planta Baja	M-02	120.00%	89.00%	34.83%
Planta Baja	M-03	79.00%	64.00%	23.44%
Planta Baja	M-04	14.00%	11.00%	27.27%
Planta Baja	M-05	42.00%	28.00%	50.00%
Planta Baja	M-06	136.00%	102.00%	33.33%
Planta Baja	M-07	60.00%	40.00%	50.00%
Planta Baja	M-08	48.00%	32.00%	50.00%
Planta Baja	M-09	52.00%	35.00%	48.57%
Planta Baja	M-10	24.00%	16.00%	50.00%
Planta Baja	M-11	39.00%	27.00%	44.44%
Planta Baja	M-12	33.00%	23.00%	43.48%
Planta Alta	M-01	49.00%	38.00%	28.95%
Planta Alta	M-02	65.00%	52.00%	25.00%
Planta Alta	M-03	65.00%	52.00%	25.00%
Planta Alta	M-04	57.00%	44.00%	29.55%
Planta Alta	M-05	71.00%	58.00%	22.41%
Planta Alta	M-06	72.00%	53.00%	35.85%
Planta Alta	M-07	24.00%	16.00%	50.00%
Planta Alta	M-08	36.00%	23.00%	56.52%
Planta Alta	M-09	38.00%	25.00%	52.00%
Planta Alta	M-10	28.00%	18.00%	55.56%
Planta Alta	M-11	33.00%	23.00%	43.48%
Planta Alta	M-12	18.00%	13.00%	38.46%
			Promedio	45.95%

8. Conclusiones

En las siguientes líneas se describen los resultados obtenidos en esta tesis doctoral desde distintos puntos de vista, incorporando aquellos datos técnicos recopilados en esta o en otras investigaciones, haciendo un breve análisis del impacto social o económico que pudiera tener el reforzamiento así como conclusiones sobre la metodología realizada y futuras líneas de investigación que se pudieran explorar en este aún innovador tema.

8.1. Conclusiones técnicas

Se puede observar que la resistencia a compresión de los muros de mampostería no aumentó de manera significativa con la aplicación de fibra de carbono. Sin embargo, en el rubro de la resistencia a fuerza cortante hay un incremento significativo de aproximadamente 74%. Este aumento, les proporciona a los muros de mampostería una mayor rigidez para soportar las fuerzas laterales, particularmente aquellas generadas por los movimientos sísmicos.

También es importante destacar el incremento que se obtuvo en el módulo de corte de los muros reforzados con fibra de carbono del orden de 70%. Este aumento podría significar un mejor desempeño de los muros evitando con esto que sean elementos frágiles ante esfuerzos de cortante.

Adicionalmente, el perfeccionamiento de esta técnica de reforzamiento se puede aplicar a cualquier tipo de estructura, en la actualidad se ha utilizado la fibra de carbono para reforzar vigas y principalmente columnas de concreto que ya han presentado fallas estructurales por sismos. La simplicidad y practicidad que han encontrado distintos investigadores también es una bondad para la aplicación de este tipo de técnicas.

El reforzamiento de muros o de estructuras en general con materiales compuestos, particularmente fibra de carbono, permiten la rehabilitación o la reparación de edificaciones que han sido dañadas por sismos sin presentar colapso. Los estudios

realizados muestran como estas estructuras pueden recuperar una gran parte de su rigidez inicial con este tipo de refuerzo, lo que las haría nuevamente seguras.

En el modelo que se creó con ayuda del software CYPECAD, se observó un aumento en la resistencia a cortante en todos los muros de mampostería una vez que se modelaron con los parámetros obtenidos durante los ensayos de laboratorio. En los ejercicios de simulación no se buscaron soluciones para lograr que los muros cumplieran o no con su demanda, solamente se modelaron y se aplicaron las cargas, esto para poder tener puntos de comparación reales entre los distintos escenarios.

En relación a los primeros dos escenarios, para los cuales los modelos se analizaron considerando el coeficiente sísmico de la normativa local vigente de 0.44 veces la aceleración de la gravedad, ambos grupos de muros se encontraron muy poco exigidos, probablemente debido a la gran densidad en ambos sentidos. Sin embargo, es importante destacar que los muros con refuerzo están trabajando con un mayor margen de seguridad, comprobando así que tendrían posibilidades de soportar fuerzas mayores en caso de que las aceleraciones en el terreno así se presenten durante un evento sísmico.

Los escenarios 3 y 4, en los que el coeficiente sísmico se incrementó a 0.93 veces la aceleración de la gravedad emulando el registro del sismo de 2010, presentaron de nueva cuenta una mejora en el desempeño de los muros de mampostería, aun cuando en ambos escenarios ya encontramos falla por cortante en estos elementos.

Los resultados obtenidos en esta simulación nos demuestran como una vivienda que cumplía perfectamente con las cargas aplicadas por el código local, puede alcanzar un estado límite de falla cuando se presente un sismo de una mayor intensidad a los considerados en los reglamentos.

Es entonces preocupante que la normativa vigente, y por la cual se diseña la mayoría de las viviendas que se construyen en la actualidad, contemple una aceleración de una magnitud de 50% la que se presentó hace algunos años en la región. Es por eso que surge la importancia de la implementación de estas técnicas de reforzamiento no

solamente desde proyecto, sino también su aplicación como mecanismo de rehabilitación de estructuras que ya presentan daños.

La variedad de combinaciones, análisis y simulaciones que se pueden hacer con modelos de este tipo es enorme por lo que puede convertirse en un tema a explorar con mayor profundidad durante investigaciones futuras.

8.2. Conclusiones socio-económicas

La aplicación de este tipo de materiales en el reforzamiento de muros de vivienda contribuye socialmente a la problemática que se ha presentado con la ocurrencia de sismos de magnitudes e intensidades significativas, donde principalmente este tipo de estructura, por la baja importancia en la que se clasifica en la mayoría de los códigos de diseño, se ha mostrado vulnerable ante dichos fenómenos.

Esta vulnerabilidad, lamentablemente no solamente genera daños materiales, sino que como se expuso en el capítulo 2 de este documento, cada uno de los sismos más severos que se han presentado han cobrado la vida de miles de personas, de ahí la importancia de dedicar investigaciones y recursos con la finalidad de obtener estructuras que sean más seguras para sus ocupantes y que aún cuando obviamente no se podrá evitar la falla de una estructura ante un sismo de intensidades significativas pero si es fundamental evitar el colapso de estas estructuras.

La fragilidad que se presenta en los muros de mampostería puede ser contrarrestada con la utilización de materiales compuestos, los cuales, de acuerdo con lo presentado en este trabajo, mejoran la resistencia a cortante de forma considerable. Con el incremento de 70% de capacidad, se podrían tener viviendas que soporten sismos de mayores intensidades sin poner en riesgo a sus ocupantes, ni a la estructura. Otra variante del beneficio social que presenta esta técnica de reforzamiento es el de aplicar estos materiales a estructuras que ya presenten daños por este tipo de fuerzas, de esta manera se puede aumentar de nueva cuenta su rigidez al mismo grado inicial prácticamente. Históricamente, el reforzamiento de estructuras que presentan daños por sismo se realiza utilizando materiales como concreto o acero, los cuales añaden una

gran cantidad de masa a la estructura a diferencia de los materiales compuestos, esto se convierte en una gran ventaja de esta técnica.

Es también una realidad que el aplicar fibra de carbono a una vivienda completa resulta costoso. Sin embargo, se puede analizar mediante investigaciones posteriores el alcanzar puntos de equilibrio óptimos en donde sea de mayor conveniencia reforzar una parte de la vivienda, teniendo como resultado el asegurar la integridad estructural de la misma ante sismos de intensidades reales.

8.3. Conclusiones metodológicas

La principal conclusión que se obtuvo al aplicar esta metodología se asocia a la gran cantidad de variaciones en cuanto a la manera de reforzar los muros, es decir, se utilizaron cuatro capas de material con la orientación de fibras descrita en la sección de metodología y cubriendo la totalidad de los muros, pero se podrían hacer más pruebas cambiando estas configuraciones, menos capas, distintas orientaciones e incluso utilizar refuerzos parciales en los muros en forma de retículas, franjas horizontales o verticales como lo han hecho algunos otros investigadores citados previamente.

Es también necesario mencionar que en esta metodología solamente se tuvo la posibilidad de trabajar con muretes de mampostería y que sería importante poder efectuar pruebas en muros en escalas reales y con instrumentación y equipo de mejores capacidades.

Posteriormente, en esta línea de investigación se buscará hacer pruebas con las opciones antes mencionadas, con el objetivo de encontrar un refuerzo óptimo y poder tener suficientes elementos para hacer una correlación entre el material utilizado y el aumento de la resistencia a cortante que se obtiene.

Asimismo, será interesante poder trabajar en modelos de simulación estructural en un futuro, en donde se puedan colocar muros reforzados con diferentes ubicaciones y con ello obtener configuraciones óptimas de viviendas. Si imaginamos una vivienda con todos los muros reforzados con fibra de carbono estaríamos desperdiciando seguramente este material, sin embargo estos modelos de simulación permitirían

encontrar esos muros que reciben la mayor cantidad de fuerza cortante y colocar de esa manera los refuerzos supondría un diseño óptimo.

9. Referencias

- [1] T. Haktanir, H. Elcuman, M. Cubaner, “Frequency analysis of annual maximum earthquakes within a geographical region”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 43, pp. 323-328, 2012.
- [2] G. Brando, A. Pagliaroli, G. Cocco, F. Di Buccio, “Site effects and damage scenarios: The case study of two historic centers following the 2016 Central Italy earthquake”, *Engineering Geology*, vol. 272, pp. 1-17, 2020.
- [3] A. Ishigaki, H. Higashi, T. Sakamoto, S. Shibahara, “The Great East-Japan Earthquake and Devastating Tsunami: An Update and Lessons from the Past Great Earthquakes in Japan since 1923”, *Tohoku Journal of Experimental Medicine*, vol. 229, pp. 287-299, 2013.
- [4] B. Luccioni, V. Rougier, “In plane retrofitting of masonry panels with fibre reinforced composite materials”, *Journal of construction and building materials*, pp. 1772-1788, 2010.
- [5] T. Bui, A. Si Larbi, N. Reboul, E. Ferrier, “Shear behaviour of masonry walls strengthened by external bonded FRP and TRC”, *Journal of composite structures*, pp. 923-932, 2015.
- [6] K.C. Chang, Y.L. Mo, C.C. Chen, L.C. Lai, C.C. Chou, “Lessons learned from the Damaged Chi-Lu Cable-Stayed Bridge”, *Journal of Bridge Engineering ASCE*, pp. 343-352, 2004.
- [7] A. Liel, K. Lynch, “Vulnerability of Reinforced-Concrete-Frame Buildings and Their Occupants in the 2009 L’Aquila, Italy, Earthquake”, *Natural Hazard Review ASCE*, pp. 11-23, 2012.

- [8] P.L. Gould, B.J. Goodno, N.C. Gould, P. Caldwell, “Behavior of Engineer Constructed Facilities in the Haitian Earthquake of January 12, 2010”, *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 23-31, 2011.
- [9] D. Gautam, H. Chaulagain, “Structural performance and associated lessons to be learned from world earthquakes in Nepal after 25 April 2015 (Mw 7.8) Gorkha earthquake”, *Engineering Failure Analysis*, vol. 68, pp. 222-243, 2016.
- [10] A. Elnashai, B. Gencturk, O. Kwon, Y. Hashash, S. Kim, S. Jeong, J. Dukes, “The Maule (Chile) earthquake of February 27, 2010: Development of hazard, site specific ground motions and back-analysis of structures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 42, pp. 229-245, 2012.
- [11] E. Sayun, B. Yon, Y. Calayir, M. Karaton, “Failures of masonry and adobe buildings during the June 23, 2011 Maden-(Elazig) earthquake in Turkey”, *Engineering Failure Analysis*, vol. 34, pp. 779-791, 2013.
- [12] E. Celebi, M. Aktas, N. Caglar, A. Ozocak, M. Kutanis, N. Mert, Z. Ozcan, “October 23, 2011 Turkey/Van-Ercis earthquake: structural damages in the residential buildings”, *Nat Hazards*, vol. 65, pp. 2287-2310, 2013.
- [13] B. Khadka, “Mud masonry houses in Nepal: A detailed study based on entire reconstruction scenario in 31 earthquake-affected districts”, *Structures*, vol. 25, pp. 816-838, 2020.
- [14] Y. Pan, X. Wang, R. Guo, S. Yuan, “Seismic damage assessment of Nepalese cultural heritage building and seismic retrofit strategies: 25 April 2015 Gorkha (Nepal) earthquake”, *Engineering Failure Analysis*, vol. 87, pp. 80-95, 2018.
- [15] M. Di Ludovico, A. Santoro, G. De Martino, C. Moroni, A. Prota, M. Dolce, G. Manfredi, “Cumulative damage to school buildings following the 2016 central Italy earthquake sequence”, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol. 60, pp. 165-182, 2019.
- [16] M. Acito, E. Magrinelli, G. Milani, S. Tiberti, “Seismic vulnerability of masonry buildings: Numerical insight on damage causes for residential buildings by the 2016

central Italy seismic sequence and evaluation of strenghtening techniques”, Journal of Building Engineering, vol. 28, pp. 1-28, 2020.

[17] A. Pozos, M. Chavez, M. Jaimes, O. Arnau, H. Guerrero, “Damages observed in locations of Oaxaca due to the Tehuantepec Mw8.2 earthquake, Mexico”, Natural Hazards, vol. 97, pp. 623-641, 2019.

[18] K. Franke, G. Candia, J. Mayoral, C. Wood, J. Montgomery, T. Hutchinson, A. Morales-Velez, “Observed building damage patterns and foundation performance in Mexico City following the 2017 M7.1 Puebla-Mexico City earthquake”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 125, pp. 1-18, 2019.

[19] J. Mayoral, K. Franke, T. Hutchinson, “The September 19, 2017 Mw 7.1 Puebla-Mexico City earthquake: Important findings from the field”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 123, pp. 520-524, 2019.

[20] J. Lara, E. Hernández, B. Olmos, G. Martínez, “Building damages during the September 19, 2017 earthquake in Mexico City and seismic retrofitting of existing first soft-story buildings, Engineering Structures, vol. 209, pp. 1-15, 2020.

[21] Alvarez, Suárez-vidal, Mendoza-borunda, González-escobar, 2009. Servicio Sismológico Nacional, 2010. Servicio Sismológico Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM. <http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/fuertes.jsp>

[22] (United States Geological Survey USGS, 2009)

[23] (United States Geological Survey USGS, 2010)

[24] M. Jaimes, E. Reinoso, "A seis meses del temblor del Mayor-Cucapah, Baja California, del 4 de abril de 2010 (Mw=7.2)", Evaluación de Riesgos Naturales, 2010

[25] J. Martinez, "Fallas estructurales comunes en las edificaciones de Mexicali B.C debido al sismo del 04 de abril del 2010". XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, pp. 1-15, 2010.

[26] J. Ley, "Vivienda frágil ante sismos: La acción habitacional en la ciudad de Mexicali". Procesos Urbanos en Baja California, pp. 109-136, 2012.

- [27] L. Rodríguez, A. Mungaray, M. González, U. Mena, "Structural damage to housing and effects on users due to seismic risk: a case study". Municipal Engineer, ICE Publishing, pp. 1-15, 2020.
- [28] S. Bhattacharya, S. Nayak, S. Chandra, "A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures", International Journal of Disaster Risk Reduction, vol. 7, pp. 51-67, 2014.
- [29] S. Honarparast, G. El-Saikaly, O. Chaallal, "Externally bonded carbon fiber-reinforced polymer composites for seismic retrofit coupling beams designed according to old codes", Advances in Structural Engineering, vol. 22, pp. 1412-1425, 2019.
- [30] T. Tang, H. Saadatmanesh, "Behavior of concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer laminates under impact loading", Journal of composites for construction ASCE, pp. 209-218, 2003.
- [31] A. El-Ragaby, E. El-Salakawy, B. Benmokrane, "Fatigue life evaluation of concrete bridge deck slabs reinforced with glass FRP composite bars", Journal of composites for construction ASCE, pp. 258-268, 2007.
- [32] O. Kalny, R. Peterman, G. Ramirez, "Performance evaluation of repair technique for damaged fiber-reinforced polymer honeycomb bridge deck panels", Journal of composites for construction ASCE, pp. 75-86, 2004.
- [33] I. Robertson, G. Johnson, "Repair of Slab-Column Connections Using Epoxy and Carbon Fiber Reinforced Polymer", Journal of composites for construction ASCE, pp. 376-382, 2004.
- [34] M. ElGawady, P. Lestuzzi, M. Badoux, "In-Plane seismic response of URM walls upgraded with FRP", Journal of composites for construction ASCE, pp. 524-535, 2005.
- [35] T. Ozbakkaloglu, M. Saatcioglu, "Seismic behavior of high-strength concrete columns confined by fiber-reinforced polymer tubes", Journal of composites for construction ASCE, pp. 538-549, 2006.

- [36] Y. Korany, R. Drysdale, "Rehabilitation of masonry walls using unobtrusive FRP techniques for enhanced out-of-plane seismic resistance", *Journal of composites for construction ASCE*, pp. 213-222, 2006.
- [37] B. Li, C. Leong, "Tests on seismically damaged reinforced concrete structural walls repaired using fiber-reinforced polymers", *Journal of composites for construction ASCE*, pp. 597-608, 2010.
- [38] Y. Al-Salloum, T. Almusallam, S. Alsayed, N. Siddiqui, "Seismic behavior of as-built, ACI-complying, and CFRP-Repaired exterior RC beam-column joints", *Journal of composites for construction ASCE*, pp. 522-534, 2011.
- [39] S. Farooq, M. Ilyas, S. Amir, "Response of masonry walls strengthened with CFRP and Steel strips", *Arab J Sci Eng*, vol. 37, pp. 545-559, 2012.
- [40] H. Layssi, W. Cook, D. Mitchell, "Seismic response and CFRP retrofit of poorly detailed shear walls", *Journal of composites for construction ASCE*, pp. 332-338, 2012.
- [41] H. El-Sokkary, K. Galal, "Seismic behavior of RC shear walls strengthened with Fiber-reinforced polymer", *Journal of composites for construction ASCE*, pp. 603-613, 2013.
- [42] S. Motaref, M. Saiid, D. Sanders, "Shake table studies of energy-dissipating segmental bridge columns", *Journal of bridge engineering ASCE*, pp. 186-199, 2014.
- [43] P. Bischof, R. Suter, E. Chatzi, P. Lestuzzi, "On the use of CFRP sheets for the seismic retrofitting of masonry walls and the influence of mechanical anchorage", *Polymers*, vol. 6, pp. 1972-1998, 2014.
- [44] K. Seok, "An experimental study on non-compression X-Bracing systems using carbón fiber composite cable for seismic strengthening of RC buildings", *Polymers*, vol. 7, pp. 1716-1731, 2015.
- [45] K. Seok, B. Yeon, S. Yeon, "A seismic strengthening technique for reinforced concrete columns using sprayed FRP", *Polymers*, vol. 8, pp. 1-21, 2016.

- [46] J. Wang, C. Wan, Q. Zeng, L. Shen, M. Akbar, D. Yan, “Effect of eccentricity on retrofitting efficiency of basalt textile reinforced concrete on partially damaged masonry columns”, *Composite Structures*, vol. 232, pp. 1-11, 2020.
- [47] J. Paterson, D. Mitchell, “Seismic retrofit of shear walls with headed bars and carbón fiber wrap”, *Journal of Structural Engineering*, pp. 606-614, 2003.
- [48] M. Kuzik, A. Elwi, J. Roger, “Cyclic flexure tests of masonry walls reinforced with glass fiber reinforced polymer sheets”, *Journal of composites for construction ASCE*, pp. 20-30, 2003.
- [49] T. Almusallam, Y. Al-Salloum, “Behavior of FRP strengthened infill walls under in-plane seismic loading”, *Journal of composites for construction ASCE*, pp. 308-318, 2007.
- [50] H. Santa-Maria, P. Alcaino, “Repair of in-plane shear damaged masonry walls with external FRP”, *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1172-1180, 2011.
- [51] D. Kakaletsis, “Comparison of CFRP and alternative seismic retrofitting techniques for bare and infilled RC frames”, *Journal of composites for construction ASCE*, pp. 565-577, 2011.
- [52] V. Popa, R. Pascu, A. Papurcu, “In plane cyclic behavior of masonry walls jacketed with fiber reinforced mortar and fiber grids”, *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, vol. 3, pp. 36-43, 2013.
- [53] M. Soheil, R. Ahmady, H. Farshchi, “In situ repair technique of infill masonry walls in Steel frames damaged after an earthquake”, *Engineering Structures*, vol. 178, pp. 665-679, 2019.
- [54] E. Mustafaraj, Y. Yardim, “Retrofitting damaged unreinforced masonry using external shear strengthening techniques”, *Journal of Building Engineering*, vol. 26, pp. 1-11, 2019.
- [55] H. Khan, R. Nanda, “Out-of-plane bending of masonry wallette strengthened with geosynthetic”, *Construction and Building Materials*, vol. 231, pp. 1-13, 2020.

[56] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), “NMX-C-404-ONNCCE-2010 Industria de la construcción - Mampostería – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo”.

Apéndice A