

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

COLEGIO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Facultad de Ingeniería Culiacán

Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería



“Análisis y diseño de una estructura de mampostería reforzada con GFRP”

TESIS

Que como requisito para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Presenta

Ing. Aron Nevarez Melchor

Director de tesis

Dr. Juan Bojórquez Mora

Codirector de tesis

Dr. Jesús Martín Leal Graciano

Culiacán, Sinaloa, Noviembre de 2025



Universidad Autónoma de Sinaloa

Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso



Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd.
Universitarios
C.P. 80010 Culiacán Sin. Méx.
Tel (667) 713 78 32 y
(667) 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud se dirige a Dios, a mi madre, padre, esposa e hijo, quienes son mi apoyo incondicional. En cada sueño realizado ustedes son parte de él, siempre están en mis propósitos.

Expreso mi agradecimiento al Dr. Juan Bojórquez por su colaboración en este proyecto de investigación. Y también dignamente al Dr. J. Martin Leal con quien trabaje mano a mano, hombro a hombro. Sus experiencias, contribuciones, conocimientos están implícitamente en este gran proyecto.

A los docentes del posgrado en Ciencias de la Ingeniería de la UAS, quienes han estado presente en mi formación, le otorgo mis respeto y admiración por su loable vocación.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Sinaloa por la oportunidad de cursar una vez más un grado académico.

Y por último agradecer a la SECIHTI por la beca otorgada para solventar dicho estudio, nuevamente muchas gracias por su contribución.

“Sursum versus”

DEDICATORIA

A mi madre, Baudilia Melchor Vega.

Para mi padre, Ramiro Nevarez González.

Mi esposa, Araney Aispuro Soto.

Y a mis futuros hijos.

Quienes son mis cimientos de vida en este mundo, mis sentimientos por ustedes van más allá de las palabras que se puedan plasmar en una dedicatoria, todos ustedes conforman mi corazón, son mis pensamientos diarios, mis sueños, mis alientos y suspiros.

Siempre es por ustedes y para ustedes.

RESUMEN

En este proyecto se estudió la implementación de fibra de vidrio (GFRP, Glass Fiber Reinforced Polimers) en el análisis y diseño de estructuras de mampostería. El objetivo fue establecer una metodología para el uso de este material compuesto como alternativa de refuerzo estructural, la cual fue validada a partir de resultados experimentales obtenidos previamente en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Culiacán, Sinaloa, México.

Para alcanzar el objetivo planteado se realizaron las siguientes actividades esenciales: 1) Se realizó una revisión detallada de códigos de diseño internacionales con el propósito de identificar ecuaciones existentes que pudieran ser usadas en el diseño de muros reforzados con láminas externas de GFRP; 2) se analizaron los resultados experimentales obtenidos en investigaciones previas sobre cuatro muros de mampostería de block reforzados con distintas cuantías de bandas inclinadas de GFRP sometidos a carga lateral en el plano; 3) se calibraron las ecuaciones existentes adaptándolas a las condiciones particulares de los muros previamente ensayados para predecir su resistencia lateral con una aproximación aceptable; y 4) se realizó el análisis y diseño de una estructura prototipo de mampostería considerando las especificaciones de la normativa mexicana vigente relativo al cálculo de las cargas sísmicas y a las resistencias de los elementos estructurales. Se realizó un análisis modal espectral elástico del modelo y se diseñó bajo dos condiciones de refuerzo: barras de acero horizontales en las juntas de mortero y bandas inclinadas de GFRP externamente adheridas a los muros.

Los resultados muestran que existen pocas recomendaciones para el análisis y diseño de muros de mampostería reforzado con materiales compuesto, puesto que se identificó solo a la guía italiana CNR-DT 200 R1/2014 para aplicarse en la predicción de la resistencia de los especímenes previamente ensayados. Los resultados experimentales mostraron que el refuerzo GFRP tiene efectos similares al refuerzo horizontal en el comportamiento lateral de los muros. Por lo que se recomienda que en el análisis y diseño de muros reforzados con fibra de vidrio se utilicen los mismos valores para el factor de comportamiento sísmico y distorsiones máximas que para muros con refuerzo horizontal. Respecto a la calibración de

las ecuaciones, se obtuvo que con la guía italiana CNR-DT 200 R1/2014 se predice aceptablemente bien la contribución de la fibra de vidrio a la resistencia lateral de los muros mampostería de block. Sin embargo, se debe considerando un área efectiva de refuerzo, la cual se obtiene al despreciar el material compuesto que se encuentra en la zona del muro donde se desarrollan esfuerzos de compresión en la dirección de las bandas de GFRP. Finalmente, a partir del análisis y diseño de una estructura prototipo de mampostería se establece la siguientes metodología para incorporar el refuerzo GFRP: 1) realizar el análisis de la estructura por medio de un software comercial, no se requiere agregar elementos adicionales para representar al refuerzo, ya que este no afecta la rigidez de la estructura; 2) la resistencia a cortante de los muros es igual a la suma de la resistencia del panel de mampostería y la contribución del refuerzo GFRP; 3) La resistencia de la mampostería puede ser estimada con las ecuaciones de las normas mexicanas y la contribución del refuerzo se puede estimar con las especificaciones de la guía italiana CNR-DT 200 R1/2014; 4) Identificar la zona de esfuerzos de compresión en los muros producida por la carga lateral; y 5) en la contribución del GFRP a la resistencia de cada muro, considerar un área efectiva del refuerzo, la cual se obtiene despreciendo el material de refuerzo que se ubica en la zona de compresión.

Palabras Clave: Mampostería confinada, Resistencia a corte, Refuerzo horizontal, Fibra de vidrio, GFRP.

ABSTRACT

In this investigation the implementation of Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP) in the analysis and design of masonry structures was studied. The objective was to establish a methodology for using this composite material as an alternative for structural reinforcement, which was validated through experimental results previously obtained in the Structures Laboratory of the Faculty of Engineering located in Culiacán, Sinaloa, México.

To achieve this objective, the following essential activities were carried out: 1) A detailed review of international design codes was conducted to identify existing equations that could be used in the design of walls reinforced with externally bonded GFRP strips; 2) Experimental results obtained in previous studies on four hollow concrete block masonry walls were analyzed, which were reinforced with different amounts of inclined GFRP strips and subjected to in-plane lateral load; 3) Existing equations were calibrated and adapted to the specific conditions of the previously tested walls to predict their lateral strength with acceptable approximation; and 4) The analysis and design of a prototype masonry structure was performed, considering the specifications of the current Mexican code regarding the calculation of seismic actions and the strength of structural elements. An elastic modal spectral analysis of the model was conducted, and the design was carried out under two reinforcement conditions: horizontal steel bars in the mortar bed-joints and externally bonded inclined GFRP strips on the walls.

The results show that there are few recommendations for the analysis and design of masonry walls reinforced with composite materials, since only the Italian guide CNR-DT 200 R1/2014 was identified as applicable to predict the strength of the previously tested specimens. The experimental results demonstrated that GFRP reinforcement had beneficial effects on the lateral behavior of the walls, which are similar to that produced by horizontal reinforcement. Therefore, it is recommended that the same values for the seismic behavior factor and maximum drifts used for walls with horizontal reinforcement be applied in the analysis and design of walls reinforced with fiberglass. Regarding the calibration of the equations, it was found that the Italian guide CNR-DT 200 R1/2014 acceptably predicts the contribution of the GFRP to the lateral strength of hollow concrete block masonry walls.

However, an effective reinforcement area must be considered, which is obtained by neglecting the composite material located in the wall area where compressive stresses are developed in the direction of the GFRP strips.

Finally, based on the analysis and design of a prototype masonry structure, the following methodology for incorporating GFRP reinforcement was established: 1) Analyze the structure using commercial software; no additional elements are required to represent the reinforcement, due to it does not affect the stiffness of the structure; 2) The shear strength of the walls is equal to the sum of the strength of the masonry panel and the contribution of the GFRP reinforcement; 3) The masonry shear strength can be estimated using the equations from the Mexican code, and the contribution of the reinforcement can be estimated using the specifications of the Italian guide CRN-DT 200 R1/2014; 4) Identify the zone of compressive stresses in each walls produced by the lateral load; and 5) For the GFRP contribution to the shear strength of each wall, consider an effective reinforcement area, obtained by neglecting the reinforcement material located in the compression zone.

Keywords: Confined masonry, Shear strength, Horizontal reinforcement, Glass fiber, GFRP.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar recomendaciones para el análisis y diseño de estructuras de mampostería reforzada con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés) a partir de resultados experimentales previos, que permitan su implementación en la práctica constructiva mexicana.

Objetivos Específicos

- Calibrar las ecuaciones existentes para el cálculo de la resistencia a corte de muros de mampostería a partir de resultados experimentales previos.
- Desarrollar una metodología que permita incorporar el uso de GFRP en el análisis y diseño de estructuras de mampostería ante cargas sísmicas, utilizando un software comercial.
- Comparar el diseño ante carga sísmica de una estructura de mampostería reforzada con GFRP con el de una estructura con refuerzo horizontal.

ÍNDICE

Carta Repositorio Institucional.....	ii
Carta cesión de derechos del estudiante	iii
Carta cesión de derechos del director de tesis	iv
Aprobación de tema y comité de tesis.....	v
Carta de liberación de tesis.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
DEDICATORIA.....	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
OBJETIVOS.....	xiii
ÍNDICE.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS	xx
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Antecedentes y estado del arte	3
1.3 Hipótesis.....	6
2 ASPECTOS TEÓRICOS.....	7
2.1 Propiedades mecánicas de la mampostería	7
2.1.1 Resistencia a la compresión.....	7
2.1.2 Resistencia a la compresión diagonal.....	9
2.1.3 Módulo de elasticidad y de cortante de la mampostería.....	11
2.2 Mampostería confinada.....	14

2.2.1	Definiciones.....	14
2.2.2	Comportamiento estructural de la mampostería confinada	15
2.2.3	Especificaciones de las NTC-Mampostería 2023 para mampostería confinada.....	18
2.3	Refuerzo horizontal.....	25
2.3.1	Especificaciones de las NTC-Mampostería 2023 para refuerzo horizontal	26
2.4	Refuerzo con fibra de vidrio (GFRP).....	30
2.4.1	Especificaciones de la CNR DT 200 R1 2014 para materiales compuesto (FRP)	33
2.5	Análisis dinámico modal espectral elástico	40
2.6	Modelación por el método del elemento finito	42
3	METODOLOGÍA.....	45
3.1	Material requerido.....	45
3.2	Infraestructura	45
3.2.1	Laboratorios y equipos	45
3.3	Procedimientos.....	45
3.3.1	Revisión bibliográfica	45
3.3.2	Análisis de datos experimentales previos.....	46
3.3.3	Calibración de ecuaciones	52
3.3.4	Descripción del modelo prototipo de una estructura de mampostería.....	67
3.3.5	Análisis y diseño del modelo prototipo	73
3.3.6	Resultados del análisis dinámico modal espectral.....	85
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	93
4.1	Cortante de entrepiso.....	93

4.2	Revisión por cortante para cada muro.....	94
4.2.1	Revisión de la resistencia a cortante de los muros sin refuerzo	94
4.2.2	Revisión de la resistencia de los muros considerando el uso de refuerzo horizontal.....	107
4.2.3	Revisión de la resistencia de los muros considerando el uso de refuerzo con GFRP de acuerdo con la CNR DT 200 R1 2014.....	120
4.3	Revisión de los desplazamientos.....	136
4.3.1	Desplazamiento lateral para el límite de servicio.....	136
4.3.2	Desplazamientos laterales para seguridad contra el colapso	137
5	CONCLUSIONES	140
6	BIBLIOGRAFÍA	142
7	ANEXOS	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistencia a compresión para diseño de la mampostería de piezas de concreto, f_m' , sobre área bruta a partir de la resistencia a compresión de la pieza, f_p' [23].	8
Tabla 2. Resistencia a compresión para diseño de la mampostería de piezas de arcilla, f_m' , sobre área bruta a partir de la resistencia a compresión de la pieza, f_p' [23].	8
Tabla 3. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería, f_m' , para algunos tipos de piezas, sobre área bruta [23].	9
Tabla 4. Resistencia de diseño a compresión diagonal, v_m' , para algunos tipos de mampostería, sobre área bruta [23].	11
Tabla 5. Rango de propiedades de las fibras para compuestos de FRP [3].	32
Tabla 6. Factores parciales γ_m [30].	38
Tabla 7. Propiedades mecánicas de los materiales (MPa).	48
Tabla 8. Resultados de rigidez y resistencia lateral correspondientes a los puntos críticos.	51
Tabla 9. Resultados de distorsión y ductilidad en especímenes.	51
Tabla 10. Distorsiones permisibles de entrepiso [31].	77
Tabla 11. Factor correctivo por irregularidad, α [31].	79
Tabla 12. Carga para losas de entrepisos.	81
Tabla 13. Cargas para losa de azotea.	81
Tabla 14. Condiciones de carga.	82
Tabla 15. Combinaciones de carga para diseño.	82
Tabla 16. Propiedades del concreto y acero de refuerzo.	82
Tabla 17. Propiedades de la mampostería.	82

Tabla 18. Centro de masa y rigidez.	86
Tabla 19. Participación de masas modales.	87
Tabla 20. Períodos y frecuencias modales.....	88
Tabla 21. Reacciones en la base del análisis dinámico modal espectral lineal.....	90
Tabla 22. Cortante basal del análisis dinámico modal espectral lineal.....	91
Tabla 23. Revisión de cortante de entrepiso en dirección X.....	94
Tabla 24. Revisión de cortante de entrepiso en dirección Y.....	94
Tabla 25. Resistencia a cargas laterales de muros sin refuerzo nivel 1 dirección X y Y.....	99
Tabla 26. Resistencia a cargas laterales de muros sin refuerzo nivel 2 en dirección X y Y.....	101
Tabla 27. Resistencia a cargas laterales de muros sin refuerzo nivel 3 en dirección X y Y.....	103
Tabla 28. Resistencia a cargas laterales de muros sin refuerzo nivel 4 en dirección X y Y.....	105
Tabla 29. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo horizontal nivel 1 en dirección X y Y.....	108
Tabla 30. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo horizontal nivel 2 en dirección X y Y.....	111
Tabla 31. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo horizontal nivel 3 en dirección X y Y.....	114
Tabla 32. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo horizontal nivel 4 en dirección X y Y.....	117
Tabla 33. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo GFRP nivel 1 en dirección X y Y.....	124

Tabla 34. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo GFRP nivel 2 en dirección X y Y.....	127
Tabla 35. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo GFRP nivel 3 en dirección X y Y.....	130
Tabla 36. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo GFRP nivel 4 en dirección X y Y.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pila para prueba en compresión [23].....	7
Figura 2. Murete para prueba en compresión diagonal [23].....	10
Figura 3. Mecanismo de falla.	11
Figura 4. Criterio para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería a partir de la curva esfuerzo-deformación (ONNCCE-2010) [1].	12
Figura 5. Criterio para obtener el módulo de cortante de la mampostería a partir de la curva esfuerzo-deformación (ONNCCE-2010) [1].	13
Figura 6. Características de los muros confinados [24].	15
Figura 7. Mampostería confinada típica en México [23].	16
Figura 8. Modos de falla característicos en muros de mampostería confinada [1].	17
Figura 9. Restricción a la deformación lateral [23].	19
Figura 10. Excentricidad de la carga vertical en muros extremos [23].	20
Figura 11. Diagrama de interacción carga axial-momento flexionante resistente de diseño con el método optativo [23].	20
Figura 12. Requisitos para mampostería confinada [23].	22
Figura 13. Detallado de castillos y dalas [23].	24
Figura 14. Refuerzo en borde inferior de ventanas y extremo superior de pretilas [23].	25
Figura 15. Requisitos para colocación y protección del refuerzo de la NTC-Mampostería 2023 [23].	29
Figura 16. Anclaje de refuerzo horizontal [23].	30
Figura 17. Falla debido al arrancamiento de la mampostería [30].	35
Figura 18. Máxima fuerza transferida entre FRP y el concreto [30].	35

Figura 19. La distribución de la resistencia de pegado para piedras de forma irregular [30].	37
Figura 20. Distribución de resistencia de pegado para piedras de forma regular [30].	37
Figura 21. Muro reforzado con FRP inclinado por un ángulo α [30].	39
Figura 22. Pasos del análisis modal espectral [25].	42
Figura 23. Modelo de muro con elementos finitos [23].	44
Figura 24. Descripción de especímenes.	46
Figura 25. Condiciones del acero de refuerzo.	47
Figura 26. Muro confinado mediante dalas y castillos [41].	48
Figura 27. Marco de carga e instrumentación [41].	49
Figura 28. Curvas histeréticas.	50
Figura 29. Curvas envolventes.	51
Figura 30. Zona de esfuerzos de compresión de muros con diferentes relaciones de aspecto.	54
Figura 31. Patrón de agrietamiento del espécimen MCB-FV10, MCB-FV30 y MCB-FV50 [41-42].	54
Figura 32. Localización satelital del proyecto.	67
Figura 33. Planta Arquitectónica Nivel 1.	68
Figura 34. Planta Arquitectónica Tipo.	69
Figura 35. Fachada Arquitectónica.	70
Figura 36. Corte A-A arquitectónico.	70
Figura 37. Corte B-B arquitectónico.	71
Figura 38. Planta arquitectónica de Azotea.	72

Figura 39. Consideraciones de diseño.	74
Figura 40. Espectro de diseño sísmico transparente.	74
Figura 41. Espectro de diseño sísmico reducido para el estado límite de servicio.	80
Figura 42. Espectro de diseño sísmico reducido para el estado límite de prevención de colapso.	80
Figura 43. Modelo estructural tridimensional.	84
Figura 44. Estructura modelada con elementos finitos (cascarón y barras) discretizados.	85
Figura 45. Localización de muros de mampostería en primer nivel.	95
Figura 46. Localización de muros de mampostería en segundo nivel.	96
Figura 47. Localización de muros de mampostería en tercer nivel.	97
Figura 48. Localización de muros de mampostería en cuarto nivel.	98
Figura 49. Gráfica de desplazamientos laterales para el estado límite de servicio dirección X.	136
Figura 50. Gráfica de desplazamientos laterales para el estado límite de servicio dirección Y.	137
Figura 51. Gráfica de distorsiones de entrepisos para el estado límite de colapso dirección X.	138
Figura 52. Gráfica de distorsiones de entrepisos para el estado límite de colapso dirección Y.	138
Figura A1. Muro reforzado con FRP inclinado por un ángulo α [30].	146
Figura A2. Distribución de bandas diagonales de GFRP en muro de mampostería.	148
Figura A3. Componente de la fuerza T_i en una banda inclinada de GFRP.	149

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La mampostería se define como un material estructural constituido por unidades de origen pétreo, tanto naturales como artificiales, unidas mediante un mortero aglutinante [1]. Este sistema constructivo se emplea para erigir muros y diversas estructuras, destacándose por su durabilidad y resistencia mecánica.

En la actualidad, la mampostería es fundamental en la construcción de viviendas, gracias a su elevada resistencia a compresión, así como a sus propiedades térmicas y acústicas. Su capacidad para absorber y distribuir cargas convierte a la mampostería en un componente esencial en la infraestructura de muchas regiones. Este sistema constructivo se emplea en una amplia variedad de edificaciones.

No obstante, la mampostería presenta limitaciones notables, especialmente en términos de resistencia a la tensión diagonal y ductilidad. Estas deficiencias en la mampostería se manifiestan cuando los muros desarrollan patrones de grietas y daños, los cuales están severamente relacionados con fuerzas cortantes inducidas por acciones sísmicas laterales. La falta de detallado adecuado, como el uso insuficiente de refuerzo vertical y/o horizontal, y el confinamiento inadecuado del muro de mampostería mediante castillos y dalas, puede llevar a un comportamiento sísmico frágil e inestable, resultando en niveles limitados de deformación inelástica [2].

Una solución prometedora para mitigar estas limitaciones de la mampostería es el uso de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés). El GFRP es un material compuesto que combina la resistencia de las fibras de vidrio con la durabilidad de una matriz polimérica. Este material no solo proporciona una elevada resistencia a la tensión, sino que también es notablemente resistente a la corrosión [3]. La implementación de refuerzos externos de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) en muros de mampostería ha evidenciado una mejora notable en su resistencia frente a las cargas laterales en el plano, así como a las cargas perpendiculares al plano. Este hecho ha sido documentado en diversos estudios [4-8].

La Norma Técnica Complementaria para la Evaluación y Rehabilitación Estructural de Edificios Existentes (NTC-EREEE, 2023) [9] incluye algunas recomendaciones generales para el uso de compuestos de polímeros reforzados con fibras (CPRF) en la rehabilitación de estructuras de mampostería, como son los polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés) y de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste en aplicar bandas o láminas de CPRF a la superficie de los muros para aumentar su capacidad de resistencia a flexión y cortante, así como mejorar su ductilidad. La norma sugiere considerar el uso de resinas epoxi para la adhesión de las fibras de carbono, vidrio o aramid, dependiendo del tipo de rehabilitación requerida. Además, enfatiza la importancia de un análisis estructural previo para determinar la conveniencia y efectividad del uso de CPRF. Dicha norma también remite al código ACI PRC-440.7-22 [10] para obtener pautas adicionales sobre las condiciones de diseño y las limitaciones del uso de estos materiales.

Actualmente, no se cuenta con especificaciones detalladas para el uso del GFRP como refuerzo en muros de mampostería, calibradas con resultados experimentales locales, lo que representa una limitación significativa para su implementación en la práctica constructiva. No se han desarrollado ecuaciones de diseño específicas basadas en ensayos experimentales locales, y las ecuaciones disponibles, derivadas generalmente de estudios internacionales, pueden no ser completamente aplicables a los materiales y técnicas constructivas utilizados localmente. Esta falta de información limita la capacidad de los ingenieros para diseñar de manera precisa y segura muros con refuerzo GFRP, dificultando su adopción efectiva y confiable en proyectos de construcción.

En esta investigación, titulada "Análisis y diseño de una estructura de mampostería reforzada con GFRP", se busca abordar estas deficiencias normativas mediante la adaptación de ecuaciones y directrices calibradas con datos de investigaciones experimentales locales previas. Este estudio proporciona un análisis detallado y comparativo entre el diseño sísmico de una estructura de mampostería con refuerzo convencional a base de varillas horizontales de acero y la de una reforzada con GFRP. Los resultados obtenidos pueden contribuir a la generación de nuevas especificaciones y recomendaciones para la construcción y refuerzo de edificios de mampostería, fomentando el uso de GFRP como una solución viable y efectiva para mejorar su seguridad estructural.

1.2 Antecedentes y estado del arte

La mampostería, un material de construcción milenario, tiene sus raíces en las primeras civilizaciones humanas. Desde los principios del sedentarismo, las construcciones de mampostería han acompañado a la humanidad en su necesidad de generar entornos habitables que ofrecieran protección frente a las condiciones adversas del medio natural. En sus etapas más primitivas, las técnicas constructivas consistían en entramados de ramas chapeadas con lodo. Con el transcurso del tiempo, estas soluciones dieron paso a edificaciones más duraderas, en las que se incorporaron sistema de piedra natural como elemento principal, complementados con cubiertas elaboradas a partir de troncos, ramas y hojas, pasando después a crear piedras artificiales y a desarrollar sistemas de techo más elaborados. La referencia más antigua sobre las construcciones de mampostería se encuentra en la Biblia, ya que en los versículos 3 y 4 del capítulo 11 del Génesis se narra: el relato mítico de la Torre de Babel [1].

La unidad de mampostería más antigua conocida, fabricada por el ser humano como sustituto de la piedra natural en regiones donde ésta escaseaba, corresponde a bloques de arcilla moldeados manualmente y secados al sol. La evidencia arqueológica más temprana, hallada en las ruinas de Jericó, consiste en una pieza de lodo de aproximadamente 15 kg, con forma alargada similar a una hogaza de pan rústica, junto con mortero de barro para su colocación. Este hallazgo, contemporáneo con los inicios de la escritura hace alrededor de 6000 años, marca el "estado del arte" primigenio de la construcción con unidades manufacturadas [11].

Los sumerios, quienes son considerados como la primera civilización organizada de la región mesopotámica, desarrollaron innovaciones constructivas en respuesta a la carencia de materiales pétreos en su entorno geográfico. Esta limitante incentivó la invención de moldes para producir unidades de barro con geometría prismática, conocidas como adobes, cuya forma permitió una colocación más precisa y versátil, facilitando así la edificación de estructuras de gran escala. Hacia el año 3000 a.C., en la ciudad sumeria de Ur, se perfeccionó el proceso mediante la cocción de adobes en hornos, dando origen al ladrillo cerámico. Estos se unían con morteros compuestos por arena y betún, marcando un hito en la evolución de los materiales de construcción [1].

Más tarde, entre 1100 y 146 a.C., en civilizaciones como la Griega contaban con una arquitectura de alta gama ya que utilizaban mármol para revestir la mampostería de piedra caliza debido a que en esa región se encontraban grandes yacimientos de dicho material. En el caso de la civilización Romana (743 a.C. y siglo V), se distinguió por utilizar recursos locales (caliza, travertino y tufa volcánica) y perfeccionar técnicas constructivas previas como la de los sumerios, destacándose la evolución del ladrillo de arcilla. Esta tecnología se consolidó con la incorporación del mortero de cemento y del concreto romano, con lo que se realizaron distintos sistemas constructivos de muros, siendo más económicos y fáciles de construir, de acuerdo con el relato de Vitrubio (arquitecto e ingeniero) en el año 25 a.C. Después de Roma, durante el siglo V al siglo XIX, el desarrollo de la tecnología de la mampostería cesa su crecimiento en Europa debido a que las nuevas civilizaciones preferían la construcción a base de madera que abundaba en el entorno; el uso de mortero de cemento y de concreto se desvanece, y el conocimiento de la mampostería se olvida. Tuvieron que transcurrir trece siglos para que nuevamente fuera retomada esa tecnología por el fundador de la ingeniería moderna, Smeaton. Con el inicio de la revolución industrial en el siglo XIX, se introdujo avances significativos en la producción y utilización de materiales de mampostería, como el perfeccionamiento de hornos y la invención del cemento Portland. Estos desarrollos sentaron las bases para el uso extendido de la mampostería en la construcción moderna [11]. Con el transcurso del tiempo, los elementos y sistemas constructivos basados en mampostería han experimentado un proceso continuo de innovación y desarrollo.

El uso de materiales compuestos, como los polímeros reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés), comenzó a explorar su potencial en la mejora del comportamiento estructural de muros de mampostería a finales del siglo XX y en el comienzo del siglo XXI [12-15].

En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosos proyectos de investigación en universidades e instituciones de Europa, América del Norte y Asia, orientados para la ejecución de refuerzo de FRP en la construcción. Estos estudios han confirmado la eficacia del uso de FRP en mejorar las propiedades mecánicas de la mampostería [16]. Un estudio importante es el de Yu et al. [17] quienes estudiaron el refuerzo de muros de mampostería

con tiras de GFRP dispuestas en varias configuraciones. Los resultados mostraron un aumento considerable en la resistencia al corte de los muros reforzados en contraste con los no reforzados.

El-Diasity et al. [18] estudiaron el comportamiento de muros de mampostería confinada reforzados con GFRP bajo cargas laterales cíclicas. Se encontró que configuraciones específicas de refuerzo, como franjas diagonales, pueden contribuir a prevenir fallos por corte y mejorar la resistencia lateral y la disipación de energía.

En otras investigaciones como las de Leal-Graciano et al. [19] se investigó el uso de GFRP como una opción de refuerzo para muros de mampostería confinada con abertura de ventana sometidos a carga lateral en el plano. El objetivo principal del estudio fue evaluar la capacidad de resistencia y el comportamiento de estos muros reforzados mediante pruebas experimentales y análisis numéricos. Los resultados mostraron que el refuerzo con GFRP mejora significativamente la capacidad de carga lateral y la ductilidad de los muros de mampostería. Además, se observó una reducción en el daño y la propagación de grietas, lo que sugiere que el GFRP puede ser una alternativa viable para mejorar la seguridad y durabilidad de las estructuras de mampostería en zonas sísmicas.

Según los resultados de estudios recientes, el uso de fibra de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés) en muros de mampostería confinada puede aumentar su resistencia al corte, ductilidad y capacidad de deformación. Mosallam y Banerjee [20] ensayaron seis muros a escala natural, reforzados con distintos esquemas de laminados FRP, observando un aumento de hasta un 35% en la resistencia a corte y un cambio favorable en el modo de falla, que pasó de ser predominantemente frágil a un comportamiento más dúctil. De manera similar, Corbi [21] evaluó experimentalmente el refuerzo de paneles de mampostería a través de CFRP aplicadas con resina epoxi, evidenciando el incremento de la resistencia al corte, reducción de los desplazamientos y una mayor capacidad de recuperación tras la descarga. Guerreiro et al. [22] también realizaron una caracterización experimental del comportamiento en el plano de muros de mampostería antigua reforzados con CFRP, encontrando mejoras significativas en la resistencia y capacidad de deformación.

En México, la necesidad de adaptar estos avances a las características específicas de la mampostería local es evidente. Es de suma importancia continuar con investigaciones que cuantifiquen la efectividad del uso de FRP en condiciones locales y desarrollar recomendaciones de diseño adecuadas.

1.3 Hipótesis

- Las ecuaciones existentes para calcular la resistencia a corte de muros de mampostería reforzados con GFRP proporcionan una predicción satisfactoria en comparación con resultados experimentales obtenidos en Culiacán, Sinaloa.
- La incorporación de refuerzo de GFRP en una estructura de mampostería es factible y supera al diseño con refuerzo horizontal.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Propiedades mecánicas de la mampostería

2.1.1 Resistencia a la compresión

A lo largo de su vida útil, los muros de mampostería están sometidos principalmente a cargas gravitacionales, por lo que resulta fundamental evaluar su comportamiento ante esfuerzos de compresión. A fin de estimar la resistencia de diseño a la compresión (f'_m), la NTC-Mampostería [23] proporciona dos criterios: 1) a partir de resultados experimentales de pilas construidas con las piezas y el tipo de mortero que se emplearán en la obra, y 2) a partir de la resistencia a la compresión de las piezas (f'_p) y de la calidad del mortero. Además, para estructuras Tipo II, según la clasificación de dichas normas, se permite el uso de valores predeterminados de f'_m , descritos en su capítulo doce.

Cuando f'_m se determina a partir de resultados experimentales, los especímenes consisten en pilas de mampostería formadas por la superposición vertical de unidades con una relación altura-espesor igual a cuatro, que se ensayan bajo carga axial perpendicular a las juntas horizontales de mortero (**Figura 1**). La resistencia se determina como la relación entre la carga máxima antes de la falla y el área transversal bruta. El valor de f'_m generalmente es menor que la resistencia individual de las piezas, debido a la interacción con el mortero y la heterogeneidad del sistema [1].

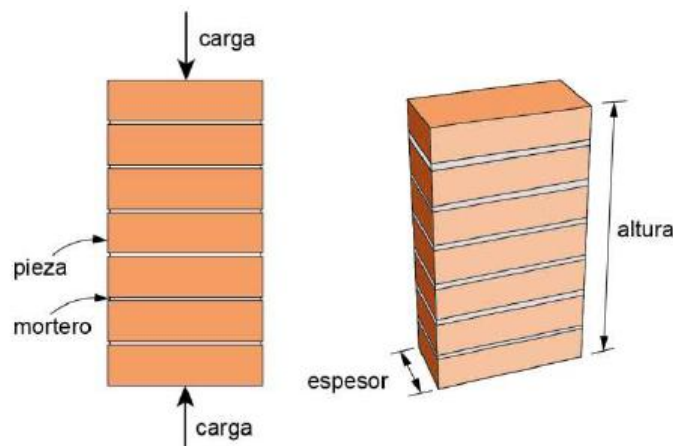


Figura 1. Pila para prueba en compresión [23].

A partir de estos ensayos, se han identificado tres modos de falla: (1) agrietamiento vertical, en el que una fisura lateral se propaga a lo largo del espécimen causando inestabilidad y

fractura frágil, especialmente en unidades huecas; (2) aplastamiento, caracterizado por la aparición de múltiples grietas que culminan en deformaciones transversales excesivas, típicas en materiales de baja resistencia como el tabique recocido; y (3) una falla combinada que incorpora las características de los dos modos anteriores, reflejando una interacción compleja entre agrietamiento e inestabilidad local [1].

Para fines de diseño, f'_m se determina empleando la siguiente expresión (ecuación 1):

$$f'_m = \frac{\overline{f_m}}{1 + 2.5c_m} \quad (1)$$

Siendo $\overline{f_m}$ la resistencia media a la compresión de las pilas y c_m es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las pilas, el cual no se tomará menor que 0.15. Actualmente, los ensayos de pilas están debidamente estandarizados, y el procedimiento para obtener la resistencia a compresión se describe en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 [51].

Cuando f'_m se obtiene a partir de la resistencia de diseño de las piezas y el mortero, la NTC-Mampostería [23] sugiere utilizar los valores indicativos de las **Tabla 1** y **Tabla 2**, para piezas de concreto y de arcilla, respectivamente.

Tabla 1. Resistencia a compresión para diseño de la mampostería de piezas de concreto, f'_m , sobre área bruta a partir de la resistencia a compresión de la pieza, f'_p [23].

f'_p (MPa)	f'_m (MPa)	
	Mortero tipo I	Mortero tipo II
6	2.5	2
7.5	4	3.5
10	5	4.5
15	7.5	6
≥20	10	9

Tabla 2. Resistencia a compresión para diseño de la mampostería de piezas de arcilla, f'_m , sobre área bruta a partir de la resistencia a compresión de la pieza, f'_p [23].

f'_p (MPa)	f'_m (MPa)	
	Mortero tipo I	Mortero tipo II
6	2	2
7.5	3	3
10	4	4
15	6	6
20	8	7
≥30	12	9

Para estructuras Tipo II, de acuerdo con la clasificación de la NTC-Mampostería [23], se permite el uso de valores predeterminados de f'_m , tomando como referencia sólo el tipo de piezas (**Tabla 3**).

Tabla 3. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería, f'_m , para algunos tipos de piezas, sobre área bruta [23].

Pieza	f'_m (MPa)
Tabique macizo de arcilla artesanal	1.5
Tabique de arcilla extruido	2.0
Bloque de concreto	1.5
Tabique de concreto (tabicón)	1.5

2.1.2 Resistencia a la compresión diagonal

Los muros de mampostería pueden estar sometidos a esfuerzos por tensión diagonal, los cuales se originan principalmente por la acción de movimientos sísmicos, asentamientos diferenciales del terreno o incluso por la distribución no uniforme de cargas gravitacionales. Este tipo de sollicitaciones generan un modo de falla distintivo, manifestado mediante la aparición de fisuras inclinadas dentro del plano del muro, asociadas a la resistencia a compresión diagonal [1].

La NTC-Mampostería [23] establece que la resistencia de diseño a compresión diagonal (v'_m) se podrá determinar a partir de resultados experimentales obtenidos en ensayos de muretes a compresión diagonal, construidos con las piezas y el tipo de mortero que se empleará en obra. Además, solo para estructuras Tipo II, se permite el uso de valores predeterminados de v'_m para algunos tipos de mampostería, presentados en el capítulo doce de la NTC-Mampostería [23].

En el ensayo de muretes se emplea una probeta con una relación de aspecto cercana a uno, cuya longitud en la base es al menos 1.5 veces la dimensión mayor de la unidad de mampostería (tabique o bloque). Este espécimen se somete a una carga de compresión aplicada a lo largo de su diagonal principal, como se muestra en la **Figura 2**. Durante el ensayo, se generan esfuerzos de compresión en la dirección de la carga y, simultáneamente, esfuerzos de tensión en dirección perpendicular a dicha diagonal. La resistencia a la compresión diagonal se define como la relación entre la carga máxima que puede resistir el murete antes de alcanzar la falla y el área bruta de la diagonal en compresión [1].

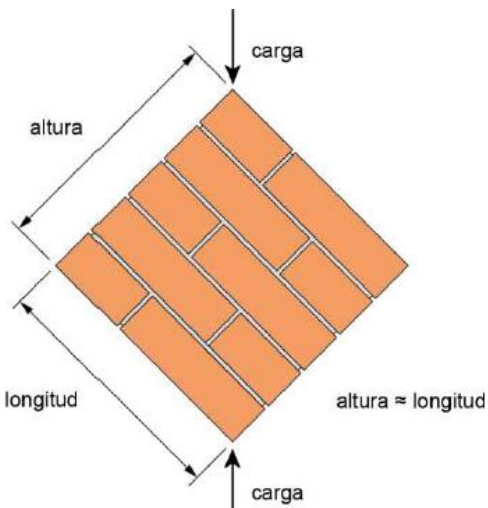


Figura 2. Murete para prueba en compresión diagonal [23].

Durante el ensaye a compresión diagonal en muretes de mampostería, es posible identificar tres patrones típicos de agrietamiento, los cuales están asociados a diferentes mecanismos de falla: (a) agrietamiento diagonal continuo que atraviesa tanto las unidades de mampostería como las juntas de mortero; (b) agrietamiento escalonado, que sigue predominantemente el trazado de las juntas horizontales y verticales de mortero; y (c) un patrón mixto, que combina ambos mecanismos anteriores. El primer tipo de falla es indicativo de una buena adherencia mortero-unidad, donde la resistencia a la tensión de la pieza es superada, provocando una fisuración diagonal a través del sistema (**Figura 3a**). En contraste, el segundo patrón ocurre cuando la adherencia es deficiente y la resistencia de las piezas es mayor, favoreciendo la propagación de grietas a lo largo de las juntas (**Figura 3b**). Finalmente, el agrietamiento mixto refleja un equilibrio entre la adherencia y la resistencia de los materiales, generando grietas que siguen parcialmente las juntas y, a la vez, atraviesan las unidades [1].

La resistencia a compresión diagonal de diseño (v'_m) se determina empleando la ecuación (2):

$$v'_m = \frac{\overline{v_m}}{1 + 2.5c_v} \quad (2)$$

Siendo $\overline{v_m}$ la resistencia media a la compresión diagonal de los muretes y c_v su coeficiente de variación, el cual no se tomará menor que 0.2. Actualmente, los ensayes de muretes

están debidamente estandarizados, y el procedimiento para obtener la resistencia a compresión diagonal se describe en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 [51].

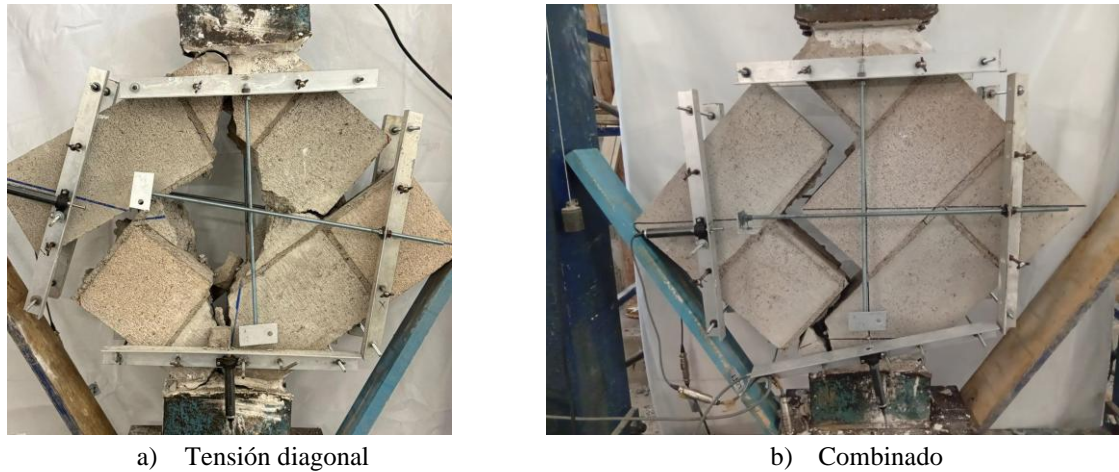


Figura 3. Mecanismo de falla.

De acuerdo con la NTC-Mampostería [23], si la estructura se clasifica como Tipo II, se permite el uso de valores predeterminados de v'_m para algunos tipos de mampostería (**Tabla 4**).

Tabla 4. Resistencia de diseño a compresión diagonal, v'_m , para algunos tipos de mampostería, sobre área bruta [23].

Pieza	v'_m (MPa)
Tabique macizo de arcilla artesanal	0.2
Tabique de arcilla extruido	0.2
Bloque de concreto	0.2
Tabique de concreto (tabicón)	0.2

2.1.3 Módulo de elasticidad y de cortante de la mampostería

Tanto el módulo de elasticidad (E_m) como el módulo de cortante (G_m) de la mampostería pueden obtenerse mediante pruebas experimentales estandarizadas en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 [51]. Para determinar E_m , dicha norma propone calcular la pendiente de una recta secante trazada sobre la curva esfuerzo-deformación obtenida del ensaye a compresión de las pilas, como se muestra en la **Figura 4**. Esta pendiente se obtiene a partir de la ecuación (3):

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (3)$$

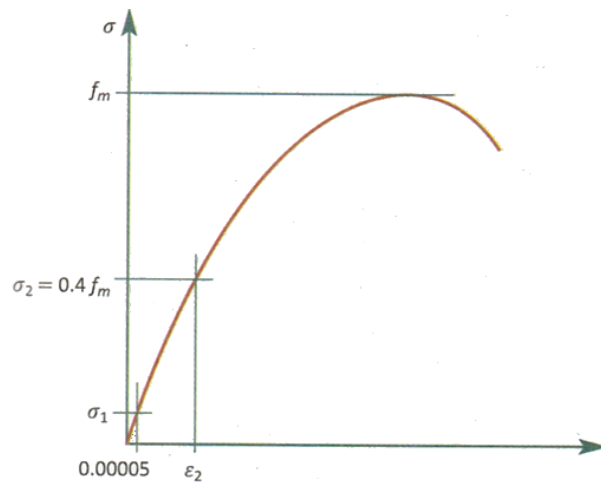


Figura 4. Criterio para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería a partir de la curva esfuerzo-deformación (ONNCCE-2010) [1].

Donde σ_1 es el esfuerzo asociado a una deformación unitaria de 0.00005, σ_2 corresponde al 40% de la resistencia a compresión y ε_2 es la deformación unitaria asociada a σ_2 .

En ausencia de evidencia experimental, el módulo de la elasticidad de la mampostería se podrá obtener a partir del tipo de pieza, de la resistencia a la compresión de la mampostería, y del tipo de acción de la carga (de corta duración o permanente) de acuerdo con los criterios siguientes (ecuaciones 4-7) [23]:

a) Para mampostería de tabiques y bloques de concreto:

para cargas de corta duración

$$E_m = 800f'_m \quad (4)$$

para cargas sostenidas

$$E_m = 350f'_m \quad (5)$$

b) Para mampostería de tabique de arcilla y otras piezas, excepto las de concreto:

para cargas de corta duración

$$E_m = 600f'_m \quad (6)$$

para carga sostenidas

$$E_m = 350f'_m \quad (7)$$

Por otro lado, el módulo de cortante (G_m) se obtiene a partir de la curva esfuerzo cortante-deformación angular ($\tau - \gamma$), como la pendiente inicial de dicha curva. No obstante, debido

a la alta dispersión experimental provocada por microfisuras tempranas, se recomienda calcular G_m mediante la pendiente de una recta secante entre esfuerzos definidos, como se ilustra en la **Figura 5**, y definida por la ecuación 8:

$$G_m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} \quad (8)$$

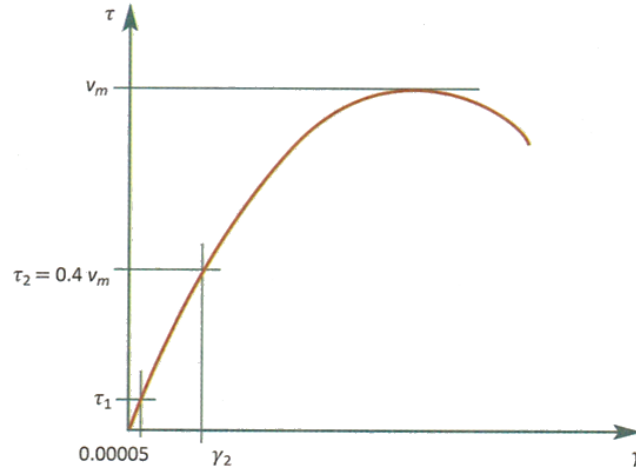


Figura 5. Criterio para obtener el módulo de cortante de la mampostería a partir de la curva esfuerzo-deformación (ONNCCE-2010) [1].

Dónde τ_1 es el esfuerzo correspondiente a una deformación angular igual a 0.00005, τ_2 el esfuerzo correspondiente al 40% de la resistencia en compresión diagonal y γ_2 la deformación unitaria correspondiente a τ_2 .

Además, en ausencia de resultados experimentales, el módulo a cortante se podrá determinar a partir del módulo de elasticidad de la mampostería de acuerdo con la expresión siguiente (ecuación 9):

$$G_m = 0.2E_m \quad (9)$$

2.2 Mampostería confinada

2.2.1 Definiciones

Los muros de mampostería confinada son elementos constructivos en los que el acero de refuerzo se concentra dentro de miembros de concreto, de sección transversal relativamente pequeña que lo rodean o lo confinan. En México, los elementos confinantes verticales y horizontales reciben el nombre de castillos y dalas, respectivamente, y son de dimensiones típicamente similares al espesor del muro. Las funciones principales de dichos elementos confinantes son: a) proporcionar continuidad a los muros; b) limitar la propagación de grietas; y c) ante acciones sísmicas, proporcionar resistencia lateral adicional y aumentar la capacidad de desplazamiento del sistema. Además, en este sistema constructivo es posible incorporar refuerzo embebido en las juntas horizontales de mortero, incrementando aún más la resistencia lateral y las capacidades de deformación y de disipación de energía [1].

En la construcción de muros confinados, el panel de mampostería se fabrica primero y luego se confina con elementos de concreto (castillos y dalas) alrededor de su perímetro (**Figura 6a**). El panel de mampostería y los elementos de confinamiento están completamente integrados porque estos elementos de concreto se moldean utilizando los lados rugosos del panel de mampostería como parte del encofrado. Debido a la buena adherencia del panel de mampostería y los elementos de amarre, y al tamaño reducido de los elementos de confinamiento, el panel de mampostería debe soportar cargas verticales. Cuando se someten a carga sísmica laterales, los muros de mampostería confinada actúan como muros de corte, similar a los muros de concreto armado (**Figura 6b**). Este comportamiento sísmico se produce porque el panel de mampostería y los elementos de confinamiento adyacentes actúan como elementos monolíticos debido a la completa integración entre ellos [24].

En México, la mampostería confinada se consolida como el sistema constructivo predominante para la edificación de vivienda, situación que se proyecta sostenible en el mediano plazo debido a su uso intensivo en mano de obra, así como a su alineación con las preferencias arquitectónicas y culturales de la población. Actualmente, los muros de mampostería constituyen el principal componente estructural para la absorción de cargas

tanto verticales como laterales en edificaciones habitacionales, ya sean de tipología unifamiliar o multifamiliar [25].

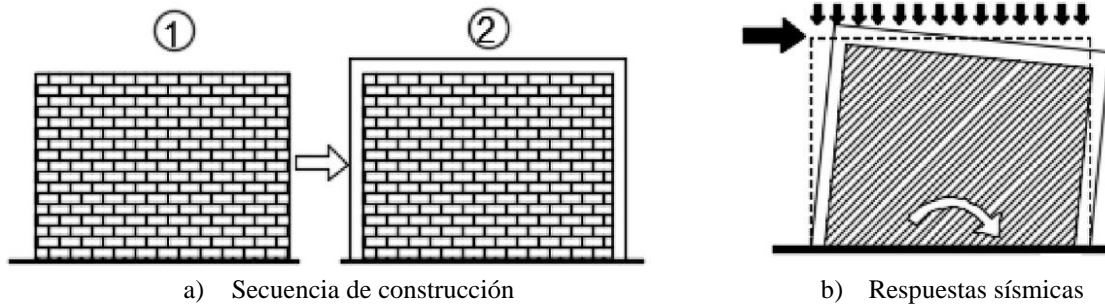


Figura 6. Características de los muros confinados [24].

2.2.2 Comportamiento estructural de la mampostería confinada

La percepción negativa asociada a la mampostería en ciertos países respecto a su capacidad resistente ante acciones sísmicas, deriva principalmente de fallas estructurales recurrentes observadas en edificaciones construidas con materiales de baja calidad y carentes de elementos de conexión adecuados entre muros, así como entre éstos y los sistemas de piso y cubierta. Dichas fallas se han traducido predominantemente en mecanismos de colapso por volteo de muros (en dirección perpendicular a su plano) o por fisuración diagonal en muros no reforzados o con aberturas excesivamente grandes. No obstante, construcciones modernas que incorporan refuerzos estructurales y sistemas de confinamiento que garantizan la conexión efectiva entre muros y su interacción con los elementos horizontales han mostrado un comportamiento sísmico aceptable bajo condiciones específicas, particularmente en lo relativo a la altura máxima de la edificación y la proporción y distribución de muros [25].

En los sistemas de muros de carga, el panel de mampostería constituye el único elemento estructural vertical encargado de resistir tanto las cargas gravitacionales como las fuerzas sísmicas, siendo admisible en zonas de alta sismicidad únicamente bajo la modalidad de mampostería confinada, ampliamente utilizada en México y Latinoamérica. Este sistema incorpora columnas de concreto reforzado (denominadas como castillos) ubicados en los extremos y a intervalos intermedios del muro, con una separación máxima de aproximadamente 4 metros, garantizando así un confinamiento efectivo. Adicionalmente, se emplean vigas horizontales de concreto (dalas) en los bordes superior e inferior del

muro, formando un marco perimetral (**Figura 7**) que no solo integra estructuralmente al muro y al sistema de piso, sino que también previene el colapso ante al agrietamiento diagonal inducido por solicitaciones sísmicas [25].

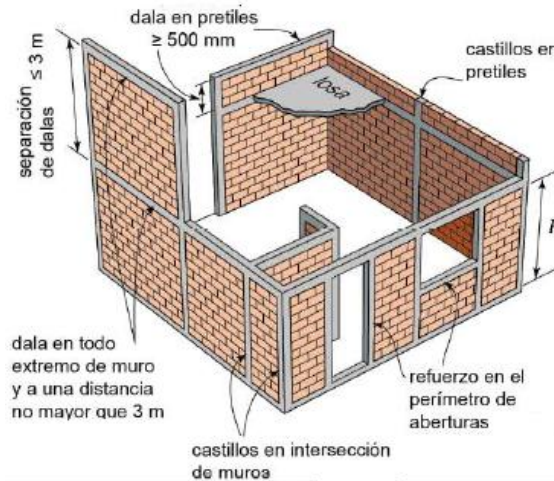


Figura 7. Mampostería confinada típica en México [23].

La evidencia experimental y el análisis del comportamiento estructural observado en edificaciones reales durante eventos sísmicos han permitido identificar tres modos de falla característicos en muros de mampostería confinada: 1) falla por flexión, 2) falla por cortante, y 3) falla por deslizamiento. La aparición de estos modos de falla depende críticamente de factores como las propiedades mecánicas de los materiales, la relación dimensional entre altura y longitud del muro, las condiciones de adherencia en la interfaz mampostería-castillo, la intensidad y naturaleza de las cargas actuantes, así como del porcentaje de refuerzo presente en los elementos de confinamiento.

La falla por flexión predomina en muros esbeltos (relación $h/l > 4/3$), donde se generan elevadas concentraciones de esfuerzos en los castillos extremos, provocando la fluencia del refuerzo longitudinal en la zona traccionada y el colapso por compresión de la mampostería en el lado opuesto (**Figura 8a**). Por otro lado, la falla por cortante se manifiesta mediante grietas diagonales que atraviesan las piezas (**Figura 8b**), o siguen las juntas de mortero (**Figura 8c**), resultado del exceso de tensiones principales respecto a la capacidad resistente del sistema. Una modalidad particular de este mecanismo es la falla por compresión diagonal, donde el efecto de puntal genera concentraciones críticas de esfuerzos en las esquinas del tablero, especialmente vulnerable en muros con unidades frágiles,

multiperforadas o de espesor reducido, así como en sistemas con refuerzo horizontal excesivo o bajo combinaciones desfavorables de cargas verticales y laterales (**Figura 8d**). El modo de falla por deslizamiento ocurre predominantemente por pérdida de adherencia en juntas horizontales sometidas a cargas verticales de baja intensidad (**Figura 8e**). Casos excepcionales de muros sometidos a compresión pura pueden presentar fallas por pandeo fuera del plano o aplastamiento directo al superarse la capacidad portante de la mampostería (**Figura 8f**) [1].

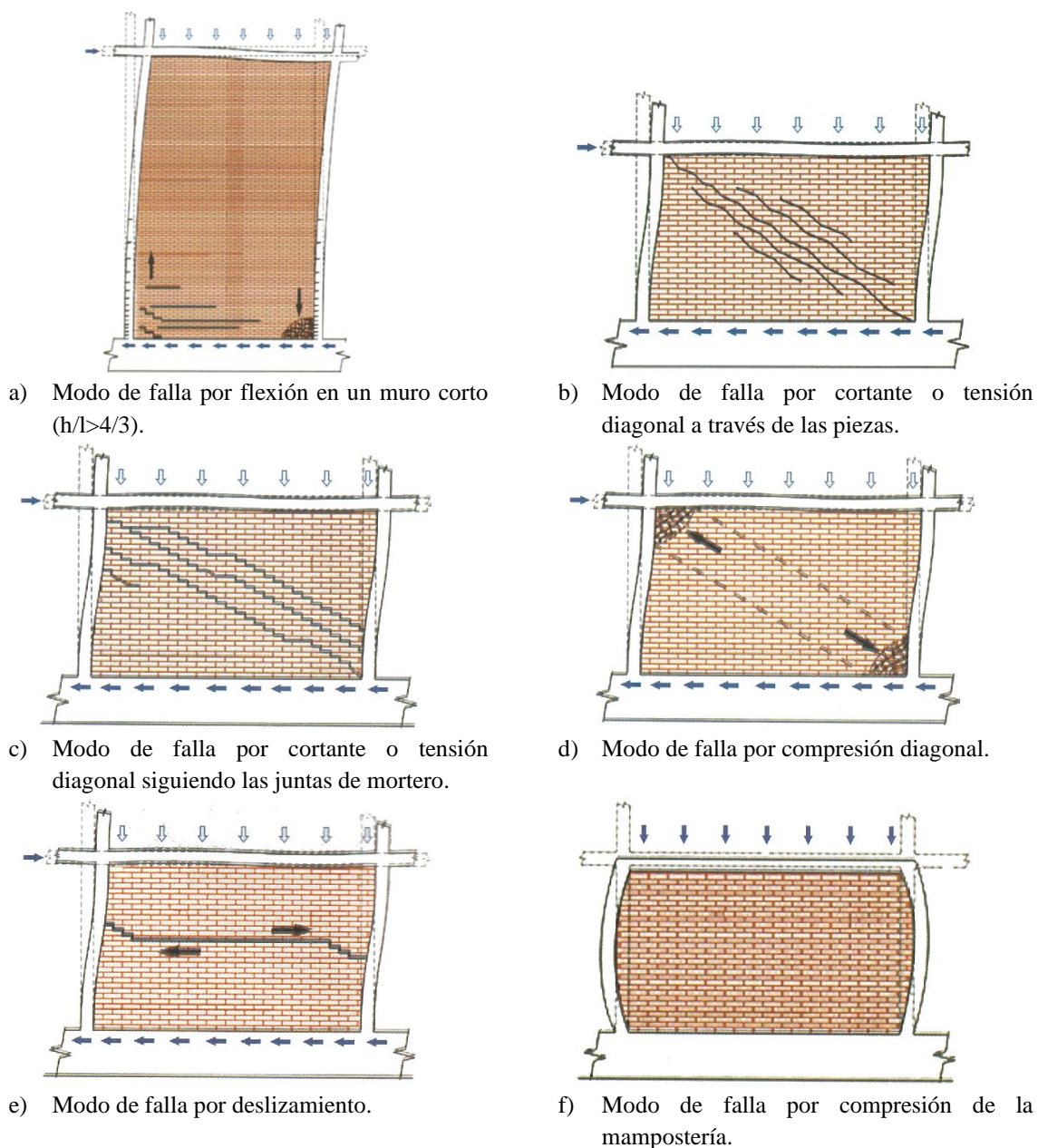


Figura 8. Modos de falla característicos en muros de mampostería confinada [1].

2.2.3 Especificaciones de las NTC-Mampostería 2023 para mampostería confinada

De acuerdo con la NTC-Mampostería [23], la resistencia ante cargas verticales y laterales de un muro de mampostería confinada deberá revisarse por el efecto de carga axial, la fuerza cortante, de momento flexionantes en su plano y, cuando proceda, también para momentos flexionantes normales a su plano principal de flexión.

Para determinar la resistencia a carga axial se toma en cuenta la excentricidad con que se transmite la carga axial al muro, la esbeltez y las condiciones de frontera del muro. La resistencia a carga axial de muros confinados se puede determinar con la ecuación 10:

$$P_R = F_R F_E (f'_m A_T + \sum A_s f_y) \quad (10)$$

donde F_R es un factor de reducción de resistencia igual 0.6, F_E es el factor de reducción por efectos de excentricidad y esbeltez, f'_m es la resistencia especificada a compresión para diseño de la mampostería (referida al área bruta), A_T es el área bruta de la sección transversal del muro, obtenida como $t \times L$, donde L es la longitud total del muro, incluyendo a los castillos y t es el espesor del muro. $\sum A_s$ es la sumatoria del área total de acero de refuerzo longitudinal colocada en cada uno de los castillos extremos del muro, f_y es el esfuerzo de fluencia especificado del acero de refuerzo.

F_E se obtendrá de acuerdo con los siguientes criterios:

- a) Se podrá tomar F_E igual a 0.7 para muros interiores que soporten claros que no difieran en más de 50%. Se podrá tomar F_E igual a 0.6 para muros extremos o con claros que difieran en más de 50%, así como para casos en que la relación entre cargas vivas y cargas muertas de diseño exceden de uno. Para ambos casos, se deberá cumplir simultáneamente 1) a 3):
 - 1) Las deformaciones superior e inferior del muro en la dirección normal a su plano están restringidas por el sistema de piso, por dadas o por otros elementos.
 - 2) La excentricidad en la carga axial aplicada es menor o igual que $t/6$ y no hay fuerzas significativas que actúen en dirección normal al plano del muro.
 - 3) La relación altura libre a espesor del muro, H/t , no excede de 20.

b) Cuando no se cumpla con las condiciones anteriores, F_E se determinará como el menor valor entre el que se especifica en el inciso (a) y el que se obtiene en la ecuación 11:

$$F_E = \left(1 - \frac{2e'}{t}\right) \left[1 - \left(\frac{kH}{30t}\right)^2\right] \quad (11)$$

donde H es la altura libre del muro medida entre elementos capaces de darle apoyo lateral, t es el espesor del muro, e' es la excentricidad calculada para la carga vertical más una excentricidad accidental que se tomara igual a $t/24$; y k es el factor de altura efectiva del muro que se determinará según el criterio siguiente:

$k = 2$ para muros sin restricción al desplazamiento lateral en su extremo superior;

$k = 1$ para muros extremos en que se apoya en losas; y

$k = 0.8$ para muros limitados por 2 losas continuas a ambos lados del muro.

En el caso de que el muro en consideración está ligado a muros transversales, a contrafuertes, a columnas o a castillos que restrinjan los desplazamientos fuera del plano, el factor F_E se calculará como (ecuación 12):

$$F_E = \left(1 - \frac{2e'}{t}\right) \left[1 - \left(\frac{kH}{30t}\right)^2\right] \times \left(1 - \frac{H}{L'}\right) + \frac{H}{L'} \leq 0.9 \quad (12)$$

donde L' es la separación de los elementos que rigidizan transversalmente al muro (**Figura 9**).

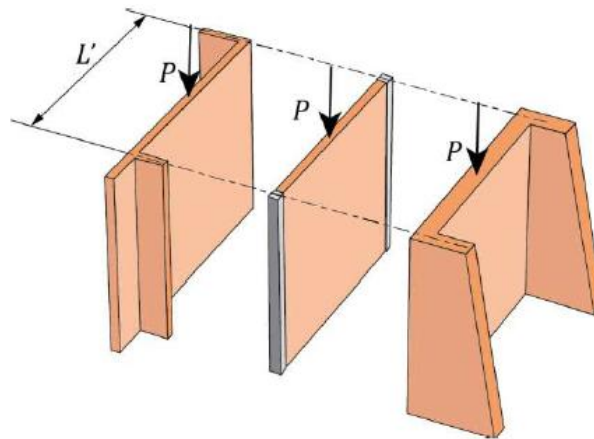


Figura 9. Restricción a la deformación lateral [23].

Mientras que la excentricidad de la carga vertical se deberá calcular con la ecuación 13:

$$e_c = \frac{t}{2} - \frac{b}{3} \quad (13)$$

donde b es la longitud de apoyo de una losa soportada por el muro (**Figura 10**).

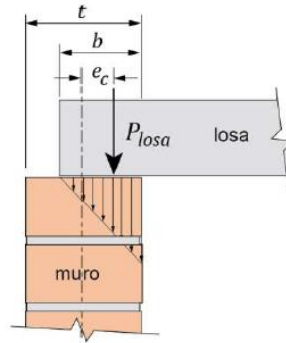


Figura 10. Excentricidad de la carga vertical en muros extremos [23].

La resistencia de los muros a flexocompresión puede calcularse utilizándose el siguiente método (véase **Figura 11**) propuesto en la NTC-Mampostería [23]. Para muros con barras longitudinales colocadas simétricamente en sus castillos extremos, sean estos externos o internos, se aceptará calcular M_R con las ecuaciones 14 y 15.

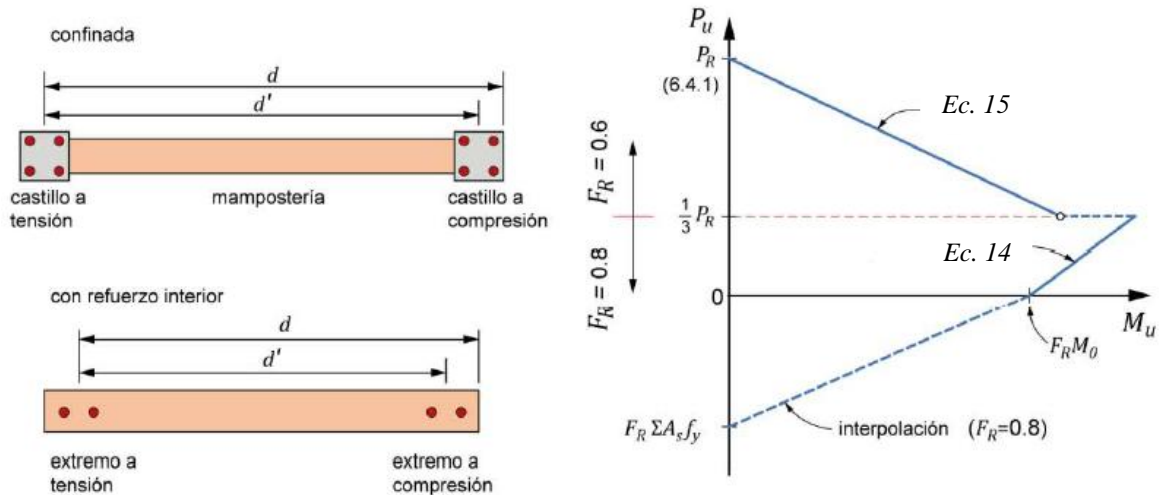


Figura 11. Diagrama de interacción carga axial-momento flexionante resistente de diseño con el método optativo [23].

$$M_R = F_R M_0 + 0.3 P_u d \text{ si } 0 \leq P_u \leq \frac{P_R}{3} \quad (14)$$

$$M_R = (1.5 F_R M_0 + 0.15 P_R d) \times \left(1 - \frac{P_u}{P_R}\right) \text{ si } P_u > \frac{P_R}{3} \quad (15)$$

Donde $M_0 = A_s f_y d'$ es la resistencia nominal a flexión pura del muro, F_R es un factor de reducción de resistencia y se tomará igual a 0.8, si $P_u \leq \frac{P_R}{3}$ e igual a 0.6 en caso contrario. Para cargas axiales de tensión será válido interpolar entre la carga axial resistente a tensión pura ($\sum A_s f_y$) y el momento flexionante M_0 , afectando el resultado por $F_R = 0.8$. Así mismo, d' es la distancia entre los centroides del acero colocado en ambos extremos del muro, mientras que d es la distancia entre el centroide del acero de tensión y la fibra extrema a compresión, A_s es el área total del acero de refuerzo longitudinal colocada en cada uno de los castillos del muro, P_u es la carga axial de diseño a compresión, cuyo valor se tomará con signo positivo en las ecuaciones 14 y 15.

La resistencia a cortante de diseño de un muro de mampostería se obtiene como la suma de la fuerza que resiste la mampostería y la contribución del refuerzo horizontal (ecuación 16).

$$V_R = V_{mR} + V_{sR} \quad (16)$$

La fuerza cortante de diseño debida a la mampostería se calculará con la ecuación 17:

$$V_{mR} = F_R(0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v'_m A_T f \quad (17)$$

donde F_R es un factor de reducción de resistencia a fuerza cortante igual a 0.7, v'_m es la resistencia a compresión diagonal de la mampostería, A_T es el área transversal del muro obtenida como $t \times L$, donde L es la longitud total del muro, incluyendo a los castillos. P es la carga axial y se deberá tomar positiva en compresión y deberá considerar las acciones permanentes, variables con intensidad instantánea, y accidentales que conduzcan al menor valor y sin multiplicar por el factor de carga. Si la carga vertical P es de tensión, se despreciará la contribución de la mampostería, V_{mR} . El factor f se determinará según la ecuación 18:

$$f = \begin{cases} 1.5 \text{ si } \frac{H}{L} \leq 0.2 \\ 1.0 \text{ si } \frac{H}{L} \geq 1.0 \end{cases} \quad (18)$$

para los casos intermedios de H/L , se interpolará linealmente.

La NTC-Mampostería [23] incluyen disposiciones precisas acerca de la distribución de castillos y dalas, de sus propiedades geométricas y de sus condiciones de refuerzo.

- Los castillos deberán cumplir con las especificaciones siguientes:

1) Existirán castillos por lo menos en los extremos de los muros e intersecciones con otros muros y en puntos intermedios del muro a una separación no mayor que $1.5 H$ ni 4 m (**Figura 12**).

2) Los castillos tendrán como dimensión mínima 120 mm en la dirección perpendicular al plano del muro (b_c) y de 150 mm en la dimensión paralela al muro (h_c). Si el castillo es compartido por dos muros ortogonales, la dimensión de 150 mm sólo será necesaria en una dirección. En el caso de castillos externos, estas dimensiones no serán menores que t .

3) Los pretilos o parapetos deberán tener castillos con una separación no mayor que 4 m .

- Las dalas deberán cumplir con las especificaciones siguientes:

1) Existirá una dala en todo extremo horizontal del muro, en puntos intermedios a una separación no mayor que 3 m y en el extremo superior de pretilos o parapetos cuya altura sea superior a 500 mm (**Figura 12**).

2) Las dimensiones mínimas de la dala serán de 120 mm de ancho (b_c) y 150 mm de peralte (h_c) a menos que el muro esté ligado a una losa de concreto reforzado con un peralte mínimo de 100 mm , en cuyo caso la dala podrá tener el mismo peralte de la losa. En caso de dalas externas, b_c no será menor que t .

3) Se aceptará sustituir a la dala de la parte inferior de una abertura o extremo superior de un pretil por los elementos de refuerzo indicados en **Figura 14**.

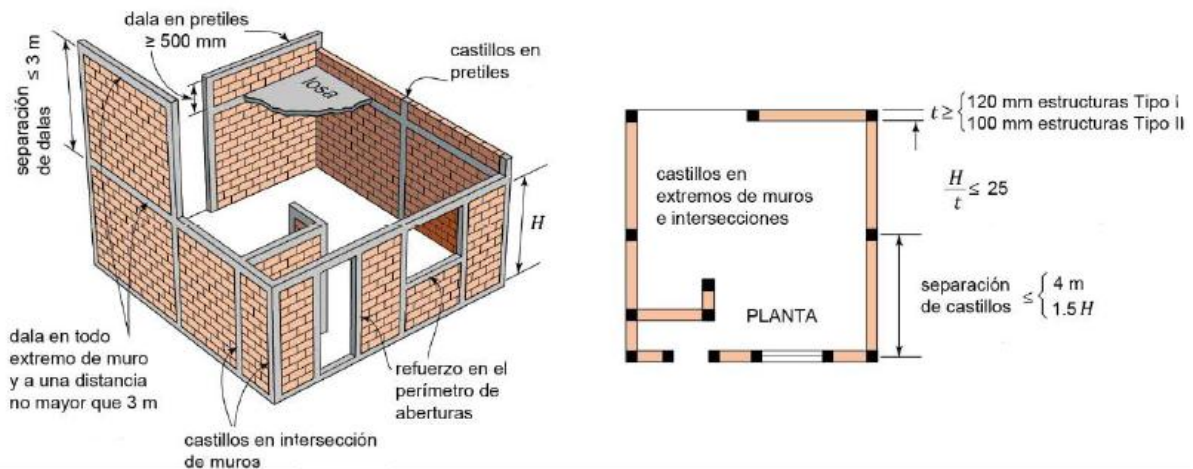


Figura 12. Requisitos para mampostería confinada [23].

- El concreto y mortero empleado en la construcción de castillos y dalas debe satisfacer las siguientes especificaciones:

1) El concreto de castillos y dalas en ambientes no agresivos tendrá un f'_c , no menor que 20 MPa (200 kg/cm²).

2) En el caso de castillos internos podrá usarse mortero Tipo I (resistencia a compresión mayor a 12.5 MPa) siempre que se rellene el castillo, hilada por hilada.

- Además, el refuerzo longitudinal y transversal de castillos y dalas se debe detallar de acuerdo con las siguientes especificaciones:

1) El refuerzo longitudinal de castillos y dalas deberá dimensionarse para resistir las componentes vertical y horizontal del puntal de compresión, respectivamente, que se desarrolla en la mampostería para resistir las cargas laterales y verticales (**Figura 13**).

2) En cualquier caso, el refuerzo longitudinal estará formado por lo menos de cuatro barras, cuya área total sea al menos igual a la obtenida con la ecuación 19:

$$A_s = 0.2 \frac{f'_c}{f_y} b_c h_c \quad (19)$$

3) Los castillos y dalas estarán reforzados transversalmente por estribos cerrados y con un área, A_{sc} , al menos igual a la calculada en la ecuación 20:

$$A_{sc} = \frac{10\,000s}{f_y h_c} \quad \left(A_{sc} = \frac{1\,000s}{f_y h_c} \right) \quad (20)$$

4) La separación de los estribos, s , no excederá de $1.5t$ ni de 200 mm.

5) La separación del refuerzo transversal, s , no será mayor que $h_c/2$ dentro de una longitud h_0 en cada extremo de los castillos. La longitud h_0 se tomará como la mayor de $H/6$ y 400 mm.

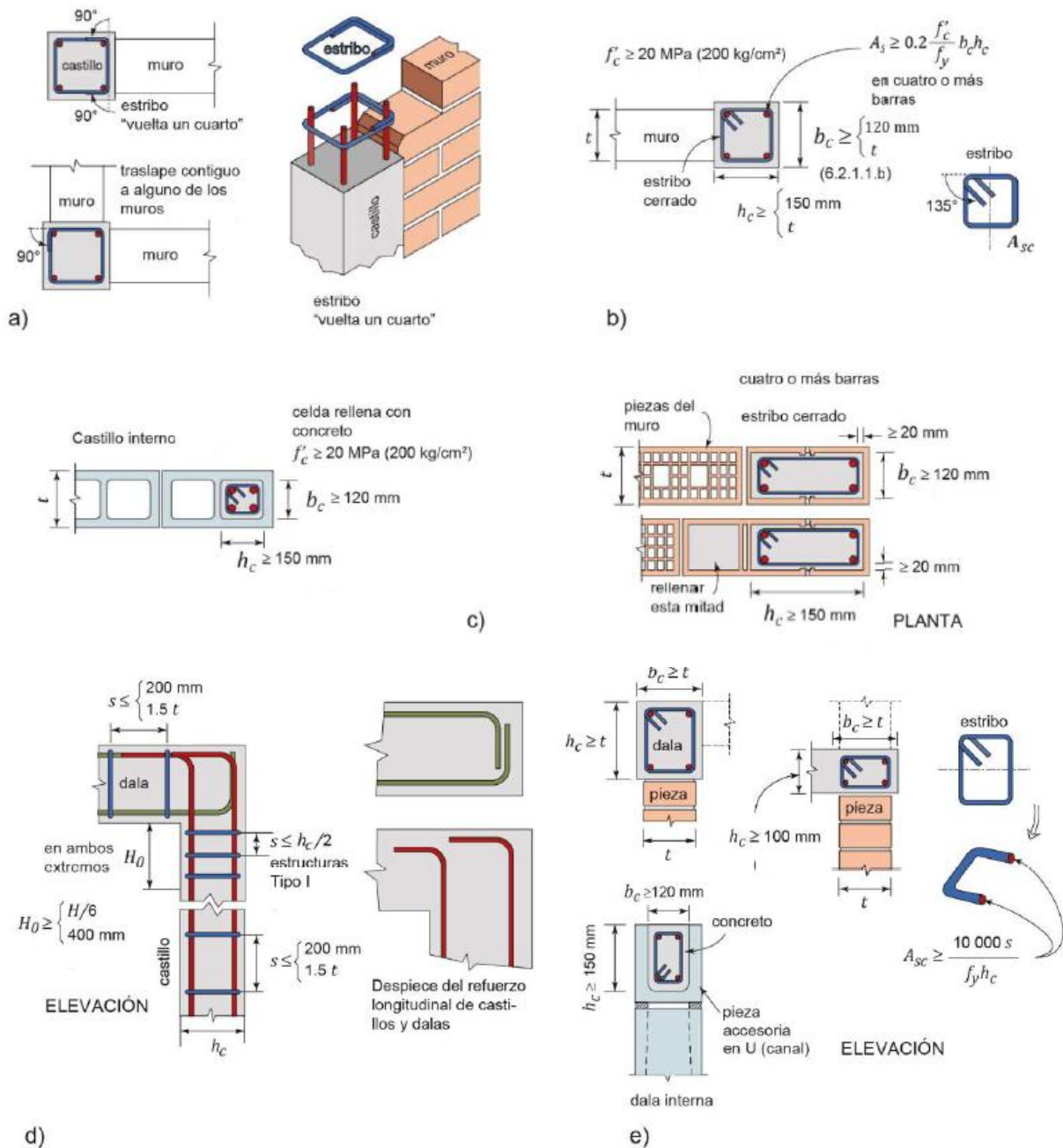
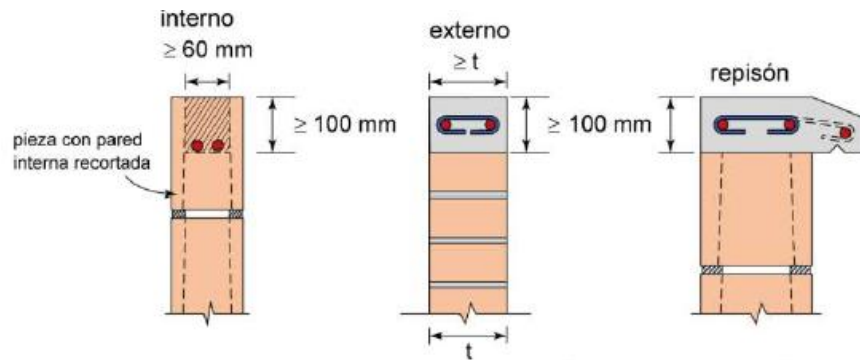


Figura 13. Detallado de castillos y dalas [23].

6) Se aceptará sustituir a la dala en la parte inferior de una abertura o el extremo superior de un pretil, por un elemento de concreto reforzado de dimensiones mínimas 60 mm de ancho y 100 mm de peralte, con acero de refuerzo horizontal anclado en los castillos o celdas reforzadas que confinan a la abertura o pretil. El refuerzo consistirá en barras capaces de alcanzar en conjunto una tensión a la fluencia de 29 kN (2950 kg). En caso de que el

elemento de concreto sea externo, su ancho no será menor que el espesor del muro, (**Figura 14**).



a) borde con refuerzo horizontal, $\Sigma A_s f_y \geq 29$ kN (2,950 kg)

Figura 14. Refuerzo en borde inferior de ventanas y extremo superior de pretilas [23].

2.3 Refuerzo horizontal

Los sistemas estructurales a base de muros de mampostería confían su buen desempeño sísmico en la capacidad de resistir fuerzas laterales, debido a la considerable sección transversal de muros dispuestos en ambas direcciones principales. A diferencia de otros sistemas, estas estructuras no pueden depender significativamente de deformaciones inelásticas para absorber la energía generada durante un evento sísmico. Como consecuencia, el coeficiente de comportamiento sísmico (Q), que reduce las fuerzas elásticas de diseño, presenta valores notablemente bajos ($Q = 1.5$ a 2), lo cual es indicativo de la restringida ductilidad que ofrece la mampostería ante cargas cíclicas [25].

Debido a lo anterior, los requisitos de ductilidad aplicables a este tipo de estructuras no son excesivamente rigurosos. No obstante, es necesario incorporar un refuerzo adecuado que mitigue el riesgo de fallas frágiles, garantizando un comportamiento estructural más controlado ante sollicitaciones sísmicas [25].

Una de las estrategias de mejora estructural más utilizadas para incrementar la resistencia cortante de los muros de mampostería consiste en la incorporación de refuerzo horizontal en las juntas de morteros. Este refuerzo, típicamente constituido por varillas de acero de diámetro reducido (3.9 mm, 4.7 mm, 6.3 mm) y alto esfuerzo de fluencia (comúnmente 600 MPa), se distribuye de manera uniforme en el muro con un espaciado constante de hiladas. Su implementación requiere del anclaje en los castillos, evitándose los traslapes [1].

Esta práctica exige un control más riguroso en la calidad constructiva de los muros y una mayor precisión en el detalle de su refuerzo. Las normativas vigentes incorporan ya procedimientos para estimar la contribución del refuerzo a la capacidad resistente, así como requisitos mínimos de refuerzo horizontal [25].

La eficacia de esta solución ha sido validada tanto en ensayos de laboratorio como en aplicaciones prácticas, observándose un desempeño notablemente superior en comparación con muros no reforzados. Entre sus beneficios se encuentra una mejora significativamente en el patrón de agrietamiento, resultando en grietas más finas y mejor distribuida, lo que se traduce en una mayor capacidad de deformación y disipación de energía. Este comportamiento es particularmente crucial para el desempeño estructural en regiones de alta sismicidad [1].

Cabe destacar que, si bien el refuerzo horizontal no modifica significativamente la rigidez inicial ni la carga de agrietamiento del muro (ya que su mecanismo de acción se activa predominantemente después de la formación de la primera grieta diagonal), su papel posterior es fundamental. Este sistema no sólo distribuye el daño, sino que también mitiga la degradación de la resistencia, incrementando de manera crucial la ductilidad y la capacidad de deformación inelástica del conjunto. Estas conclusiones, ampliamente aceptadas en la ingeniería estructural, se sustentan en una base sólida de estudios experimentales desarrollados, en gran medida, en México [26-29].

2.3.1 Especificaciones de las NTC-Mampostería 2023 para refuerzo horizontal

En diferentes códigos de diseño, existen ecuaciones que nos permiten estimar la contribución del refuerzo horizontal a la resistencia a carga lateral de un muro de mampostería. De acuerdo con la NTC-Mampostería [23], la resistencia a cargas laterales proporcionada por el refuerzo (V_{SR}) se estima como se indica en las ecuaciones 21, 22 y 23:

$$V_{SR} = F_R \eta (p_h f_{yh})_e A_T \quad (21)$$

$$p_h = A_{sh} / (s_h \times t) \quad (22)$$

$$(p_h f_{yh})_e = p_h f_{yh} \leq 0.1 f'_m f_{an} \quad (23)$$

donde F_R es el factor de reducción de resistencia a fuerza cortante igual a 0.7, $(p_h f_{yh})_e$ es la cuantía resistente efectiva, p_h es la cuantía de acero de refuerzo horizontal en el muro, A_{sh} es el área del acero de refuerzo horizontal colocada, s_h es la separación del acero de refuerzo horizontal en el muro, f_{yh} es el esfuerzo de fluencia especificado del acero de refuerzo horizontal, f_{an} es el factor del cociente entre área neta y el área bruta de las piezas y el parámetro η es el factor de eficiencia del refuerzo horizontal y se determinará con a) o b) dependiendo si la carga P es de compresión o tensión, respectivamente, como sigue:

a) Si el muro está sujeto a una carga axial P de compresión, se aplican las ecuaciones 24, 25, 26, y 27:

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R(p_h f_{yh})_e A_T} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s \quad (24)$$

$$k_0 = \begin{cases} 1.3 & \text{si } H/L \leq 1.0 \\ 1.0 & \text{si } H/L \geq 1.5 \end{cases} \quad (25)$$

$$k_1 = 1 - \alpha (p_h f_{yh})_e \quad (26)$$

$$\eta_s = \begin{cases} 0.75 & \text{si } f'_m \geq 9 \text{ MPa} \\ 0.55 & \text{si } f'_m \leq 6 \text{ MPa} \end{cases} \quad (27)$$

Para casos intermedios de H/L y f'_m , se interpolará linealmente para obtener los valores de k_0 y η_s , respectivamente; $\alpha = 0.45 \text{ MPa}^{-1}$

b) Si el muro está sujeto a una carga axial P de tensión, se utiliza ecuación 28:

$$\eta = k_1 \eta_s \quad (28)$$

Los valores de k_1 y η_s se calcularán de acuerdo con las ecuaciones 26 y 27, respectivamente.

A continuación, se enlistan los requisitos y especificaciones para el refuerzo horizontal:

1. El esfuerzo especificado de fluencia para diseño (f_{yh}) no deberá ser mayor que 600 MPa.
2. La separación máxima del refuerzo horizontal (s_h) no excederá de seis hiladas ni de 450 mm.
3. La cuantía mínima de refuerzo horizontal requerida será igual a (ecuación 29):

$$p_h f_{yh} = 0.3 \text{ MPa (3 kg/cm}^2\text{)} \quad (29)$$

4. El valor máximo de la cuantía de refuerzo horizontal será igual a (ecuación 30):

$$p_h f_{yh} \leq \min \left(0.15 f'_m f_{an}, \frac{0.05 h_j f_{yh}}{s_h} \right) \quad (30)$$

Dónde h_j es el espesor de la junta horizontal y f_{an} es el factor del cociente entre área neta y el área bruta de las piezas. Dicha cuantía no debe ser menor que $0.3 \text{ MPa (3 kg/cm}^2\text{)}$.

5. Las disposiciones para colocación y protección del refuerzo de la NTC-Mampostería [23] se resumen en la **Figura 15**.
6. El diámetro del refuerzo horizontal no será menor que 3.5 mm ni mayor que tres cuartas partes del espesor de la junta (**Figura 15**).
7. La distancia libre mínima entre una barra de refuerzo horizontal y el exterior del muro será la menor de 10 mm o una vez el diámetro de la barra (**Figura 15**).
8. El refuerzo horizontal colocado en juntas de mortero podrá estar formado por uno o más barras y deberá ser continuo a lo largo del muro, entre 2 castillos si se trata de mampostería confinada, o entre 2 celdas rellenas y reforzadas con barras verticales en muros reforzados interiormente.
9. El refuerzo horizontal deberá anclarse en los castillos, ya sean externos o internos, o en las celdas rellenas reforzadas (**Figura 16**), mediante dobleces a 90° colocados dentro de los castillos o celdas. El doblez del gancho se colocará verticalmente dentro del castillo o celdas rellenas lo más alejado posible de la cara del castillo o de la pared de la celda rellena en contacto con la mampostería, sin afectar el recubrimiento del lado opuesto.
10. Se podrán anclar dos o más barras o alambres en el mismo castillo o celda que refuercen muros colineales o transversales.
11. No se admitirá el traslape de alambres o barras de refuerzo horizontal en ningún tramo.

12. Para fines de revisar la longitud de desarrollo, la sección crítica será la cara del castillo o la pared de la celda rellena en contacto con la mampostería (**Figura 16**).
13. En muros de piezas huecas, el refuerzo horizontal deberá colocarse fuera de las zonas macizas de las piezas y, simultáneamente, evitar la interferencia con el paso de instalaciones. En muros de piezas macizas o multi perforadas el refuerzo podrá colocarse en cualquier ubicación a lo ancho de la pieza.

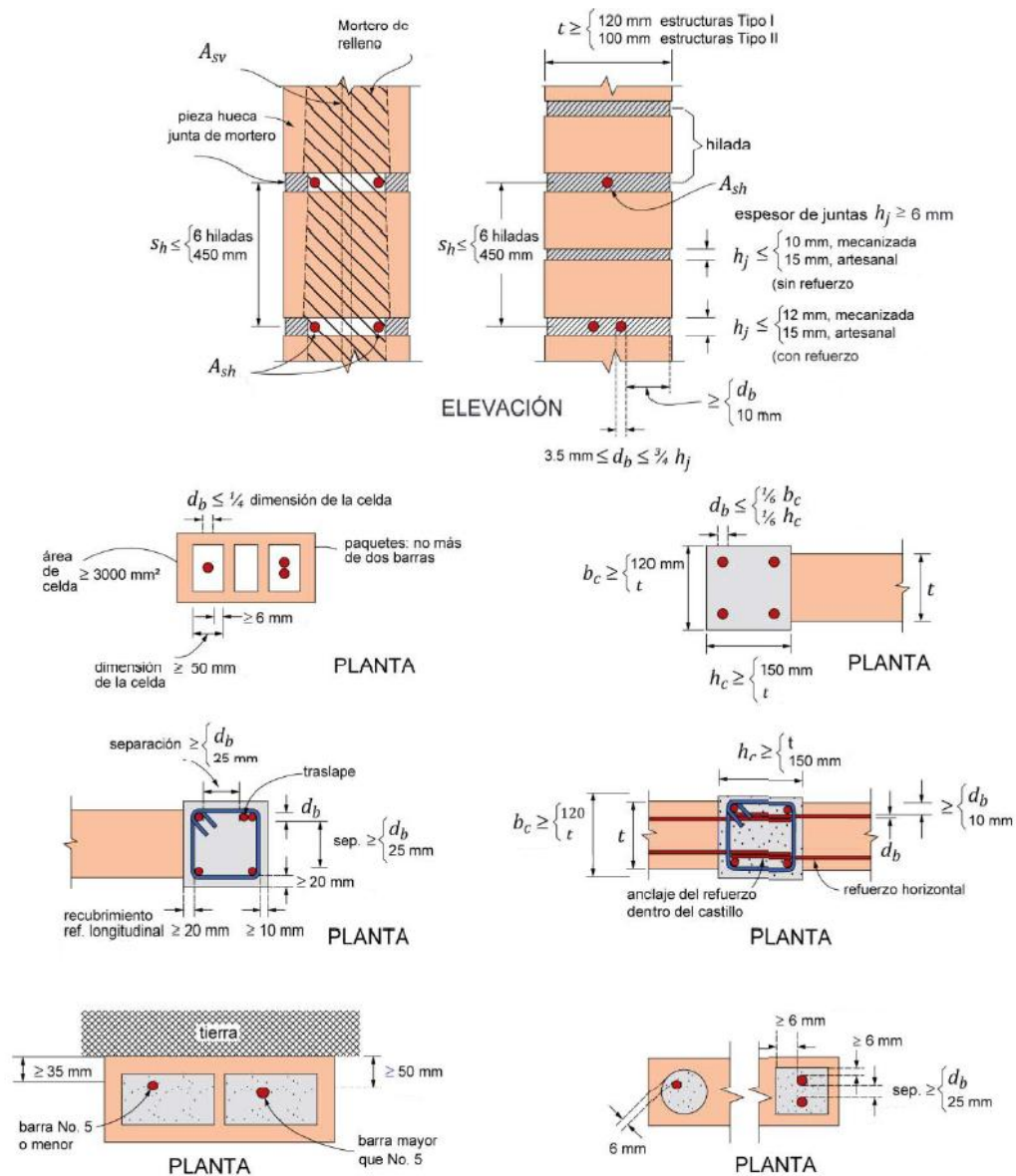


Figura 15. Requisitos para colocación y protección del refuerzo de la NTC-Mampostería 2023 [23].

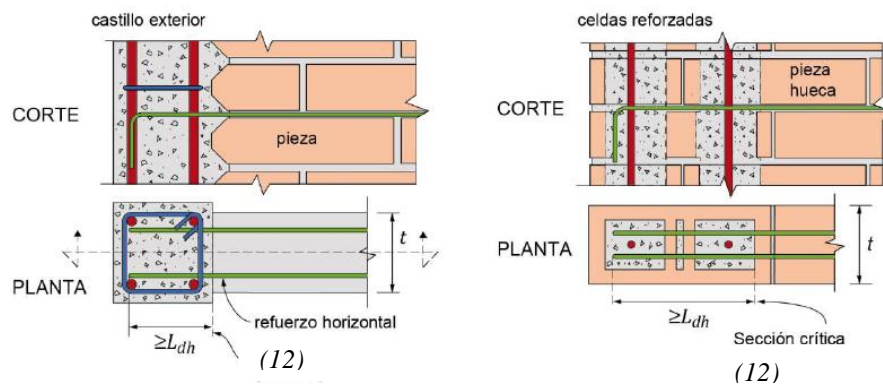


Figura 16. Anclaje de refuerzo horizontal [23].

2.4 Refuerzo con fibra de vidrio (GFRP)

Los materiales compuestos de base polimérica constituyen sistemas multifásicos que se fabrican mediante la incorporación de refuerzo y fibras dentro de una matriz polimérica. El propósito de esta combinación es generar un producto final cuyas propiedades superen, en conjunto, a las de sus componentes por separado. Dicha matriz puede corresponder a la familia de los termoplásticos (como el polipropileno o el pvc) o de los termoestables, caso de las resinas epoxi o de poliéster. Las fibras (de vidrio, aramid o carbono) tienen la función primordial de conferir refuerzo mecánico, mejorando la rigidez y la resistencia al actuar como el elemento que soporta la carga. La matriz, por su parte, se encarga de proteger dichas fibras y de mantener la cohesión estructural del conjunto, lo que define a los denominados compuestos poliméricos reforzados con fibra (FRP, por sus siglas en inglés). Históricamente, desde la década de 1960, estos compuestos de alto rendimiento han sido ampliamente adoptados en sectores como el aeroespacial, automotriz y naval, gracias a ventajas como su excepcional relación resistencia-peso, baja densidad, resistencia a la fatiga y bajo coeficiente de expansión térmica. Más recientemente, en el ámbito de la ingeniería civil se ha reconocido el valor de los FRP como una solución innovadora para abordar el problema del deterioro de las infraestructuras. El creciente uso de estos materiales en la construcción durante los últimos años se atribuye directamente a sus propiedades mecánicas superiores que la de los materiales convencionales. Asimismo, su abaratamiento progresivo los posiciona como una alternativa viable para reemplazar al acero de refuerzo tradicional en estructuras de hormigón, estando disponibles comercialmente en formatos como varillas, mallas, laminas, etc. [3].

La elevada resistencia y rigidez que poseen los compuestos FRP son atribuibles fundamentalmente a las fibras de refuerzo. Dado que en aplicaciones estructurales estas fibras suelen ser continuas y se orientan en direcciones predeterminadas, el material resultante exhibe un comportamiento ortotrópico, manifestando sus propiedades mecánicas más favorables en la dirección longitudinal de las fibras. La selección del tipo de fibra es un aspecto crítico del diseño, existiendo una variedad de opciones, cada una con sus ventajas y limitaciones particulares. En el ámbito de la ingeniería civil, las fibras de vidrio, de carbono (grafito) y aramid (Kevlar) son las más empleadas, siendo las 2 primeras las de uso más extendido. La elección entre ellas para un proyecto específico está condicionada por múltiples factores, entre los que se encuentran los requisitos de resistencia y rigidez, las consideraciones de durabilidad a largo plazo, las limitaciones presupuestarias y la disponibilidad del material en el mercado [3].

- Fibra de vidrio: su producción se basa en el proceso de fusión directa, mediante el cual se estira una masa fundida de vidrio para obtener filamentos continuos con diámetros entre 3 y 25 micras. Su principal ventaja reside en su bajo costo, lo que las convierte en la opción más común. Existen distintas formulaciones, siendo la más habitual el vidrio tipo E. Otras variedades incluyen el vidrio S (mejor rendimiento mecánico y resistencia a la corrosión), el vidrio R (resistencia superior a la tracción, fatiga y corrosión) y el vidrio AR (especialmente formulado para resistir los álcalis presentes en el hormigón). Se caracterizan por una alta resistencia a la tensión y un módulo elástico moderado, además de ser excelentes aislantes térmicos y eléctricos. Sin embargo, su principal desventaja es una significativa susceptibilidad a la humedad, especialmente en ambientes alcalinos o con sales, lo que exige una protección muy eficaz por parte de la matriz polimérica. Asimismo, son propensas a la ruptura por fluencia y pueden perder resistencia bajo carga sostenida en el tiempo.
- Fibra de carbono: estas fibras se fabrican mediante la pirólisis controlada de precursores orgánicos, un complejo tratamiento térmico que produce filamentos de entre 5 y 8 micras de diámetro. Este proceso permite obtener diversas clases

de fibras con un rango muy amplio de propiedades. Aunque su costo es superior al de la fibra de vidrio, su uso se ha generalizado debido a la combinación de propiedades excepcionales: un módulo de elasticidad y una resistencia muy elevados, una densidad muy baja (que resulta estructuras muy ligeras) y una excelente inercia química y ambiental, incluida la impermeabilidad a la humedad. Esta combinación de propiedades las hace ideales para aplicaciones donde el peso y la rigidez (control de deflexiones) son críticos.

- Fibra de aramid: producidos a partir de poliamidas aromáticas mediante extrusión e hilado, estas fibras deben sus propiedades a una estructura molecular rígida y orientada, reforzada por enlaces de hidrógeno. Sus ventajas más notables son una alta resistencia específica, una gran tenacidad y capacidad para absorber energía de impacto, y una baja densidad. No obstante, presentan desventajas claves, como una baja resistencia a la compresión y al corte, derivada de su naturaleza anisotrópica. Aunque muestran buena resistencia a ácidos y álcalis, son sensibles a la degradación por luz ultravioleta y humedad, requiriendo también una adecuada protección de la matriz [3].

En la **Tabla 5** se muestran las propiedades típicas de los diferentes tipos de fibras, incluyendo su densidad, resistencia y módulo elástico [3]. Para propósitos de comparación, también se incluyen las propiedades del acero estructural.

Tabla 5. Rango de propiedades de las fibras para compuestos de FRP [3].

Tipo de fibra	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la tensión (GPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)
Vidrio	2.46 - 2.58	2.4 – 3.5	72 – 87
Carbón	1.74 - 2.20	2.1 – 5.5	200 – 500
Aramid	1.39 – 1.47	3.1 – 3.6	58 – 130
Acero	7.85	4.8 – 7.0	200

En la fabricación de materiales compuestos se utilizan comúnmente tres tipos específicos de resinas: resina de poliéster, resina epóxica y resina de viniléster.

- 1) Resina de poliéster: estas resinas son las más comunes en la fabricación de componentes estructurales, predominando debido a su bajo costo relativo y a su

facilidad de procesamiento, particularmente porque se pueden curar de manera efectiva a temperatura ambiente. Existe una amplia gama de poliésteres formulados para ofrecer distintos niveles de desempeño, variando en su estabilidad térmica, resistencia química, propensión a la absorción de humedad y el grado de contracción que experimenta durante el proceso de polimerización.

- 2) Resina epóxica: frecuentemente empleadas en técnicas de impregnación “in situ” para el pegado de láminas y placas, la resina epóxica se valora por su capacidad de curar a temperatura ambiente y, sobre todo, por sus excepcionales propiedades adhesivas con sustratos como el hormigón. Entre sus ventajas técnicas se incluyen una alta resistencia mecánica, una elevada estabilidad dimensional, un buen comportamiento ante temperaturas moderadamente altas, una notable resistencia a una amplia gama de agentes químicos (aunque son vulnerables a los ácidos) y una alta tenacidad. Su principal desventaja es el costo significativamente mayor en comparación con las otras resinas.
- 3) Resina viniléster: estas resinas representan un equilibrio técnico-económico entre el poliéster y el epóxico. Combinan propiedades mecánicas y de durabilidad similares a las de las epóxicas con unos procesos de fabricación y curado tan sencillo como los de los poliésteres. Su característica más destacada es una excelente resistencia a medios tanto ácidos como alcalinos agresivos. Esta propiedad las hace idóneas para la fabricación de barras de refuerzo para hormigón, al poder soportar el ambiente altamente alcalino de su interior. Adicionalmente, presentan una menor contracción durante el curado y una reducida absorción de humedad en comparación con los poliésteres. Su costo es intermedio, superior al del poliéster pero inferior al del epóxico [3].

2.4.1 Especificaciones de la CNR DT 200 R1 2014 para materiales compuesto (FRP)

En el Capítulo 5 de la guía CNR-DT 200 R1/2014 [30] se presenta un conjunto de ecuaciones de diseño específicas para estimar la contribución del refuerzo a base de materiales compuestos en la resistencia a cortante de muros de mampostería. Para tal efecto, se consideran el tipo y las propiedades del material compuesto a utilizar en el

reforzamiento. Estas ecuaciones incluyen diversos aspectos críticos del diseño, los cuales se describen a continuación.

2.4.1.1 Resistencia de diseño al despegamiento del extremo de la lámina/banda

Los posibles modos de fallas de muros de mampostería reforzada con sistemas de FRP se pueden resumir de la siguiente manera:

- Agrietamiento excesivo debido a esfuerzos de tensión en el muro.
- Aplastamiento de la mampostería.
- Corte-deslizamiento de la mampostería.
- Ruptura del FRP.
- Despegamiento del FRP.

Los modos de falla de la estructura de mampostería reforzada con FRP generalmente involucran una combinación de los mecanismos antes mencionados.

En el refuerzo de muro de mampostería utilizando láminas adheridas externamente o materiales compuestos reforzados con tejidos, la unión entre el sustrato de mampostería y el compuesto juega un papel crucial. La falla por despegamiento es un mecanismo frágil y, por lo tanto, indeseable. De acuerdo con el principio de diseño por capacidad, este modo de falla no debería ocurrir antes del aplastamiento inelástico de la mampostería [30].

El despegamiento de láminas o compuesto de tejido del sustrato de mampostería puede ocurrir mediante dos modos de falla: 1) despegamiento en los extremos, que se inicia en los extremos del refuerzo, y 2) despegamiento por fisura intermedia, que se origina en las juntas de mortero o grietas transversales en la mampostería. Tanto en los extremos del refuerzo como en las áreas que abarcan juntas de mortero o grietas, la interfaz FRP-mampostería está sometida a altos esfuerzos cortantes y axiales [30].

El despegamiento en los extremos puede ir acompañado de la remoción de una delgada capa de mampostería (falla por desprendimiento), particularmente cuando los altos esfuerzos cortantes en los extremos se combinan con fuerzas axiales de tensión significativas (**Figura 17**).

La resistencia de un sistema de FRP a la propagación de grietas en la mampostería se maximiza cuando la orientación de la fibra es perpendicular a las grietas.

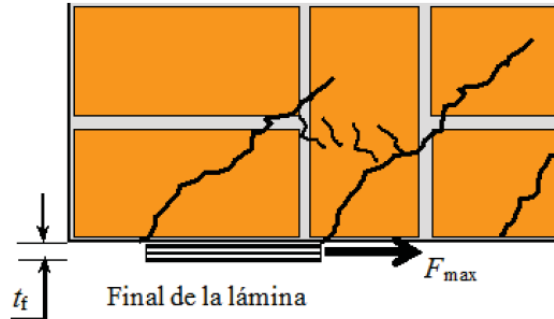


Figura 17. Falla debido al arrancamiento de la mampostería [30].

Con referencia a una prueba experimental típica de pegado, como el representado en la **Figura 18**, el valor último de la fuerza que el refuerzo FRP puede soportar antes de despegarse del soporte (despegamiento en el extremo) depende de la longitud del área de pegado (l_b), hasta alcanzar un valor máximo correspondiente a una longitud óptima de pegado (l_{ed}) bien definida; un mayor incremento del área de pegado no incrementa la fuerza que es posible transferir [30].

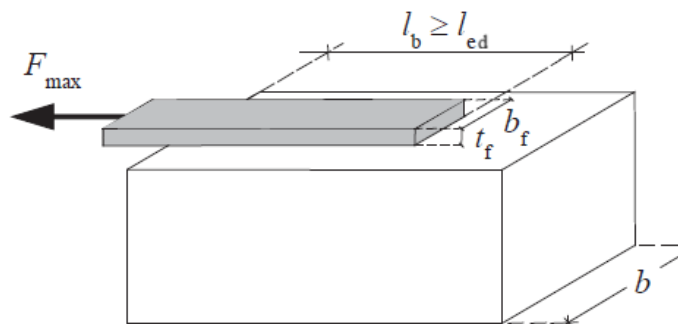


Figura 18. Máxima fuerza transferida entre FRP y el concreto [30].

La longitud óptima de pegado (l_{ed}) corresponde a la longitud mínima de adherencia capaz de soportar la máxima fuerza de anclaje. La longitud óptima de pegado se determina con la ecuación 31.

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 150\text{mm} \right\} \quad (31)$$

Donde E_f y t_f son el módulo elástico normal del refuerzo FRP y su espesor, respectivamente. Γ_{Fd} es el valor de diseño de la energía específica de fractura, γ_{Rd} es igual a 1.2 y es un factor parcial para corte. f_{bd} es la resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería, y es calculada como sigue (ecuación 32):

$$f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u} \quad (32)$$

Donde s_u es el deslizamiento de la interfaz al despejarse por completo. Si los datos experimentales no están disponibles, s_u es igual a 0.4 mm para piedra pómez (porosas) y bloques perforados, y 0.3 mm para mampostería calcarenitas y piedras Lecce.

El valor de diseño de la energía específica de fractura (Γ_{Fd}) está calculado como sigue (ecuación 33):

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}} \quad (33)$$

Los símbolos en la ecuación 3 asumen los siguientes significados:

- k_b es el factor correctivo geométrico.
- k_G es un factor correctivo, expresado en milímetros y dependiente del tipo de mampostería (para sistemas impregnados *in situ*):
 - para mampostería de bloques perforados: $k_G = 0.031 \text{ mm}$
 - para mampostería de pómez: $k_G = 0.048 \text{ mm}$
 - para mampostería de piedras calcarenitas y Lecce: $k_G = 0.012 \text{ mm}$
- FC es un factor de confianza.
- f_{bm} y f_{btm} son las resistencias de compresión y tracción de bloques de mampostería, respectivamente. En ausencia de evidencia experimental, la resistencia a tensión promedio puede ser calculada como $0.10f_{bm}$.

Si no hay datos experimentales disponibles, k_b puede ser calculada como (ecuación 34):

$$k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \quad (34)$$

donde b y b_f son el ancho del elemento reforzado y FRP, respectivamente. El valor de b puede ser calculado como una suma de la cantidad b_f y el ancho del área de distribución de la fuerza de pegado (b_d). En el caso de la mampostería con piedras de forma irregular, b_d puede ser considerado igual al diámetro promedio de las piedras (**Figura 19**).

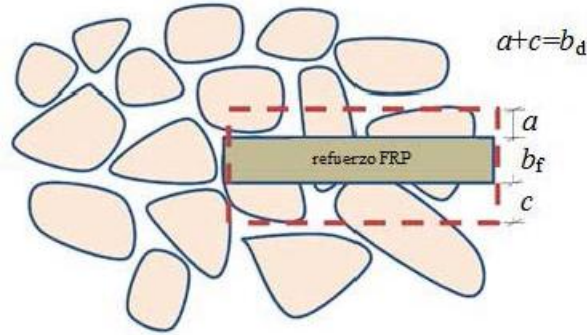


Figura 19. La distribución de la resistencia de pegado para piedras de forma irregular [30].

En el caso de mampostería con piedras de forma regular, b_d es igual a la dimensión del bloque de soporte en la dirección perpendicular del eje principal del refuerzo FRP (**Figura 20**).

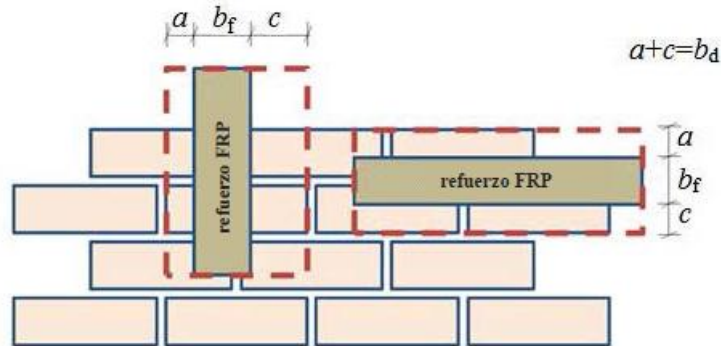


Figura 20. Distribución de resistencia de pegado para piedras de forma regular [30].

Cuando el despegamiento involucre las primeras capas de mampostería y la longitud de pegado es más larga o igual a la longitud de pegado óptima (l_{ed}), la resistencia de diseño por despegamiento del refuerzo FRP (modo 1) será expresada como sigue (ecuación 35):

$$f_{fd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (35)$$

donde $\gamma_{f,d}$ es el factor parcial como se ve a continuación:

Para los estados límites últimos (ELU), el valor asignado al factor parcial $\gamma_m = \gamma_f$ a 1.10. Sólo cuando ocurre el despegamiento en el caso de estado límite último, los valores de $\gamma_m = \gamma_{f,d}$ pueden ser elegidos por el diseñador en un rango entre 1.20 a 1.50, dependiendo de la más alta o más baja probabilidad de falla debido al despegamiento. En este caso, las pruebas desarrolladas por el fabricante o el proveedor, sobre la aplicación específica, pueden ayudar a optimizar el proceso de diseño. Para el estado límite de servicio (ELS), los valores de $\gamma_m = \gamma_f$ pueden ser igual a 1 (**Tabla 6**).

Tabla 6. Factores parciales γ_m [30].

Factores parciales γ_m		
	ELU	ELS
$\gamma_m = \gamma_f$	1.1	1
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.2	-
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.5	-

2.4.1.2 Resistencia de diseño por despegamiento intermedio

En ausencia de indicadores más seguros, el despegamiento intermedio será desarrollado por la resistencia limitada de despegamiento de FRP al valor de diseño (ecuación 36):

$$f_{fdd,2} = \alpha \cdot f_{fdd} \quad (1.0 \leq \alpha \leq 2.0) \quad (36)$$

En particular, si la distancia desde el extremo libre es menor que $3 \cdot l_{ed}$, entonces $\alpha = 1.5$.

La deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado correspondiente al despegamiento es expresado como (ecuación 37):

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} \quad (37)$$

donde E_f es el módulo de elasticidad normal del FRP.

2.4.1.3 Resistencia a cortante en el plano

La resistencia de corte de un muro con FRP (**Figura 21**) puede ser evaluado despreciando la contribución de la FRP bajo compresión, como en lo siguiente:

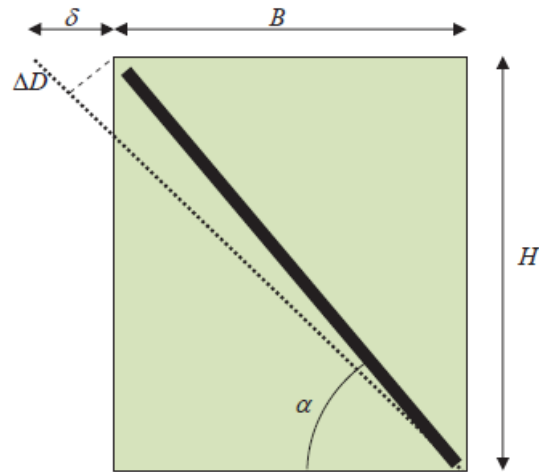


Figura 21. Muro reforzado con FRP inclinado por un ángulo α [30].

Refiriéndose a la **Figura 21**, el desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal es igual a (ecuación 38):

$$\delta_{Rd,1} = 0.005 \cdot H \quad (38)$$

Además, el máximo desplazamiento horizontal compatible con la deformación unitaria de diseño de FRP es igual a (ecuación 39):

$$\delta_{Rd,2} = \frac{\Delta D_{fdd}}{\cos \alpha} = \varepsilon_{fdd} \frac{H}{\sin \alpha \cos \alpha} = \frac{f_{fdd} \cdot H}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha} \quad (39)$$

Además (ecuación 40):

$$\frac{\delta_{Rd}}{H} = \frac{1}{H} \min\{\delta_{Rd,1}, \delta_{Rd,2}\} = \min\left\{0.005, \frac{f_{fdd}}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha}\right\} \quad (40)$$

y la contribución del FRP a la resistencia al corte, $V_{Rd,f}$ (ecuación 41):

$$V_{Rd,f} = \frac{\delta_{Rd}}{H} (\sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_f) \quad (41)$$

donde $\frac{\delta_{Rd}}{H} (\sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_f)$ es la componente horizontal que la FRP que corresponde a un desplazamiento igual a δ_{Rd} , y A_f es el área del refuerzo FRP (véase **ANEXOS**).

2.5 Análisis dinámico modal espectral elástico

El análisis modal espectral se basa en obtener la máxima respuesta que generará la acción sísmica de diseño. Aunque son bien conocidas las limitaciones de un análisis elástico lineal, sigue siendo el método aceptado para calcular los elementos mecánicos en los elementos resistentes y los desplazamientos de una estructura, dadas una serie de acciones, debidas, entre otras causas, al peso propio, al uso de la estructura y al movimiento del terreno debido a un sismo. Las razones son, esencialmente, que el análisis elástico lineal es sencillo de interpretar, ya sea un análisis estático o dinámico, si se compara con un análisis no lineal, y a que existe herramientas comerciales maduras para realizar dichos cálculos [1].

En el análisis dinámico de edificaciones, una premisa fundamental que simplifica significativamente el modelado estructural es la idealización de que las masas se concentran en los niveles de piso, los cuales se comportan como diafragmas rígidos en su plano. Bajo la acción de una excitación sísmica predominantemente horizontal, y asumiendo que la distribución de rigideces es tal que no se generan torsiones significativas, el movimiento de cada nivel puede representarse con suficiente precisión mediante un único grado de libertad. Por lo contrario, cuando la excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez es apreciable, es necesario considerar tres grados de libertad por planta para capturar adecuadamente la respuesta estructural: dos componentes de traslación en las direcciones horizontales ortogonales y un grado de libertad rotacional alrededor del eje vertical [25].

Desde una perspectiva analítica, la determinación precisa de los modos de vibración de una estructura exige la incorporación de todos los grados de libertad dinámicos significativos. Esto implica representar de manera completa todos los posibles desplazamientos de las masas que poseen una influencia relevante en la respuesta dinámica del sistema. En términos teóricos, es necesario asignar tres grados de libertad traslacionales a cada masa puntual considerada en el modelo, así como grados de libertad rotacionales asociados a cada inercia significativa. Si bien las herramientas computacionales modernas tienen la capacidad de resolver eficientemente el problema de valores propios resultante, el desafío ingenieril fundamental no radica en el cálculo numérico en sí, sino en la conceptualización de un modelo estructural que represente fielmente la distribución real de masas y rigideces.

Por lo tanto, el esfuerzo analítico adicional debe orientarse hacia la idealización mecánica de la estructura, garantizando que la asignación de masas y su grado de libertad asociados capturen adecuadamente la cinemática del sistema real [25].

Tanto la NTC-Mampostería [23] como el Manual de Obras Civiles de la CFE (MOC-CFE, 2015) [31], establecen que para determinar las fuerzas internas que actúan en los muros, las estructuras se pueden analizar mediante métodos dinámicos o estáticos. Algunos métodos de análisis sísmicos son: 1) análisis dinámico modal espectral, 2) método estático, 3) análisis dinámico paso a paso.

En esta investigación se optó utilizar el método de análisis dinámico modal espectral. El análisis modal espectral consiste en los siguientes pasos [25]:

- Elaborar el modelo estructural elástico (matrices de rigideces y masas).
- Determinar los períodos y modos de vibrar.
- Definir las componentes del terreno a considerar.
- Definir el espectro elástico de cada componente.
- Identificar las modificaciones por comportamiento inelástico, por sobrerresistencia y por amortiguamiento.
- Calcular la respuesta máxima en cada modo con base en el espectro de diseño para cada componente del movimiento del terreno.
- Combinar las respuestas modales para estimar la respuesta total ante cada componente del sismo.
- Combina la respuesta ante todas las componentes del sismo.

La **Figura 22** ilustra la secuencia de estos pasos.

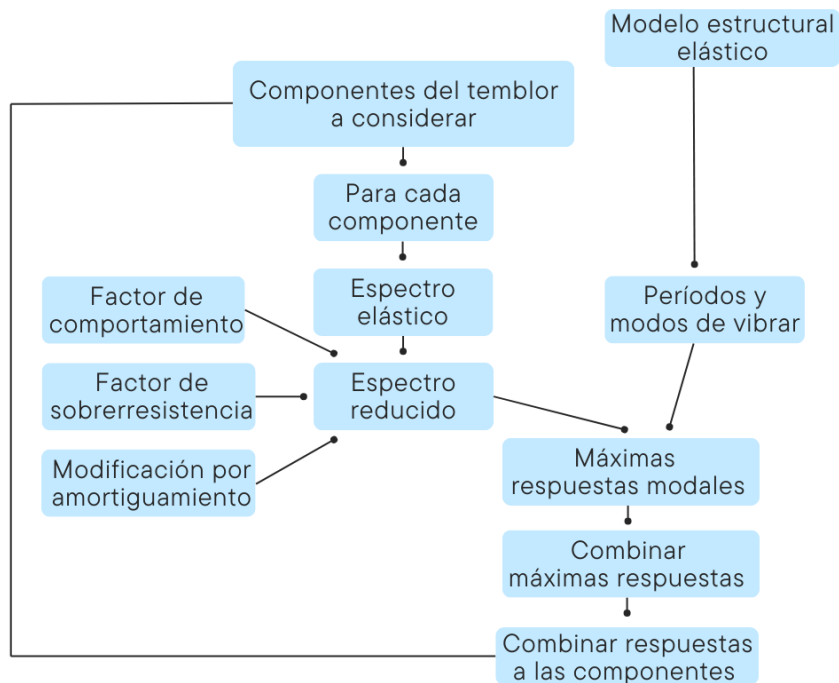


Figura 22. Pasos del análisis modal espectral [25].

2.6 Modelación por el método del elemento finito

La NTC-Mampostería [23] establece que una estructura podrá modelarse utilizando el método de la columna ancha o con elementos finitos. En esta investigación se adoptó por el método de elementos finitos.

En el ámbito del análisis estructural contemporáneo, el método de elementos finitos es el más versátil y potente, siendo aplicable con éxito tanto estructura de configuración simple como aquellas de geometría compleja. La esencia del método reside en la discretización de la estructura en subsecciones, denominadas elementos finitos, interconectados en puntos llamados nodos. Para cada uno de estos elementos, se define una función de forma que interpola el campo de desplazamientos en su interior en función de los valores que éste toma en sus nodos. Los desplazamientos y rotaciones nodales representan los grados de libertad del sistema. La formulación de la matriz de rigidez de cada elemento, que relaciona las fuerzas nodales con los desplazamientos nodales, se deriva aplicando principios energéticos, como el principio de los trabajos virtuales. Este desarrollo considera simultáneamente las funciones de forma y la ley constitutiva del material (la relación esfuerzo-deformación, por ejemplo la linealidad elástica definida por la ley de Hooke). La

matriz de rigidez resultante se expresa, por tanto, en el sistema de coordenadas asociado a los grados de libertad del elemento [25].

Los tipos de elementos finitos más comunes que pueden utilizarse para modelar muros son los elementos diafragma, que sólo toman fuerzas en su plano y que siempre son planos, y los elementos tipo cascarón, que pueden tomar fuerzas y momentos en el sentido transversal y adoptar la forma de superficies curvas en el espacio [1].

A continuación, se describen algunos criterios a consideración de acuerdo con la NTC-Mampostería [23], (véase **Figura 23**):

- Los muros de mampostería podrán modelarse con elementos finitos lineales (cuatro nudos) tipo membrana (con rigidez sólo en su plano), siempre que la formulación de dichos elementos pueda representar adecuadamente la flexión en el plano del muro, o con elementos lineales tipo cascarón (con rigidez en su plano y fuera del plano). Los elementos tendrán las propiedades mecánicas de la mampostería y un espesor igual al espesor del muro.
- Se utilizará un solo elemento por panel, siendo un panel el área de muro delimitada por castillos y dalas, siempre que la relación de aspecto del elemento no sea mayor que 2; en caso contrario se propondrá una malla de elementos que cumpla este requisito.
- Los elementos contiguos tanto en el plano del muro como fuera de él deberán ser continuos en los nodos.
- Los castillos se modelarán con elementos prismáticos tipo barra localizados en el centro de la sección transversal del castillo y las propiedades mecánicas del concreto de que están hechos. Los elementos-barra deberán ser continuos en los nudos de todos los elementos finitos contiguos.

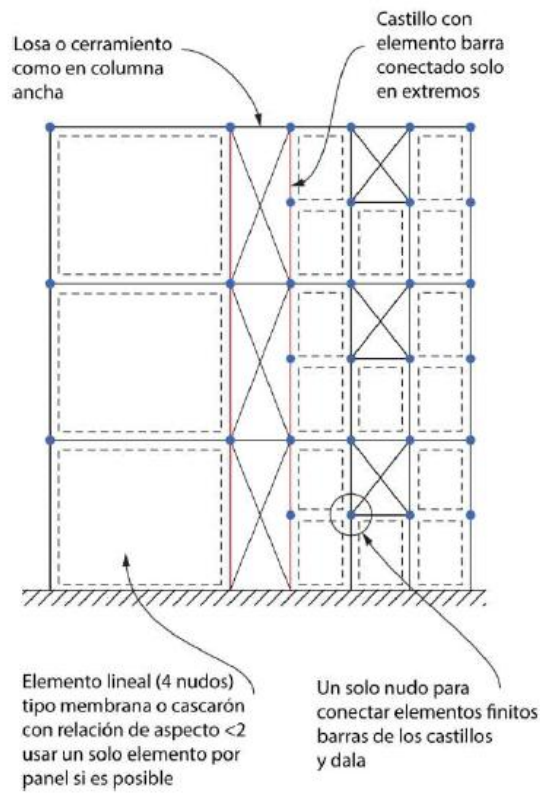


Figura 23. Modelo de muro con elementos finitos [23].

3 METODOLOGÍA

3.1 Material requerido

Para llevar a cabo esta investigación no se requirieron materiales físicos, dado que las actividades realizadas se centraron en el análisis de datos a través de una computadora. Se empleó una estación de trabajo equipada con software especializado en el análisis estructural, así como hojas de cálculo para el diseño de elementos estructurales. Se utilizó la información disponible en la literatura, ya sea en artículos científicos, códigos y guías de diseño, sobre el análisis y diseño de estructuras de mampostería, y especialmente sobre muros de mampostería reforzados con polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP). Esta información constituyó la base para los cálculos incluidos en este proyecto.

3.2 Infraestructura

3.2.1 Laboratorios y equipos

La Facultad de Ingeniería Culiacán cuenta con:

- Software de análisis estructural (ETABS).
- Computadoras con capacidad suficiente para ejecutar el software.
- Acceso a bases de datos de literatura científica y normativa relevante.

3.3 Procedimientos

Para lograr los objetivos planteados, se realizaron las siguientes actividades:

3.3.1 Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión exhaustiva de literatura académica y normativa internacional relacionada con el uso de materiales compuestos como refuerzo de estructuras de mampostería. Esta revisión incluyó normas de diversos países, tales como Chile [32], Colombia [33], Perú [34], Argentina [35], Costa Rica [36], República Dominicana [37], Venezuela [38], Japón [39] y Estados Unidos de América [40]. Se constató que, en estos documentos, las especificaciones son predominante sobre refuerzo interno, mientras que aquellas sobre el uso de GFRP aún son limitadas. No obstante, se identificaron contribuciones relevantes en esta temática en la guía CNR-DT 200 R1/2014 [30], la cual fue seleccionada como referencia principal en este proyecto.

3.3.2 Análisis de datos experimentales previos

Se analizaron los resultados experimentales de investigaciones previas, la cuales se llevaron a cabo recientemente en la Universidad Autónoma de Sinaloa como “Ensayes ante carga lateral de muros confinados de mampostería de block reforzados con fibra de vidrio: 50%” [41], y “Comportamiento de un muro de mampostería de block reforzado con GFRP, sujeto a carga lateral cíclica reversible en el plano” [42]. En dichas investigaciones se estudió el comportamiento estructural de muros de mampostería reforzados con distintas cantidades de GFRP ante cargas laterales. En este proyecto se analizaron los parámetros estructurales críticos, como la resistencia al corte y la capacidad de deformación, lo que permitió evaluar el potencial de este refuerzo para mejorar el desempeño estructural del sistema. Estos resultados experimentales fueron utilizados posteriormente para la calibración de ecuaciones de diseño. A continuación se presenta la descripción de los especímenes, el proceso de ensaye y los resultados obtenidos. La configuración de los especímenes se presenta en la **Figura 24**.

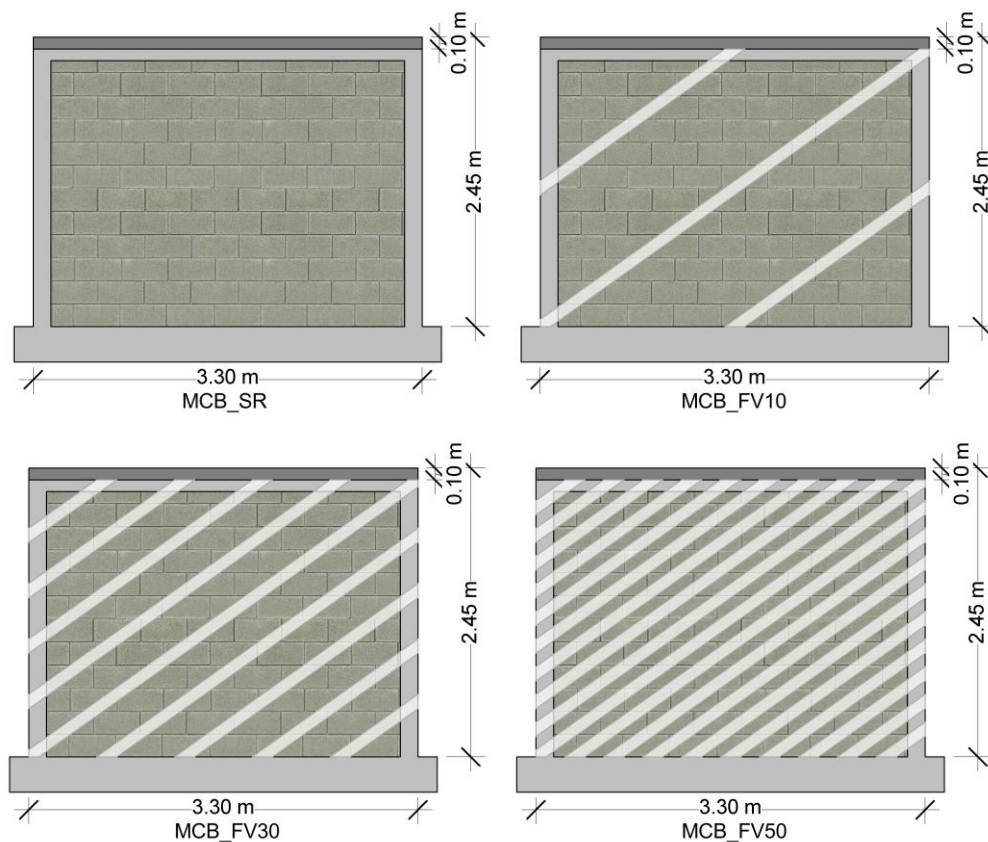


Figura 24. Descripción de especímenes.

Para el desarrollo de los estudios experimentales, se construyeron y ensayaron cuatro especímenes (muros confinados) con la misma configuración geométrica: 3.30 m de longitud y 2.45 m de altura (**Figura 24**). La diferencia entre estos especímenes fue la cantidad de refuerzo a base de fibra de vidrio (GFRP) utilizada. El refuerzo consistió en tiras inclinadas de GFRP de 100 mm de ancho y 1 mm de espesor, distribuidas uniformemente en el muro. El primer espécimen no incluyó refuerzo, al cual se le denominó como MCB-SR, mientras que los otros tres tuvieron 10%, 30% y 50% de la superficie aparente del muro cubierta por el material compuesto (MCB-FV10, MCB-FV30 y MCB-FV50).

Los especímenes fueron edificados empleando piezas de block hueco de concreto con dimensiones nominales de 120×200×400 mm, ensamblados mediante mortero estructural Tipo I. El sistema de confinamiento implementado en cada muro estuvo compuesto por dos elementos verticales (castillos) de sección transversal de 120×150 mm y un elemento horizontal superior (dala de cerramiento) de 120×200 mm. Los elementos confinantes fueron armados con cuatro barras longitudinales de acero corrugado No. 3 (3/8 pulg de diámetro), complementadas con estribos de alambroñ espaciados a 180 mm, instalándose el primer estribo a una distancia de 90 mm desde el borde. De manera monolítica con la dala, se construyó una losa de concreto de espesor igual a 100 mm y ancho de 500 mm. Esta losa fue reforzada longitudinalmente mediante barras No.3 colocadas en los bordes laterales y transversalmente con varillas del mismo diámetro a una separación uniforme de 200 mm (**Figura 25**) [41].

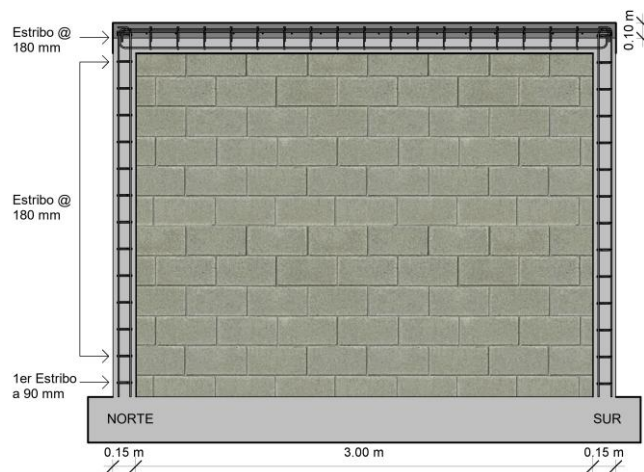


Figura 25. Condiciones del acero de refuerzo.

La construcción de los muros se llevó a cabo sobre vigas de cimentación elaboradas de concreto reforzado, con dimensiones de 3.60 m de longitud, 0.95 m de ancho y 0.30 m de espesor. Estas vigas se fijaron firmemente en la losa de reacción del Laboratorio mediante el uso de varillas de acero de 1 1/4 pulgadas de diámetro, espaciados cada 0.70 m. En la **Figura 26** se presenta una imagen del espécimen identificado como MCB-SR en su estado inicial, previo al inicio de su ensaye [41].



Figura 26. Muro confinado mediante dalas y castillos [41].

Las características mecánicas de los materiales (concreto, mortero y mampostería) fueron obtenidas mediante ensayos normalizados, siguiendo los protocolos establecidos por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) [43-51].

Los valores promedio obtenidos en dichas pruebas se detallan en la **Tabla 7**. Para el concreto, se evaluaron la resistencia a compresión (f'_c), el módulo de elasticidad (E_c) y su resistencia a tensión (f_t); en el caso del mortero, se obtuvo su resistencia a compresión (f'_j); mientras que para la mampostería se determinaron la resistencia de las piezas (f'_p), la resistencia a compresión de la mampostería (f'_m), así como su resistencia a tensión diagonal (v'_m).

Tabla 7. Propiedades mecánicas de los materiales (MPa).

ESPÉCIMEN	Concreto			Mortero	Mampostería		
	f'_c	E_c	f_t	f'_j	f'_p	f'_m	v'_m
MCB-SR	21.38	21,226	2.78	23.01	10.22	6.65	0.54
MCB-FV10	23.52	-	-	25.21	10.22	6.65	0.35
MCB-FV30	22.55	20,692	-	15.49	7.85	-	0.64
MCB-FV50	23.52	-	-	25.21	10.22	6.65	0.35

El sistema de carga utilizado en los ensayos se presenta en la **Figura 27**. En todos los casos se aplicó una carga vertical de 100 kN, con el propósito de simular las cargas gravitacionales sobre el muro. La aplicación de la carga vertical se realizó a través de un gato hidráulico de acción simple, apoyado sobre una viga de acero de alta rigidez, lo que aseguró una distribución uniforme de la carga sobre el espécimen. Para simular acción sísmica, se sometió a cada muro a una carga lateral cíclica reversible. Esta carga se aplicó mediante actuadores hidráulicos de doble acción que se conectaron mediante pasadores a la misma viga de acero que se usó para la carga vertical. Dicha viga se ancló a la losa de concreto del espécimen con tornillos de 15.88 mm (5/8") dispuestos a cada 250 mm, facilitando así una transmisión uniforme de la fuerza lateral [41].

La instrumentación de los especímenes se realizó mediante celdas de carga y transductores de desplazamiento, distribuidos para registrar las cargas aplicadas, así como los desplazamientos en puntos estratégicos (**Figura 27**). Las celdas de carga se integraron a los actuadores hidráulicos, mientras que los transductores se dispusieron para capturar la deformación del castillo (P), desplazamientos horizontales (H), diagonales (D) y verticales (V) en múltiples ubicaciones del muro (**Figura 27**). Los datos se recolectaron en tiempo real mediante un registrador (TDS-630), asegurando precisión y simultaneidad en las mediciones [41].

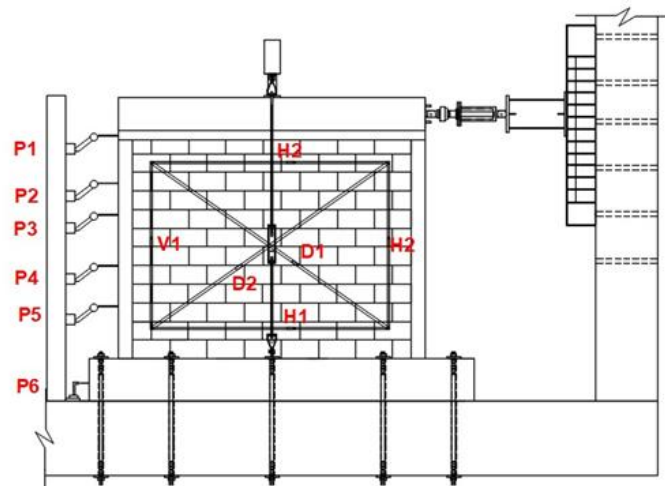


Figura 27. Marco de carga e instrumentación [41].

Los resultados experimentales de dichas investigaciones se presentan a continuación, incluyendo las curvas históricas (**Figura 28**), curvas envolventes (**Figura 29**) y parámetros críticos (rigidez, resistencia lateral, distorsión y ductilidad) para cada espécimen. En general, se observa un mejor comportamiento de los muros confinados de block reforzados con GFRP. En la **Tabla 8** se presentan, para cada muro, la rigidez lateral inicial (K_i), la resistencia al agrietamiento (V_{cr}), la resistencia máxima (V_{max}), la resistencia última (V_u) y la relación V_{max}/V_{cr} . En la **Tabla 9** se muestran las distorsiones al agrietamiento (γ_{cr}), a la carga máxima (γ_{max}) y a la falla (γ_u), además de las ductilidades a la resistencia máxima (μ_{max}) y a la resistencia última (μ_u).

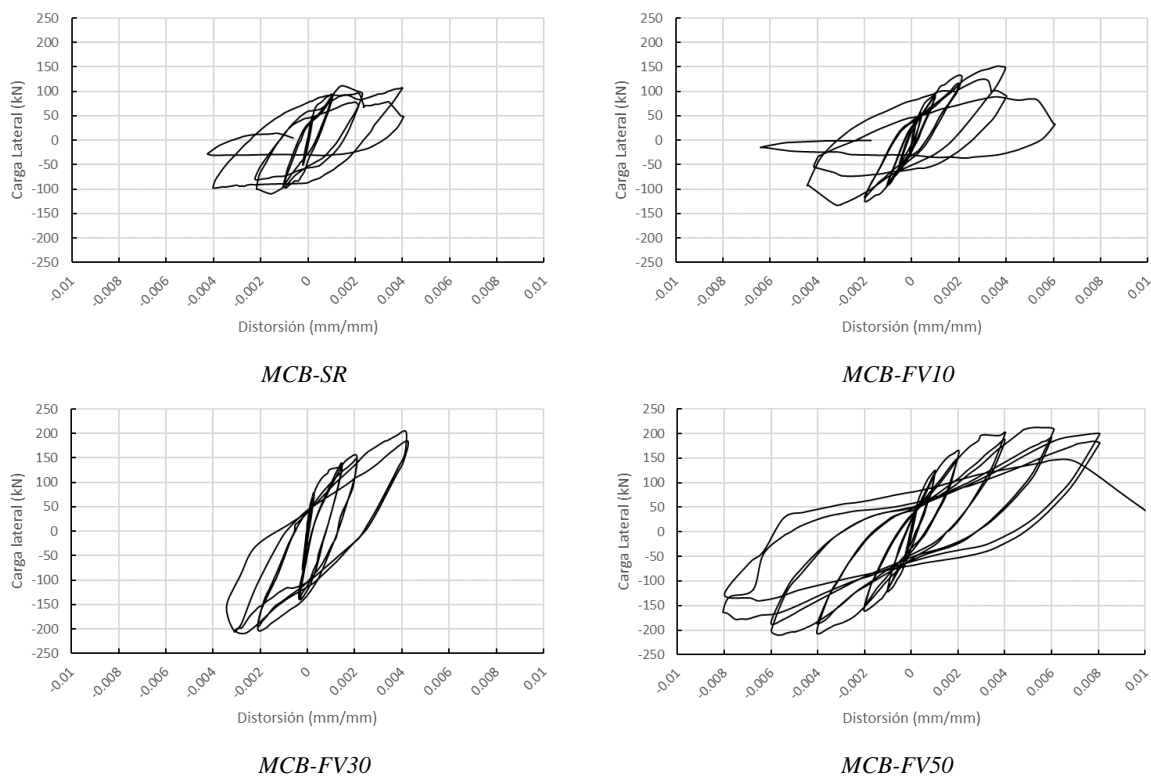


Figura 28. Curvas históricas.

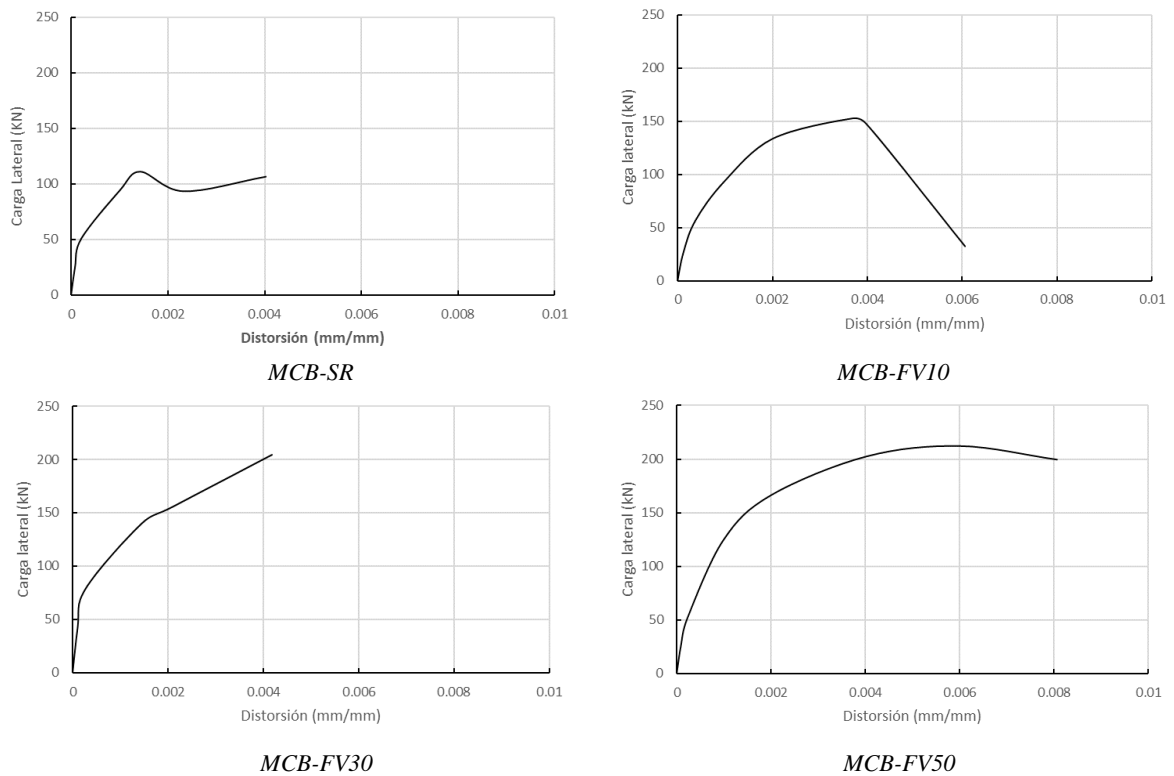


Figura 29. Curvas envolventes.

Tabla 8. Resultados de rigidez y resistencia lateral correspondientes a los puntos críticos.

ESPÉCIMEN	K_i (kN)	V_{cr} (kN)	V_{max} (kN)	V_u (kN)	$\frac{V_{max}}{V_{cr}}$
MCB-SR	116.92	64.69	110.69	106.18	1.71
MCB-FV10	119.54	56.54	151.77	84.57	2.68
MCB-FV30	-	132.39	204.67	-	1.55
MCB-FV50	119.14	78.13	212.08	201.08	2.71

Tabla 9. Resultados de distorsión y ductilidad en especímenes.

ESPÉCIMEN	γ_{cr}	γ_{max}	γ_u	$\mu_{max} = \gamma_{max}/\gamma_{cr}$	$\mu_{\mu} = \gamma_u/\gamma_{cr}$
MCB-SR	0.00030	0.0014	0.0040	4.71	13.30
MCB-FV10	0.00037	0.0036	0.0050	9.65	13.41
MCB-FV30	0.0014	0.00418	-	3.07	-
MCB-FV50	0.00041	0.0060	0.0080	14.69	19.59

Los resultados de las investigaciones experimentales previas muestran que el refuerzo a base de fibra de vidrio no tuvo un efecto en la rigidez lateral inicial de los muros de block. Los especímenes con refuerzo tuvieron una rigidez inicial 1.02 veces mayor que la del muro sin refuerzo (MCB-SR).

El uso de fibra de vidrio como refuerzo contribuye significativamente en incrementar la resistencia máxima del sistema. Las resistencias de los especímenes MCB-FV10, MCB-FV30 y MCB-FV50 fueron 1.37, 1.85 y 1.92 veces mayor que la del muro sin refuerzo (MCB-SR), respectivamente.

El efecto del refuerzo en la ductilidad del sistema fue significativo. En promedio, los muros reforzados (MCB-FV10, MCB-FV30 y MCB-FV50) tuvieron una ductilidad a la resistencia máxima 2.91 veces mayor que la del muro sin refuerzo (MCB-SR), mientras que la ductilidad promedio a la resistencia última fue 1.24 veces mayor.

El refuerzo con GFRP demostró un impacto notable en los patrones de agrietamiento de los muros. Al igual que ocurre con el refuerzo horizontal, este material generó una distribución más uniforme de las fisuras, reduciendo significativamente su anchura máxima.

A partir de estos resultados se considera que el comportamiento de los muros reforzados con GFRP es equiparable al de los muros reforzados con refuerzo horizontal, por lo que en el análisis y diseño estructural se pueden considerar los mismos factores de ductilidad y capacidad de deformación.

3.3.3 Calibración de ecuaciones

Se desarrollaron hojas de cálculo para evaluar la contribución del refuerzo GFRP en la resistencia a corte de muros de mampostería a partir de las especificaciones de la guía normativa CNR-DT 200 R1/2014 [30].

En el Capítulo 5 de la guía CNR-DT 200 R1/2014 [30] se presentan un conjunto de ecuaciones de diseño específicas considerando el refuerzo compuesto a utilizar en el reforzamiento de muros de mampostería. Estas ecuaciones abordan diversos aspectos críticos del diseño, los cuales se describieron en la sección 2.4.1 de esta tesis.

De acuerdo con dicha guía de diseño, la contribución del FRP a la resistencia al corte, $V_{Rd,f}$, se calcula con la ecuación 41 (véase sección 2.4.1.3):

$$V_{Rd,f} = \frac{\delta_{Rd}}{H} (\sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_{fe}) \quad (41)$$

Donde $V_{Rd,f}$ es la contribución del refuerzo compuesto a la resistencia al corte, δ_{Rd} es el desplazamiento horizontal de la parte alta del muro, H es la altura del muro, α es el ángulo

de inclinación de la banda del refuerzo compuesto, E_f es el módulo de elasticidad de la fibra, A_{fe} es el área de la fibra efectiva.

En esta investigación se consideró que la resistencia corte de un muro de mampostería reforzado es igual a la suma de la resistencia corte de la mampostería y la contribución del refuerzo, siendo la misma filosofía de la normativa mexicana [23]. En este sentido, se utilizó la ecuación 42 para determinar la capacidad a corte de un muro con GFRP.

$$V_R = V_{mR} + V_{Rd,f} \quad (42)$$

Donde V_{mR} es la resistencia de diseño del muro sin refuerzo de acuerdo con la NTC-Mampostería [23], y se calcula de la siguiente manera (ecuación 43):

$$V_{mR} = F_R(0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v'_m A_T f \quad (43)$$

donde F_R es un factor de resistencia a fuerza cortante, v'_m es la resistencia a compresión diagonal de la mampostería, A_T es el área transversal del muro, P es la carga axial y se deberá tomar positiva en compresión considerando las acciones permanentes, variables con intensidad instantánea, y accidentales que conduzcan al menor valor y sin multiplicar por el factor de carga. El factor f se determinará según la ecuación 44.

$$f = \begin{cases} 1.5 \text{ si } \frac{H}{L} \leq 0.2 \\ 1.0 \text{ si } \frac{H}{L} \geq 1.0 \end{cases} \quad (44)$$

para los casos intermedios de H/L , se interpolará linealmente.

Dichas hojas de cálculo se utilizaron para la calibración de las ecuaciones 41 y 42 a partir de los datos experimentales obtenidos de los especímenes previamente ensayados: MCB-SR, MCB-FV10, MCB-FV30 y MCB-FV50. En el caso del muro sin refuerzo (MCB-SR), su resistencia máxima se comparó sólo con la resistencia de la mampostería calculada conforme a la NTC-Mampostería [23] (sin considerar refuerzo). Para los muros con refuerzo, se consideró que la contribución a la resistencia lateral de la fibra de vidrio es igual a la diferencia entre la carga máxima soportada por dicho espécimen reforzado y la resistencia máxima del muro sin refuerzo (MCB-SR). Este resultado experimental se comparó con el resultado analítico obtenido con la ecuación 41.

A partir de un modelo numérico elástico del muro prototipo se observó que, bajo carga lateral, se desarrollan esfuerzos de compresión biaxial en las zonas cercanas a dos esquinas diagonalmente opuestas, lo que reduce la eficiencia del refuerzo GFRP ubicado en dichas zonas (**Figura 30**). El refuerzo se activa sólo cuando existen esfuerzos de tensión en la dirección de las tiras de fibra de vidrio. Para tomar en cuenta este resultado, se consideró un área efectiva de refuerzo (A_{fe}) en el cálculo de $V_{Rd,f}$, lo cual se obtiene despreciando el área de GFRP ubicada en las zonas de compresión. Para ello, se comparó la ubicación de las bandas de fibra de vidrio en cada espécimen (**Figura 31**) con la zona de compresión obtenida en el modelo numérico. Con ello, para cada muro se determinó un factor de reducción del área de refuerzo.

Para los muros MCB-FV30 y MCB-FV50 se consideró un factor de reducción promedio de 0.6 ($A_{fe} = 0.6A_f$). Sin embargo, para el muro MCB-FV10 este factor fue igual a 1.0 ($A_{fe} = A_f$) debido a que el refuerzo (solo tres bandas) se localizó fuera de la zona comprimida.

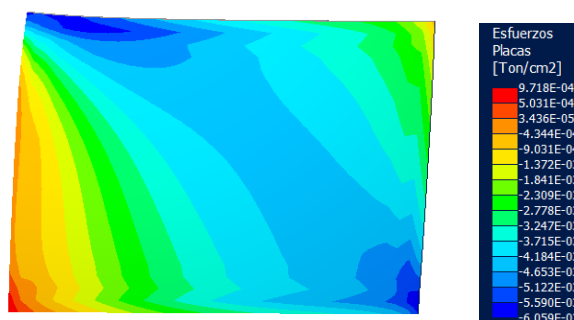


Figura 30. Zona de esfuerzos de compresión de muros con diferentes relaciones de aspecto.

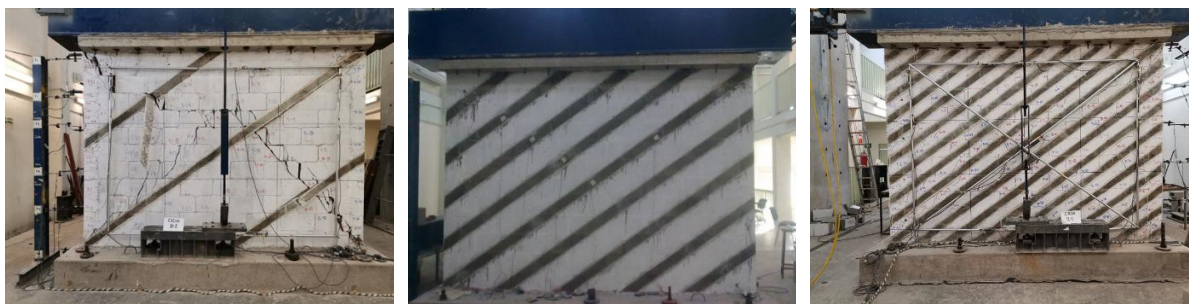


Figura 31. Patrón de agrietamiento del espécimen MCB-FV10, MCB-FV30 y MCB-FV50 [41-42].

A continuación, se presenta el proceso de calibración de las ecuaciones con los resultados experimentales de cada espécimen con refuerzo GFRP.

**CALIBRACIÓN DE ECUACIONES EXISTENTES PARA MCB-FV10
CNR-DT 200 R1 2014**

(Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures)

1. Datos de entrada

1.1 Geometría y propiedades mecánicas de la mampostería

Altura del muro	H	<input type="text" value="2.45"/>	m
Longitud del muro	L	<input type="text" value="3.30"/>	m
Espesor del muro	t	<input type="text" value="0.12"/>	m
Resistencia a la compresión de bloques de mampostería	f_{bm}	<input type="text" value="10.22"/>	MPa
Resistencia a la tensión de bloques de mampostería	f_{btm}	<input type="text" value="1.022"/>	MPa
Resistencia a compresión diagonal de la mampostería.	v'_m	<input type="text" value="0.445"/>	MPa

1.2 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio

Espesor de la fibra	t_f	<input type="text" value="1.00"/>	mm
Resistencia a la tensión de la fibra	f_{fu}^*	<input type="text" value="960"/>	MPa
Módulo de elasticidad de la fibra	E_f	<input type="text" value="73000"/>	MPa
Elongación de rotura de la fibra	ε_{fu}^*	<input type="text" value="0.0133"/>	
Ancho de la banda ó tira de la fibra	b_f	<input type="text" value="100"/>	mm
Numero de banda o tira de FRP	n	<input type="text" value="3"/>	

1.3 Información de la carga solicitada

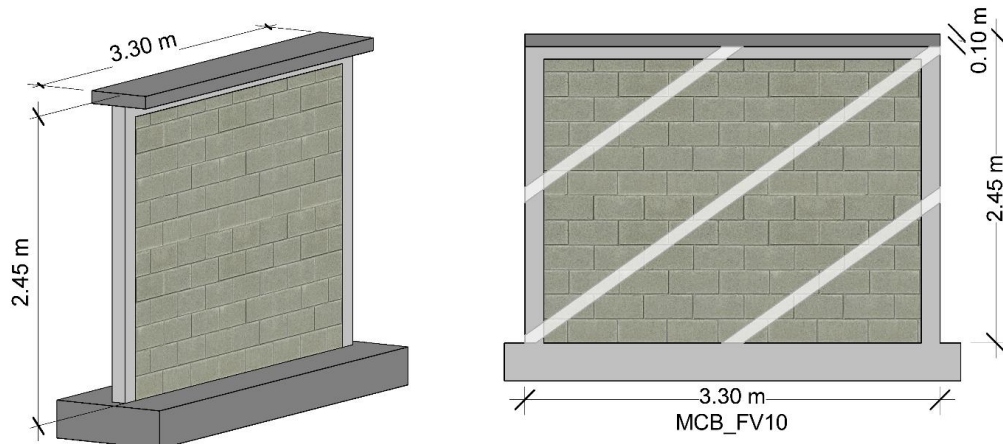
Carga vertical sin factorizar	P_u	<input type="text" value="100"/>	kN
-------------------------------	-------	----------------------------------	----

1.4 Información del muro experimental

Resistencia al corte del muro no reforzado	V_u	<input type="text" value="110.7"/>	kN
--	-------	------------------------------------	----

Resistencia al corte del MCB-FV10	V_u	<input type="text" value="151.8"/>	kN
-----------------------------------	-------	------------------------------------	----

2. Cálculo de la resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada NTC-Mampostería 2023



2.1 Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada

Factor de resistencia a fuerza cortante	F_R	1.00	
Resistencia a compresión diagonal de la mampostería	v'_m	0.445	MPa
Área transversal del muro ($t \cdot L$)	A_T	396,000	mm ²
Carga axial sin factorizar	P_u	100,000	N
Altura del muro	H	2,450	mm
Longitud del muro incluyendo los castillos	L	3,300	mm
Factor que toma en cuenta la relación de aspecto del muro	f	1.16098	
$V_{mR} = F_R(0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v'_m A_T f$	ΦV_{mR}	137,123.92	N
$V_{mR} = (0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v'_m A_T f$	V_{mR}	137,123.92	N
	ΦV_{mR}	137.12	kN

3. Cálculo de las propiedades mecánicas de diseño del FRP

3.1 Factor correctivo geométrico

Dimensiones del block (mm)	
$b =$	400
$h =$	200
$t =$	120
$j =$	10
$bd =$	310
$b =$	410
$b_f =$	100

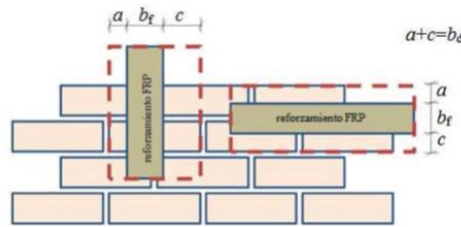


Figura 1. Distribución de resistencia de pegado para piedras de forma regular.

Factor correctivo geométrico

k_b

1.49

$$k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f/b}{1 + b_f/b}}$$

3.2 Valor de diseño de la energía específica de fractura

k_G es un factor correctivo, expresado en milímetros y dependiente del tipo de mampostería.

para mampostería de bloques perforados:

k_G 0.031 mm

para mampostería de pómez:

k_G 0.048 mm

para mampostería de piedras calcarenitas y Lecce:

k_G 0.012 mm

Factor de confianza

FC 1

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}}$$

Valor de diseño de la energía específica de fractura

Γ_{Fd}

0.149

N/mm

3.3 Resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería

$$f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$$

Si los datos experimentales no están disponibles, s_u en la ecuación anterior es igual a 0.4 mm para piedra pómez (porosas) y bloques perforados, y 0.3 mm para mampostería calcarenitas y piedras

Resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería

f_{bd}

0.7457

N/mm²

3.4 Longitud óptima de pegado

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 150\text{mm} \right\}$$

Factores parciales γ_{Rd}	
Modelo de resistencia	γ_{Rd}
Flexión y Flexocompresión	1
Corte/Torsión	1.2
Confinamiento	1.1

Longitud óptima de pegado l_{ed} 259.04 mm

3.5 Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (Modo 1)

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}$$

Factores parciales γ_m		
	ELU	ELS
$\gamma_m = \gamma_f$	1.1	1
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.2	-
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.5	-

Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (Modo 1) f_{fdd} 122.96 N/mm²

3.6 Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP intermedio (Modo 2)

$$f_{fdd,2} = \alpha \cdot f_{fdd} \quad (1.0 \leq \alpha \leq 2.0)$$

Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP intermedio $f_{fdd,2}$ 245.93 N/mm²

3.7 Deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado compatible con el despegamiento en el soporte.

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f}$$

Deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado compatible con el despegamiento en el soporte. ε_{fdd} 0.0034

3.8 Desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal

$$\delta_{Rd,1} = 0.005 \cdot H$$

Desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal $\delta_{Rd,1}$ 12.25 mm

3.9 Máximo desplazamiento horizontal compatible con la deformación unitaria de diseño de CPRF

$$\delta_{Rd,2} = \frac{\Delta D_{fdd}}{\cos \alpha} = \varepsilon_{fdd} \frac{H}{\sin \alpha \cos \alpha} = \frac{f_{fdd} \cdot H}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha}$$

Máximo desplazamiento horizontal compatible con la deformación unitaria de diseño de CPRF

$$\delta_{Rd,2} = 8.73 \text{ mm}$$

3.10 Desplazamiento horizontal

$$\frac{\delta_{Rd}}{H} = \frac{1}{H} \min \{ \delta_{Rd,1}, \delta_{Rd,2} \} = \min \left\{ 0.005, \frac{f_{td}}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha} \right\}$$

Desplazamiento horizontal

$$\delta_{Rd}/H = 0.0036$$

4. Cálculo de la contribución del FRP a la resistencia al corte, $V_{Rd,f}$

$$V_{Rd,f} = \frac{\delta_{Rd}}{H} (\sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_{fe})$$

Área de la fibra

$$A_{fib} = 100 \text{ mm}^2$$

Área total de la fibra utilizada

$$A_{totalfib} = 300 \text{ mm}^2$$

Área efectiva de la fibra utilizada, $F_{RP}=1$

$$A_{fe} = 300 \text{ mm}^2$$

Ángulo de inclinación de las tiras de fibra de vidrio

$$\alpha = 35.46^\circ$$

Contribución del FRP

$$V_{Rd,f} = 30,048.75 \text{ N}$$

5. Cálculo de la resistencia nominal al corte del muro con el FRP, V_R

$$V_R = V_{mR} + V_{Rd,f}$$

Resistencia nominal al corte del muro con FRP

$$V_R = 167,172.67 \text{ N}$$

$$V_R = 167.17 \text{ kN}$$

6. Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada comparado NTC vs Experimental

Resistencia nominal al corte del muro no reforzado de acuerdo a la NTC

$$V_{mR} = 137.12 \text{ kN}$$

Resistencia nominal al corte del muro no reforzado experimentalmente

$$V_{max} = 110.70 \text{ kN}$$

$$V_{mR}/V_{max} = 1.24$$

7. Resistencia nominal al corte de la mampostería reforzada comparado CNR DT 200 R1 vs Experimental

Resistencia nominal al corte del muro reforzado de acuerdo a CNR DT 200

$$V_R = 167.17 \text{ kN}$$

Resistencia nominal al corte del muro reforzado experimentalmente

$$V_{max} = 151.80 \text{ kN}$$

$$V_R/V_{max} = 1.10$$

8. Contribución de la fibra de vidrio a la resistencia del muro comparado CNR DT 200 R1 vs Experimental

Contribución del FRP de acuerdo a CNR DT 200 R1

$$V_{Rd,f} = 30.05 \text{ kN}$$

Contribución del FRP experimentalmente

$$V_{fe} = 41.10 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,f}/V_{fe} = 0.73$$

Al comparar la resistencia nominal al corte del muro sin refuerzo obtenida de acuerdo con la NTC-Mampostería y la resistencia máxima del muro MCB-SR, se observa que la predicción de las normas sobreestima un 24% dicho parámetro. La resistencia teórica del muro reforzado (V_R) es 10% mayor que la resistencia lateral del espécimen MCB-FV10. Mientras que la contribución teórica del GFRP es 27% menor que la contribución de la fibra en el muro MCB-FV10.

CALIBRACIÓN DE ECUACIONES EXISTENTES PARA MCB-FV30
CNR-DT 200 R1 2014

(Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures)

1. Datos de entrada

1.1 Geometría y propiedades mecánicas de la mampostería

Altura del muro	H	<input type="text" value="2.45"/>	m
Longitud del muro	L	<input type="text" value="3.30"/>	m
Espesor del muro	t	<input type="text" value="0.12"/>	m
Resistencia a la compresión de bloques de mampostería	f_{bm}	<input type="text" value="10.22"/>	MPa
Resistencia a la tensión de bloques de mampostería	f_{btm}	<input type="text" value="1.022"/>	MPa
Resistencia a compresión diagonal de la mampostería.	v'_m	<input type="text" value="0.445"/>	MPa

1.2 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio

Espesor de la fibra	t_f	<input type="text" value="1.00"/>	mm
Resistencia a la tensión de la fibra	f_{fu}^*	<input type="text" value="960"/>	MPa
Módulo de elasticidad de la fibra	E_f	<input type="text" value="73000"/>	MPa
Elongación de rotura de la fibra	ε_{fu}^*	<input type="text" value="0.0133"/>	
Ancho de la banda ó tira de la fibra	b_f	<input type="text" value="100"/>	mm
Numero de banda o tira de FRP	n	<input type="text" value="9"/>	

1.3 Información de la carga solicitada

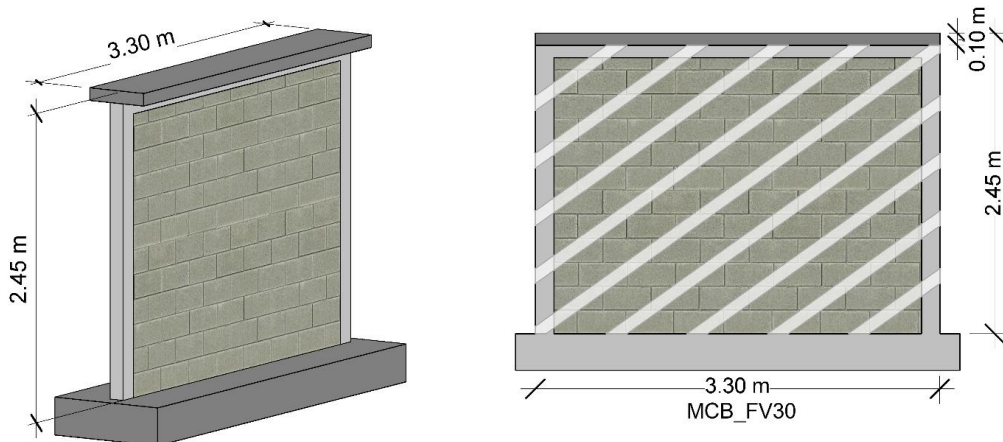
Carga vertical sin factorizar	P_u	<input type="text" value="100"/>	kN
-------------------------------	-------	----------------------------------	----

1.4 Información del muro experimental

Resistencia al corte del muro no reforzado	V_{max}	<input type="text" value="158.34"/>	kN
--	-----------	-------------------------------------	----

Resistencia al corte del MCB-FV30	V_{max}	<input type="text" value="204.67"/>	kN
-----------------------------------	-----------	-------------------------------------	----

2. Cálculo de la resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada NTC-Mampostería 2023



2.1 Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada

Factor de resistencia a fuerza cortante	F_R	1.00	
Resistencia a compresión diagonal de la mampostería	v'_m	0.445	MPa
Área transversal del muro ($t \cdot L$)	A_T	396,000	mm ²
Carga axial sin factorizar	P_u	100,000	N
Altura del muro	H	2,450	mm
Longitud del muro incluyendo los castillos	L	3,300	mm
Factor que toma en cuenta la relación de aspecto del muro	f	1.16098	
$V_{mR} = F_R(0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v'_m A_T f$	ΦV_{mR}	137,123.92	N
$V_{mR} = (0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v'_m A_T f$	V_{mR}	137,123.92	N
	ΦV_{mR}	137.12	kN

3. Cálculo de las propiedades mecánicas de diseño del FRP

3.1 Factor correctivo geométrico

Dimensiones del block (mm)	
$b =$	400
$h =$	200
$t =$	120
$j =$	10
$bd =$	310
$b =$	410
$b_f =$	100

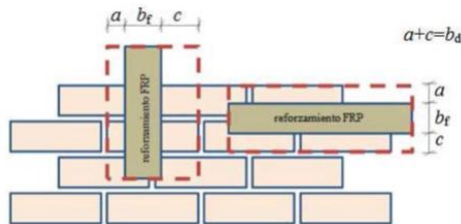


Figura 1. Distribución de resistencia de pegado para piedras de forma regular.

Factor correctivo geométrico

k_b

1.49

$$k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f/b}{1 + b_f/b}}$$

3.2 Valor de diseño de la energía específica de fractura

k_G es un factor correctivo, expresado en milímetros y dependiente del tipo de mampostería.

para mampostería de bloques perforados: k_G 0.031 mm

para mampostería de pómez: k_G 0.048 mm

para mampostería de piedras calcarenitas y Lecce: k_G 0.012 mm

Factor de confianza FC 1

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}}$$

Valor de diseño de la energía específica de fractura Γ_{Fd} 0.149 N/mm

3.3 Resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería

$$f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$$

Si los datos experimentales no están disponibles, s_u en la ecuación anterior es igual a 0.4 mm para piedra pómez (porosas) y bloques perforados, y 0.3 mm para mampostería calcarenitas y piedras

Resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería

f_{bd}

0.7457

N/mm²

3.4 Longitud óptima de pegado

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 150 \text{mm} \right\}$$

Factores parciales γ_{Rd}	
Modelo de resistencia	γ_{Rd}
Flexión y Flexocompresión	1
Corte/Torsión	1.2
Confinamiento	1.1

Longitud óptima de pegado l_{ed} 259.04 mm

3.5 Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (Modo 1)

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}$$

Factores parciales γ_m		
	ELU	ELS
$\gamma_m = \gamma_f$	1.1	1
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.2	-
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.5	-

Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (Modo 1) f_{fdd} 122.96 N/mm²

3.6 Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP intermedio (Modo 2)

$$f_{fdd,2} = \alpha \cdot f_{fdd} \quad (1.0 \leq \alpha \leq 2.0)$$

Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP intermedio $f_{fdd,2}$ 245.93 N/mm²

3.7 Deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado compatible con el despegamiento en el soporte.

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f}$$

Deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado compatible con el despegamiento en el soporte. ε_{fdd} 0.0034

3.8 Desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal

$$\delta_{Rd,1} = 0.005 \cdot H$$

Desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal $\delta_{Rd,1}$ 12.25 mm

3.9 Máximo desplazamiento horizontal compatible con la deformación unitaria de diseño de CPRF

$$\delta_{Rd,2} = \frac{\Delta D_{fdd}}{\cos \alpha} = \varepsilon_{fdd} \frac{H}{\sin \alpha \cos \alpha} = \frac{f_{fdd} \cdot H}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha}$$

Máximo desplazamiento horizontal compatible con la deformación unitaria de diseño de CPRF

$$\delta_{Rd,2} = 8.73 \text{ mm}$$

3.10 Desplazamiento horizontal

$$\frac{\delta_{Rd}}{H} = \frac{1}{H} \min \{ \delta_{Rd,1}, \delta_{Rd,2} \} = \min \left\{ 0.005, \frac{f_{td}}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha} \right\}$$

Desplazamiento horizontal

$$\delta_{Rd}/H = 0.0036$$

4. Cálculo de la contribución del FRP a la resistencia al corte, $V_{Rd,f}$

$$V_{Rd,f} = \frac{\delta_{Rd}}{H} (\sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_{fe})$$

Área de la fibra

$$A_{fib} = 100 \text{ mm}^2$$

Área total de la fibra utilizada

$$A_{totalfib} = 900 \text{ mm}^2$$

Área efectiva de la fibra utilizada, $F_{RP}=0.6$

$$A_{fe} = 540 \text{ mm}^2$$

Ángulo de inclinación de las bandas de fibra de vidrio

$$\alpha = 35.46^\circ$$

Contribución del FRP

$$V_{Rd,f} = 54,087.74 \text{ N}$$

5. Cálculo de la resistencia nominal al corte del muro con el FRP, V_R

$$V_R = v_{mR} + V_{Rd,f}$$

Resistencia nominal al corte del muro con FRP

$$V_R = 191,211.67 \text{ N}$$

$$V_R = 191.21 \text{ kN}$$

6. Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada comparado NTC vs Experimental

Resistencia nominal al corte del muro no reforzado de acuerdo a la NTC

$$V_{mR} = 137.12 \text{ kN}$$

Resistencia nominal al corte del muro no reforzado experimentalmente

$$V_{max} = 158.34 \text{ kN}$$

$$V_{mR}/V_{max} = 0.87$$

7. Resistencia nominal al corte de la mampostería reforzada comparado CNR DT 200 R1 vs Experimental

Resistencia nominal al corte del muro reforzado de acuerdo a CNR DT 200

$$V_R = 191.21 \text{ kN}$$

Resistencia nominal al corte del muro reforzado experimentalmente

$$V_{max} = 204.67 \text{ kN}$$

$$V_R/V_{max} = 0.93$$

8. Contribución de la fibra de vidrio a la resistencia del muro comparado CNR DT 200 R1 vs Experimental

Contribución del FRP de acuerdo a CNR DT 200 R1

$$V_{Rd,f} = 54.09 \text{ kN}$$

Contribución del FRP experimentalmente

$$V_{fe} = 46.33 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,f}/V_{fe} = 1.17$$

Con base en los resultados mostrados anteriormente se establece que la NTC-Mampostería subestima un 13% la resistencia V_{max} del espécimen MCB-SR. La resistencia teórica del muro reforzado (V_R) es 7% menor que la resistencia máxima del MCB-FV30. Mientras que la contribución teórica del GFRP ($V_{Rd,f}$) es 17% mayor que la contribución de la fibra en el muro MCB-FV30".

CALIBRACIÓN DE ECUACIONES EXISTENTES PARA MCB-FV50
CNR-DT 200 R1 2014

(Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures)

1. Datos de entrada

1.1 Geometría y propiedades mecánicas de la mampostería

Altura del muro	H	<input type="text" value="2.45"/>	m
Longitud del muro	L	<input type="text" value="3.30"/>	m
Espesor del muro	t	<input type="text" value="0.12"/>	m
Resistencia a la compresión de bloques de mampostería	f_{bm}	<input type="text" value="10.22"/>	MPa
Resistencia a la tensión de bloques de mampostería	f_{bm}	<input type="text" value="1.022"/>	MPa
Resistencia a compresión diagonal de la mampostería.	v'_m	<input type="text" value="0.445"/>	MPa

1.2 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio

Espesor de la fibra	t_f	<input type="text" value="1.00"/>	mm
Resistencia a la tensión de la fibra	f_{fu}^*	<input type="text" value="960"/>	MPa
Módulo de elasticidad de la fibra	E_f	<input type="text" value="73000"/>	MPa
Elongación de rotura de la fibra	ε_{fu}^*	<input type="text" value="0.0133"/>	
Ancho de la banda ó tira de la fibra	b_f	<input type="text" value="100"/>	mm
Numero de banda o tira de FRP	n	<input type="text" value="19"/>	

1.3 Información de la carga solicitada

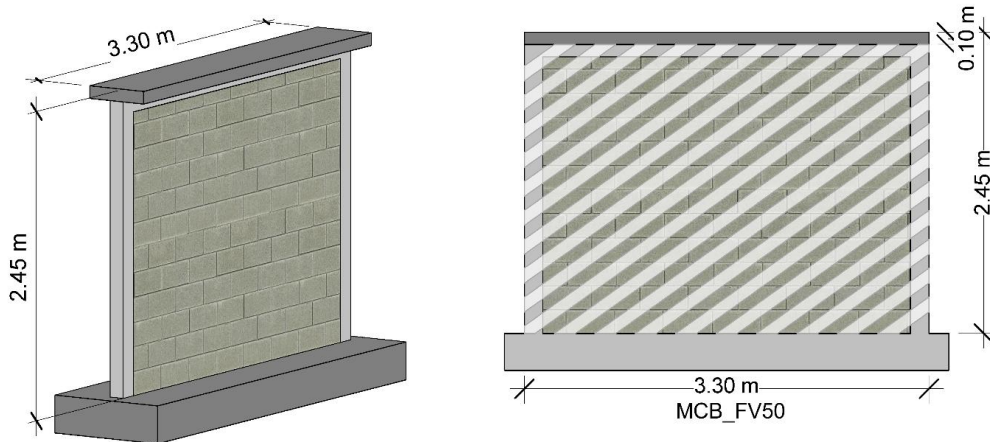
Carga vertical sin factorizar	P_u	<input type="text" value="100"/>	kN
-------------------------------	-------	----------------------------------	----

1.4 Información del muro experimental

Resistencia al corte del muro no reforzado	V_{max}	<input type="text" value="110.69"/>	kN
--	-----------	-------------------------------------	----

Resistencia al corte del MCB-FV50	V_{max}	<input type="text" value="212.08"/>	kN
-----------------------------------	-----------	-------------------------------------	----

2. Cálculo de la resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada NTC-Mampostería 2023



2.1 Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada

Factor de resistencia a fuerza cortante	F_R	1.00	
Resistencia a compresión diagonal de la mampostería	v'_m	0.445	MPa
Área transversal del muro ($t \cdot L$)	A_T	396,000	mm ²
Carga axial sin factorizar	P_u	100,000	N
Altura del muro	H	2,450	mm
Longitud del muro incluyendo los castillos	L	3,300	mm
Factor que toma en cuenta la relación de aspecto del muro	f	1.16098	
$V_{mR} = F_R(0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v'_m A_T f$	ΦV_{mR}	137,123.92	N
$V_{mR} = (0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v'_m A_T f$	V_{mR}	137,123.92	N
	ΦV_{mR}	137.12	kN

3. Cálculo de las propiedades mecánicas de diseño del FRP

3.1 Factor correctivo geométrico

Dimensiones del block (mm)	
$b =$	400
$h =$	200
$t =$	120
$j =$	10
$bd =$	310
$b =$	410
$b_f =$	100

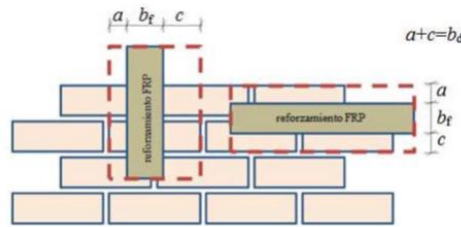


Figura 1. Distribución de resistencia de pegado para piedras de forma regular.

Factor correctivo geométrico	k_b	1.49	$k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f/b}{1 + b_f/b}}$
------------------------------	-------	------	--

3.2 Valor de diseño de la energía específica de fractura

k_G es un factor correctivo, expresado en milímetros y dependiente del tipo de mampostería.

para mampostería de bloques perforados:	k_G	0.031	mm
para mampostería de pómez:	k_G	0.048	mm
para mampostería de piedras calcarenitas y Lecce:	k_G	0.012	mm
Factor de confianza	FC	1	

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}}$$

Valor de diseño de la energía específica de fractura	Γ_{Fd}	0.149	N/mm
--	---------------	-------	------

3.3 Resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería

$$f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$$

Si los datos experimentales no están disponibles, s_u en la ecuación anterior es igual a 0.4 mm para piedra pómez (porosas) y bloques perforados, y 0.3 mm para mampostería calcarenitas y piedras

Resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería	f_{bd}	0.7457	N/mm ²
--	----------	--------	-------------------

3.4 Longitud óptima de pegado

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 150 \text{ mm} \right\}$$

Factores parciales γ_{Rd}	
Modelo de resistencia	γ_{Rd}
Flexión y Flexocompresión	1
Corte/Torsión	1.2
Confinamiento	1.1

Longitud óptima de pegado l_{ed} 259.04 mm

3.5 Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (Modo 1)

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}$$

Factores parciales γ_m		
	ELU	ELS
$\gamma_m = \gamma_f$	1.1	1
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.2	-
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.5	-

Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (Modo 1) f_{fdd} 122.96 N/mm²

3.6 Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP intermedio (Modo 2)

$$f_{fdd,2} = \alpha \cdot f_{fdd} \quad (1.0 \leq \alpha \leq 2.0)$$

Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP intermedio $f_{fdd,2}$ 245.93 N/mm²

3.7 Deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado compatible con el despegamiento en el soporte.

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f}$$

Deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado compatible con el despegamiento en el soporte. ε_{fdd} 0.0034

3.8 Desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal

$$\delta_{Rd,1} = 0.005 \cdot H$$

Desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal $\delta_{Rd,1}$ 12.25 mm

3.9 Máximo desplazamiento horizontal compatible con la deformación unitaria de diseño de CPRF

$$\delta_{Rd,2} = \frac{\Delta D_{fdd}}{\cos \alpha} = \varepsilon_{fdd} \frac{H}{\sin \alpha \cos \alpha} = \frac{f_{fdd} \cdot H}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha}$$

Máximo desplazamiento horizontal compatible con la deformación unitaria de diseño de CPRF

$$\delta_{Rd,2} = 8.73 \text{ mm}$$

3.10 Desplazamiento horizontal

$$\frac{\delta_{Rd}}{H} = \frac{1}{H} \min \{ \delta_{Rd,1}, \delta_{Rd,2} \} = \min \left\{ 0.005, \frac{f_{fd}}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha} \right\}$$

Desplazamiento horizontal

$$\delta_{Rd}/H = 0.0036$$

4. Cálculo de la contribución del FRP a la resistencia al corte, $V_{Rd,f}$

$$V_{Rd,f} = \frac{\delta_{Rd}}{H} (\sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_{fe})$$

Área de la fibra

$$A_{fib} = 100 \text{ mm}^2$$

Área total de la fibra utilizada

$$A_{totalfib} = 1,900 \text{ mm}^2$$

Área efectiva de la fibra utilizada, $F_{RP}=0.6$

$$A_{fe} = 1,140 \text{ mm}^2$$

Ángulo de inclinación de las tiras de fibra de vidrio

$$\alpha = 35.46^\circ$$

Contribución del FRP

$$V_{Rd,f} = 114,185.24 \text{ N}$$

5. Cálculo de la resistencia nominal al corte del muro con el FRP, V_R

$$V_R = V_{mR} + V_{Rd,f}$$

Resistencia nominal al corte del muro con FRP

$$V_R = 251,309.16 \text{ N}$$

$$V_R = 251.31 \text{ kN}$$

6. Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada comparado NTC vs Experimental

Resistencia nominal al corte del muro no reforzado de acuerdo a la NTC

$$V_{mR} = 137.12 \text{ kN}$$

Resistencia nominal al corte del muro no reforzado experimentalmente

$$V_{max} = 110.69 \text{ kN}$$

$$V_{mR}/V_{max} = 1.24$$

7. Resistencia nominal al corte de la mampostería reforzada comparado CNR DT 200 R1 vs Experimental

Resistencia nominal al corte del muro reforzado de acuerdo a CNR DT 200

$$V_R = 251.31 \text{ kN}$$

Resistencia nominal al corte del muro reforzado experimentalmente

$$V_{max} = 212.08 \text{ kN}$$

$$V_R/V_{max} = 1.18$$

8. Contribución de la fibra de vidrio a la resistencia del muro comparado CNR DT 200 R1 vs Experimental

Contribución del FRP de acuerdo a CNR DT 200 R1

$$V_{Rd,f} = 114.19 \text{ kN}$$

Contribución del FRP experimentalmente

$$V_{fe} = 101.39 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,f}/V_{fe} = 1.13$$

Comparando la resistencia teórica del muro reforzado (V_R) y la resistencia máxima de muro MCB-FV50 se observa que los resultados analíticos sobrestiman un 18% este parámetro. Mientras que la contribución teórica del GFRP ($V_{Rd,f}$) sobrestiman 13% en comparación con la contribución del refuerzo en el espécimen MCB-FV50.

3.3.4 Descripción del modelo prototipo de una estructura de mampostería

Se seleccionó un modelo representativo de una estructura de mampostería con características arquitectónicas típicas de un edificio de departamentos de bajo costo. La estructura adoptada corresponde a un sistema de muro de carga de mampostería confinada, caracterizado por la continuidad vertical de los elementos de soporte, es decir, una distribución uniforme de los muros en cada entrepiso, siguiendo el principio de "muro sobre muro".

El proyecto se encuentra ubicado en la Calle Venus No. 25, en la Col. Bellavista, en Culiacán, Sinaloa (**Figura 32**). Esta ubicación representa las condiciones climáticas y sísmicas típicas de la región, lo que garantiza que el modelo seleccionado refleja las características constructivas de edificaciones locales.

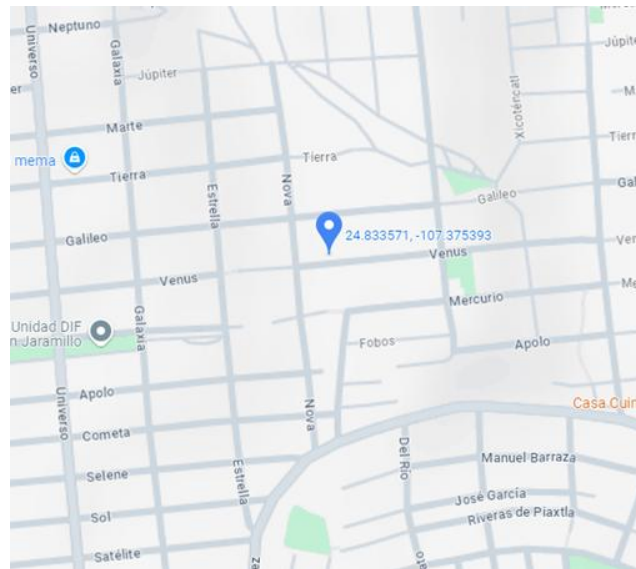


Figura 32. Localización satelital del proyecto.

Las dimensiones generales de la edificación fueron definidas a partir de un proyecto arquitectónico que cumpla con las necesidades estructurales y funcionales. La configuración de las plantas, la fachada, vista en corte longitudinal y transversal, así como la planta arquitectónica de azotea se muestran en las **Figura 33**, **Figura 34**, **Figura 35**, **Figura 36**, **Figura 37** y **Figura 38**, respectivamente.



Figura 33. Planta Arquitectónica Nivel 1.



Figura 34. Planta Arquitectónica Tipo.



Figura 35. Fachada Arquitectónica.

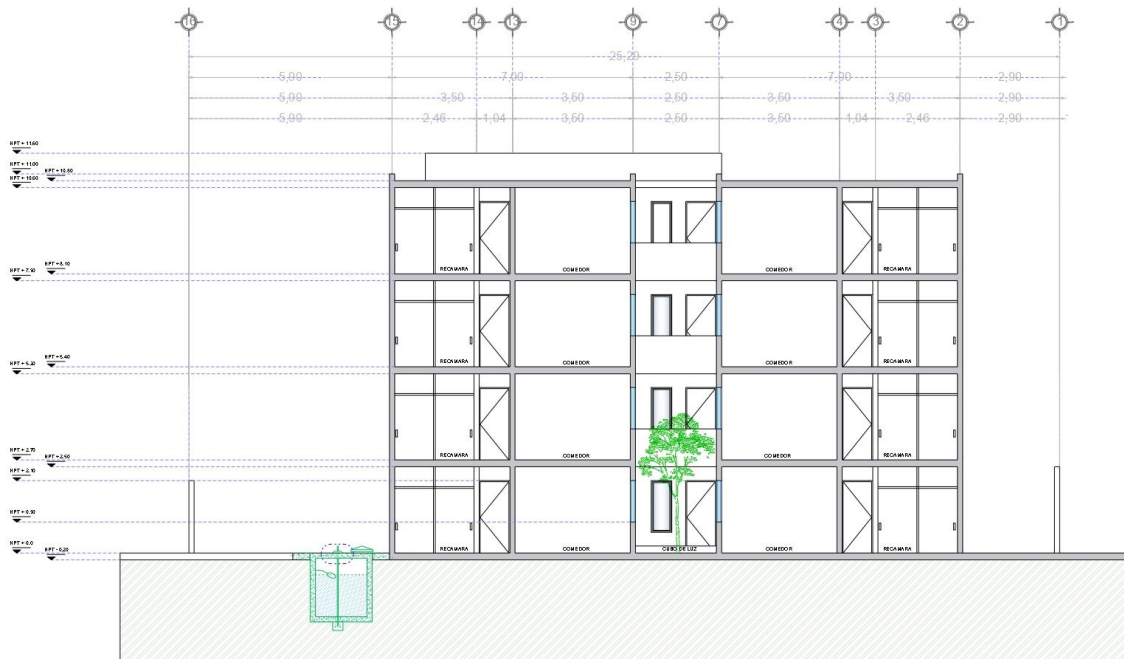


Figura 36. Corte A-A arquitectónico.

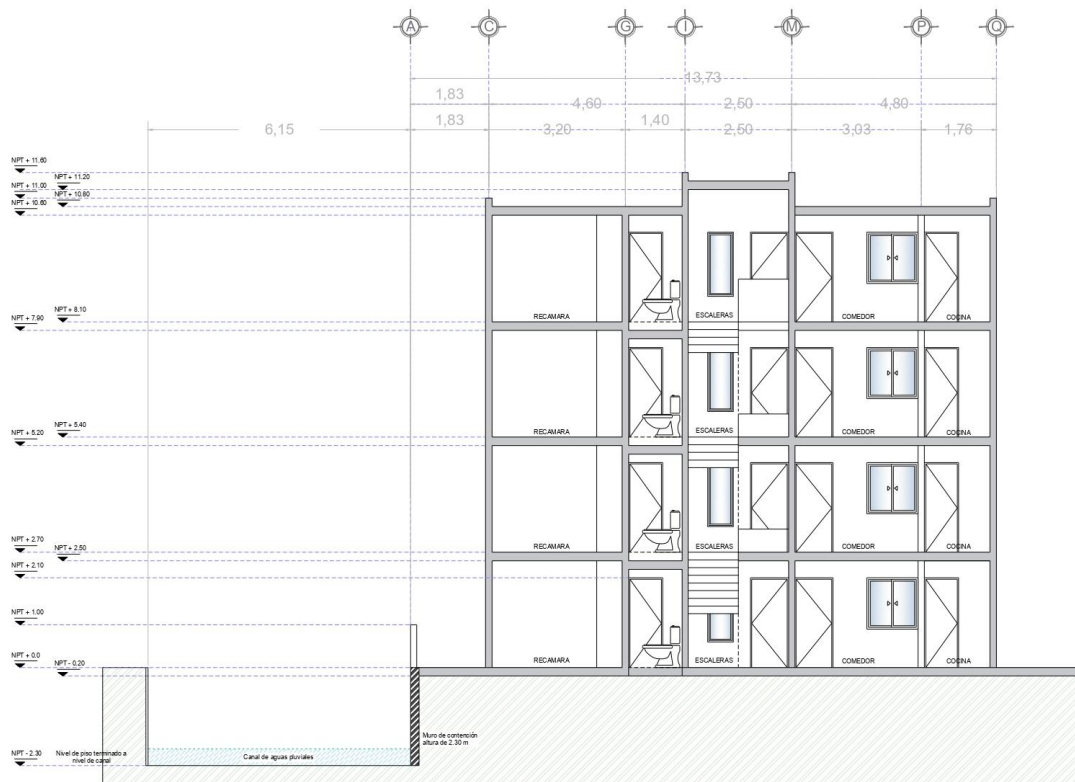


Figura 37. Corte B-B arquitectónico.

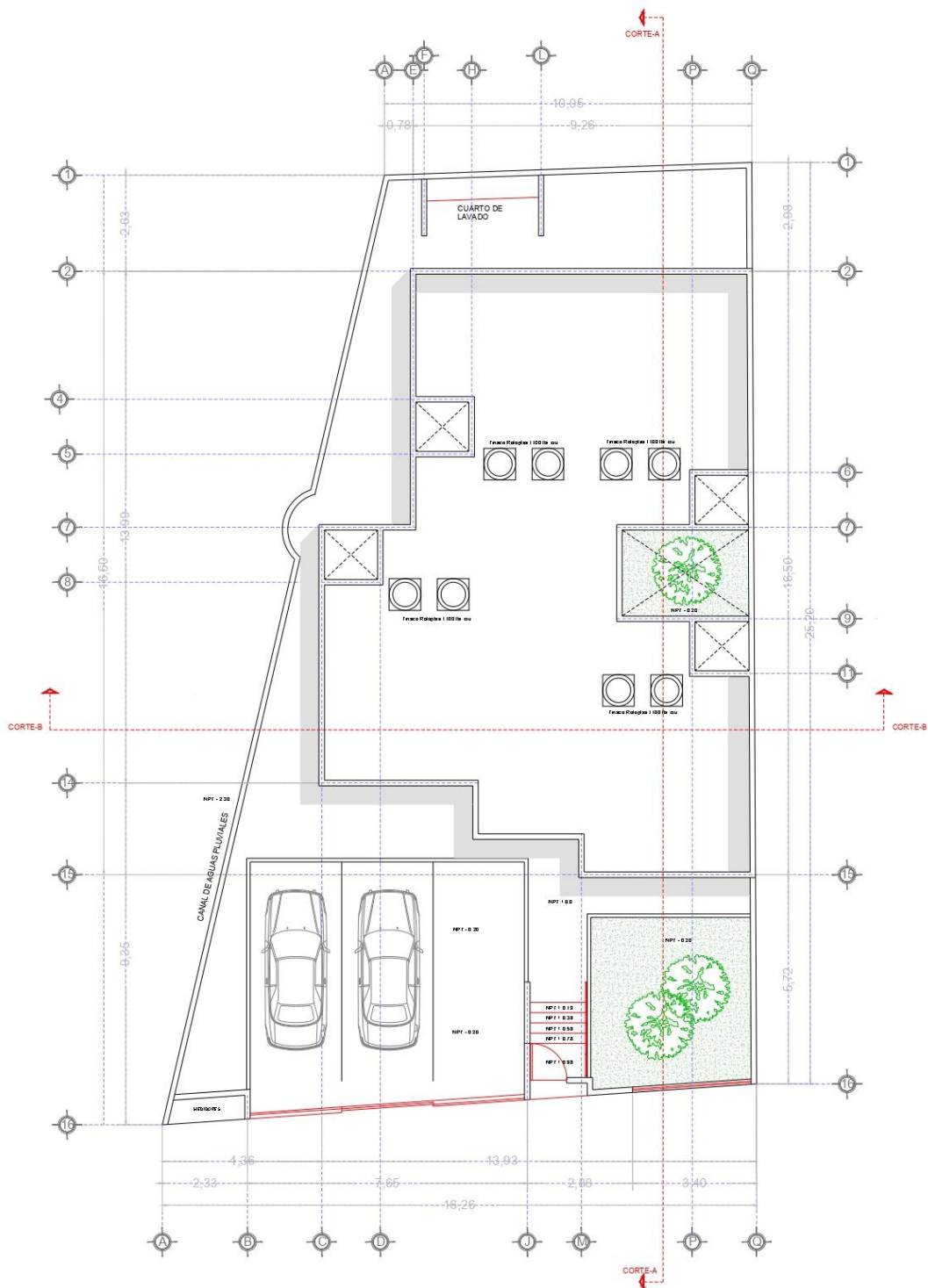


Figura 38. Planta arquitectónica de Azotea.

3.3.5 Análisis y diseño del modelo prototipo

3.3.5.1 Descripción de la estructura

La estructura es a base de muros de mampostería confinada, construida con unidades de block hueco de concreto con dimensiones nominales de 120×200×400 mm. Los elementos de confinamiento vertical (castillos) y horizontal (dalas) tienen secciones transversales de 120×150 mm y 120×200 mm, respectivamente. Para la construcción de los muros, se consideró un mortero estructural Tipo I, en cumplimiento con los lineamientos establecidos en la NTC-Mampostería [23].

Las losas de entrepiso y azotea se definieron como losas aligeradas con casetones de 150×600×600 mm, configuradas mediante nervaduras de 120×200 mm, alcanzando un peralte total de 200 mm. Estas losas incluyen una capa de compresión de 50 mm de espesor. Estas características garantizan un buen desempeño estructural y capacidad para resistir cargas distribuidas.

3.3.5.2 Consideraciones de diseño

La NTC-Mampostería [23] establecen que “Las estructuras deberán analizarse bajo la acción de dos componentes horizontales ortogonales, no simultáneos, del movimiento del terreno ocasionado por sismos, así como por los efectos de viento y cargas gravitacionales. Las deformaciones y fuerzas internas resultantes deberán combinarse entre sí, junto con las fuerzas gravitacionales y demás acciones correspondientes”.

En este contexto, se llevó a cabo el análisis y diseño estructural del edificio destinado a departamentos, abarcando los elementos principales como losas y muros. Se consideró como carga accidental dominante la acción sísmica, dada su relevancia en la región de estudio.

Para el diseño de los elementos, se adoptaron las especificaciones y lineamientos proporcionados en la Norma Técnica complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-Concreto) [52], (**Figura 39**).

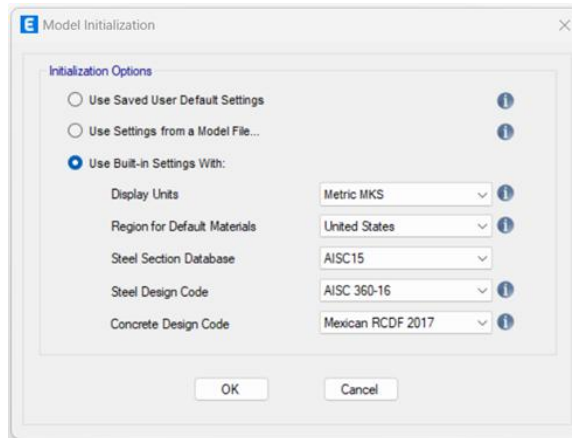


Figura 39. Consideraciones de diseño.

3.3.5.3 Clasificación de la estructura y zonificación

Para los efectos de estos criterios de diseño se consideraron los criterios establecidos en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (MOC-CFE-,2015) [31]. De acuerdo con la zonificación sísmica y con el tipo de suelo se proporcionaron los siguientes datos del sitio:

- Clasificación de terreno: Tipo II
- Zona sísmica: B
- Grupo estructural: B
- Coeficiente sísmico (C): 0.24

3.3.5.4 Espectro de diseño sísmico

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) proporciona herramientas para diseño sísmico de las estructuras, como el Programa de Diseño sísmico PRODISIS [53], a partir del cual se obtuvo el espectro de diseño sísmico transparente (**Figura 40**).

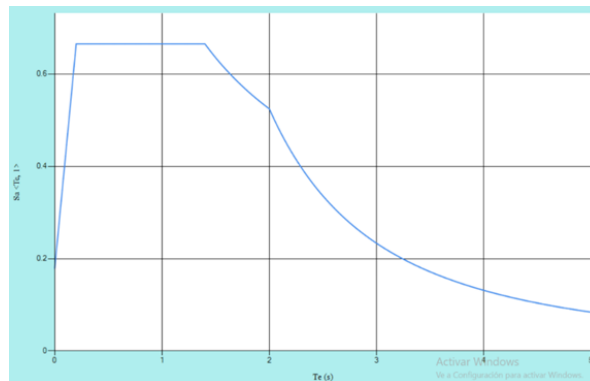


Figura 40. Espectro de diseño sísmico transparente.

3.3.5.5 Análisis sísmico dinámico modal espectral elástico

Se realizó un análisis dinámico modal espectral elástico para obtener las fuerzas sísmicas que actúan en la estructura. Para el diseño se consideraron dos estados límite: el nivel de servicio y el nivel de prevención de colapso. Para ello, se consideró la reducción de las solicitaciones sísmicas por ductilidad, sobre-resistencia y redundancia, de acuerdo con el Manual de Obras Civiles de la CFE (MOC-CFE, 2015) [31].

- Factor reductor por ductilidad.

Para fines de diseño, se tomó en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura, de manera aproximada. Para ello, las ordenadas espectrales se dividieron por el factor reductor por ductilidad $Q'(T_e, Q)$ a fin de obtener las fuerzas sísmicas reducidas. Dicho factor se calculó de acuerdo con la ecuación 45:

$$Q'(T_e, Q) = \begin{cases} 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta(T_e, \zeta_e)}{k} \frac{T_e}{T_b}} & \text{si } T_e \leq T_b \\ 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta(T_e, \zeta_e) p_b(T_e)}{k}} & \text{si } T_e > T_b \end{cases} \quad (45)$$

Donde Q es el factor de comportamiento sísmico especificado para cada tipo de estructura, T_b es el límite superior de la meseta del espectro de diseño, k es un parámetro que controla la caída del espectro, T_e es el periodo estructural en la dirección del análisis, $\beta(T_e, \zeta_e)$ es el factor de amortiguamiento, $p_b(T_e)$ es un factor empleado para definir la variación del espectro en la rama descendente, calculado de la siguiente forma (ecuación 46):

$$p_b(T_e) = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^2 \quad (46)$$

- Factor de comportamiento sísmico.

El factor de comportamiento sísmico Q se emplea para tomar en cuenta la influencia del comportamiento no lineal del sistema en la estimación de su demanda sísmica, y con ello, en su desempeño esperado y nivel de confiabilidad. Para el caso de este proyecto se consideró la adopción de un factor $Q = 2.0$, con base en la siguiente recomendación del Manual de Obras Civiles de la CFE (MOC-CFE, 2015) [31].

$Q = 2$ cuando se cumplan los siguientes requisitos:

“La resistencia a fuerzas laterales es suministrada por losas planas con columnas de acero o de concreto reforzado, por marcos de acero con ductilidad reducida o provistos de contraventeo con ductilidad normal, o de concreto reforzado que no cumplan con los requisitos para ser considerados dúctiles, o muros de concreto reforzado, de placa de acero o compuestos de acero y concreto, que no cumplen en algún entrepiso lo que se especifica para los casos $Q = 4$ y $Q = 3$ o por muros de mampostería de piezas macizas confinados por castillos, dadas, columnas o trabes de concreto reforzado o de acero que satisfacen los requisitos de las RNDEV. También se usará $Q = 2$ cuando la resistencia es suministrada por elementos de concreto prefabricado o presforzado, con las excepciones que sobre el particular marcan las RNDEV, o cuando se trate de estructuras de madera con las características que se indican en las RNDEV para estructuras de madera, o de algunas estructuras de acero que se indican en las normas vigentes.”

De acuerdo con la **Tabla 10** obtenida de dicho manual, para muros de carga de mampostería de piezas huecas con refuerzo horizontal se puede utilizar **$Q = 2.0$** .

Tabla 10. Distorsiones permisibles de entrepiso [31].

SISTEMA ESTRUCTURAL	Q	DISTORSIÓN
Marcos dúctiles de concreto reforzado	4	0.030
	3	0.025
Marcos dúctiles de acero	4	0.030
	3	0.025
Marcos dúctiles de sección compuesta de acero y concreto reforzado	4	0.030
	3	0.020
Marcos de acero, de concreto reforzado o compuestos de ambos materiales con ductilidad intermedia	1.25	0.008
Marcos de acero, de concreto reforzado o compuestos de ambos materiales con ductilidad limitada	2	0.015
Marcos con losas planas sin muros o contravientos	2	0.015
Marcos de acero con contravientos excéntricos	4	0.020
Marcos de acero, de concreto reforzado o compuestos de ambos materiales con contravientos concéntricos	3	0.015
Muros combinados con marcos dúctiles de concreto reforzado, o de placa de acero, o compuestos con los dos materiales o muros de madera contrachapada	3	0.015
Muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas con refuerzo horizontal o malla	2	0.008
Muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas; mampostería de piezas huecas confinada y reforzada horizontalmente o mampostería de piezas huecas confinada y reforzada con malla	2	0.006
Muros diafragma	2	0.006
Muros de carga de mampostería combinada y confinada	2	0.004
Muros de carga de mampostería de piezas huecas con refuerzo interior, o muros de madera de duela	1.5	0.004
Muros combinados con marcos de concreto reforzado con ductilidad limitada	1.5	0.010
Muros de carga de mampostería confinada de bloques huecos de concreto	1.25	0.003
Muros de carga de mampostería que no cumplan las especificaciones para mampostería confinada ni para mampostería reforzada interiormente	1.25	0.002

- Factor reductor por sobre-resistencia.

En general, existen diversos factores que hacen que las estructuras tengan una sobre-resistencia. La opción más práctica para tomar en cuenta este aspecto consiste en aplicar un factor reductor del lado de las acciones sísmicas.

La reducción por sobre-resistencia está dada por el factor $R(T_e, R_0)$, de acuerdo con la ecuación 47:

$$R(T_e, R_o) = \begin{cases} R_o + 1.0 - \sqrt{\frac{T_e}{T_a}} & \text{si } T_e \leq T_a \\ R_o & \text{si } T_e > T_a \end{cases} \quad (47)$$

Donde T_a es el límite inferior de la meseta del espectro de diseño, R_o es la sobrerresistencia índice, dependiendo del sistema estructural.

El factor reductor por sobre-resistencia puede diferir en las dos direcciones ortogonales en que se analiza la estructura, según sean sus propiedades en cada dirección. Para el caso de este proyecto se consideró la adopción de un valor de sobre-resistencia índice $R_o = 2$ para ambas direcciones, con base en la siguiente recomendación del Manual de Obras Civiles de la CFE (MOC-CFE, 2015) [31].

$R_o = 2$ para los siguientes sistemas estructurales:

“Marcos de concreto reforzado, de acero estructural o compuestos de los dos materiales diseñados con $Q = 3$ ó $Q = 2$; columnas de acero o de concreto reforzado con losas planas, por marcos o estructuraciones hechas con elementos de concreto prefabricado o presforzado; por marcos contraventeados o con muros de concreto reforzado o de placa de acero o compuestos de los dos materiales diseñados con $Q = 2, 3$ y 4 ; por muros de mampostería de piezas huecas, confinados o con refuerzo interior o por marcos y armaduras de madera”.

- Factor por redundancia.

Para cada dirección ortogonal de análisis, la redundancia de la estructuración empleada se tomará en cuenta mediante el factor por redundancia, ρ , de la siguiente manera:

$\rho = 0.8$ cuando se cumplan los siguientes requisitos: en estructuras con al menos dos marcos o líneas de defensa paralelas en la dirección de análisis, cuando se disponga de marcos de una sola crujía o estructuraciones equivalentes (un solo muro por línea de defensa paralela, etc.).

$\rho = 1.0$ cuando se cumplan los siguientes requisitos: en estructuras con al menos dos marcos o líneas de defensa paralelas en la dirección de análisis y que cada marco o línea de defensa disponga de al menos dos crujías o estructuraciones equivalentes.

$\rho = 1.25$ cuando se cumplan los siguientes requisitos: en estructuras con al menos tres marcos o líneas de defensa paralelas en la dirección de análisis y que cada marco o línea de defensa disponga de al menos tres crujías o estructuraciones equivalentes.

Para este proyecto se utilizó un factor por redundancia igual a **1.25**.

- Condiciones de regularidad.

En el diseño sísmico de estructuras que no satisfagan las condiciones de regularidad especificadas, el factor reductor por ductilidad $Q'(T_e, Q)$ se multiplicará por el factor α indicado en la **Tabla 11** a fin de obtener las fuerzas sísmicas reducidas por ductilidad. Sin embargo, en ningún caso $\alpha \cdot Q'(T_e, Q)$ se tomará menor que la unidad.

Tabla 11. Factor correctivo por irregularidad, α [31].

Factor correctivo α	Tipo de Irregularidad
0.9	Cuando no se cumpla una condición de regularidad enumerada del 1 al 9 del inciso 3.3.2.1 del MOC-CFE (2015)
0.8	Cuando no se cumplan dos o más condiciones de regularidad, o no se cumpla con la condición 10 o 11 de regularidad del inciso 3.3.2.1 del MOC-CFE (2015)
0.7	Estructura fuertemente irregular

Se utilizó un factor de irregularidad igual a **0.9**.

- Espectro de diseño sísmico modificado.

La filosofía seguida en este proyecto consistió en modificar el espectro de diseño transparente. Para el estado límite de servicio, el espectro de diseño transparente se dividió por el factor de servicio $F_{ser} = 5.5$ (ecuación 48). Para el estado límite de prevención de colapso, el espectro de diseño transparente se modificó con factores relacionados con la ductilidad, la sobre-resistencia y la redundancia (ecuación 49). No se consideró el comportamiento histórico degradante ($A_{cd}(T_e) = 1.0$). Los espectros de diseño para el estado límite de servicio y prevención de colapso se muestran en la **Figura 41** y **Figura 42**.

$$a' = \frac{a(T_e, \beta) A_{cd}(T_e)}{5.5} \quad (48)$$

$$a' = \frac{a(T_e, \beta) A_{cd}(T_e)}{Q'(T_e, Q) R(T_e, R_o) \rho} \quad (49)$$

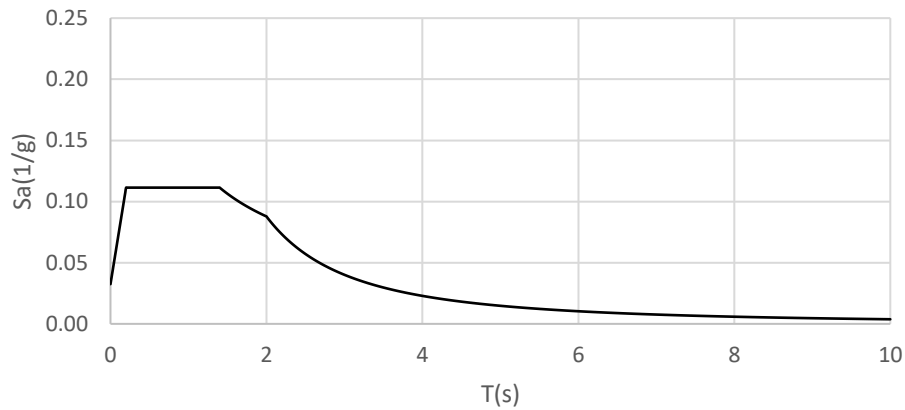


Figura 41. Espectro de diseño sísmico reducido para el estado límite de servicio.

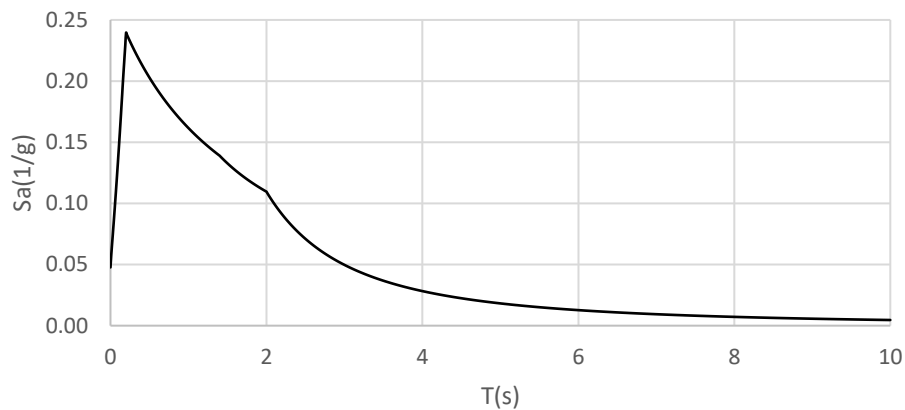


Figura 42. Espectro de diseño sísmico reducido para el estado límite de prevención de colapso.

3.3.5.6 Estimación de las cargas

Para el diseño de la estructura se tomó en cuenta los efectos de las acciones permanentes (cargas muertas), acciones variables (cargas vivas) y las acciones accidentales (carga de sismo).

- Cargas muertas y vivas.

Estas cargas se distribuyeron en los diferentes elementos estructurales de soporte. En la **Tabla 12** y **Tabla 13** se presentan las cargas utilizadas en el análisis de la estructura, correspondientes a los entrepisos y a la azotea, respectivamente. Para la carga muerta, se calculó el peso propio de la estructura y una sobrecarga muerta asociada al peso de los acabados y elementos no estructurales; mientras que para la carga viva se consideró lo

establecido en la Norma Técnica Complementaria sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-Criterios) [54].

Tabla 12. Carga para losas de entrepisos.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	Carga (kN/m ²)
CV	Carga viva máxima	1.9
CVA	Carga Viva Instantánea	1.0
CM	Carga muerta	Peso propio = PP
		Sobre carga muerta= 1.61

Tabla 13. Cargas para losa de azotea.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	Carga (kN/m ²)
CVM	Carga viva máxima	1.0
CVI	Carga Viva Instantánea	0.70
CM	Carga muerta	Peso propio = PP
		Sobre carga muerta= 2.30

3.3.5.7 Condiciones y combinaciones de carga

Las condiciones de carga (**Tabla 14**) y combinaciones consideradas en el análisis estructural fueron las siguientes:

- Para la combinación de carga muerta más carga viva, se empleó la intensidad máxima de la carga viva, considerándola uniformemente repartida sobre toda el área; y, se aplicó un factor de carga de 1.3 para carga muerta y 1.5 para carga viva (**Tabla 15**).
- Para las combinaciones que incluyeron acciones permanentes, variables y accidentales, se consideró todas las acciones permanentes, las acciones variables con sus valores instantáneos y únicamente una acción accidental en cada combinación. Se tomó un factor de carga de 1.1 (**Tabla 15**).
- Para las combinaciones donde las acciones o fuerzas internas cuyo efecto sea favorable a la resistencia o estabilidad de la estructura, el factor de carga se tomó igual a 0.9.

Tabla 14. Condiciones de carga.

PP	Peso Propio	Permanente (Dead)
CM	Carga Muerta	Permanente
CV	Carga Viva	Variable
CVA	Carga Viva Accidental	Variable
Sx	Sismo x	Espectral
Sy	Sismo y	Espectral

Tabla 15. Combinaciones de carga para diseño.

ELF_GRAVITACIONALES	1.3PP + 1.3CM + 1.5CV
ELS_GRAVITACIONALES	1.0PP+1.0CM+1.0CV
ELF_DIN_100SX+30SY	1.1PP + 1.1CM + 1.1CVA + 1.1SX + 0.33SY
ELF_DIN_100SX-30SY	1.1PP + 1.1CM + 1.1CVA + 1.1SX - 0.33SY
ELF_DIN_-100SX+30SY	1.1PP + 1.1CM + 1.1CVA - 1.1SX + 0.33SY
ELF_DIN_-100SX-30SY	1.1PP + 1.1CM + 1.1CVA - 1.1SX - 0.33SY
ELF_DIN_30SX+100SY	1.1PP + 1.1CM + 1.1CVA + 0.33SX + 1.1SY
ELF_DIN_30SX-100SY	1.1PP + 1.1CM + 1.1CVA + 0.33SX - 1.1SY
ELF_DIN_-30SX+100SY	1.1PP + 1.1CM + 1.1CVA - 0.33SX + 1.1SY
ELF_DIN_-30SX-100SY	1.1PP + 1.1CM + 1.1CVA - 0.33SX - 1.1SY

3.3.5.8 Características de los materiales

En el análisis y diseño de la estructura, se consideraron las propiedades mecánicas de los materiales que se presentan en la **Tabla 16** y **Tabla 17**.

Tabla 16. Propiedades del concreto y acero de refuerzo.

Propiedades del concreto		Propiedades del Acero R-42	
$F'_c = 24.52 \text{ MPa}$			
Peso volumétrico	$\gamma = 23.536 \text{ kN/m}^3$	Peso volumétrico	$\gamma = 76.9822 \text{ kN/m}^3$
Módulo de elasticidad	$E = 21,707.94 \text{ MPa}$	Resistencia a la tracción	$f_u = 617.82 \text{ MPa}$
Relación de Poisson	$\nu = 0.2$	Esfuerzo de fluencia	$f_y = 411.88 \text{ MPa}$
		Módulo de elasticidad	$E = 196,133 \text{ MPa}$
		Coficiente de expansión térmica	$\alpha = 0.000099$

Tabla 17. Propiedades de la mampostería.

Propiedades de la mampostería	
Resistencia de diseño a compresión de las piezas	$f'_p = 5.884 \text{ MPa}$
Resistencia de diseño a compresión del mortero	$f'_j = 12.2583 \text{ MPa}$
Resistencia de diseño a compresión de la mampostería	$f'_m = 3.9227 \text{ MPa}$
Resistencia a compresión diagonal	$\nu'_m = 0.19133 \text{ MPa}$
Módulo de elasticidad	$E_m = 3138.13 \text{ MPa}$

Relación de Poisson	$\nu = 0.25$
Coefficiente de expansión térmica	$\alpha = 0.0000099$

Los materiales deberán cumplir con la calidad y las propiedades mecánicas mínimas indicadas en las normas y reglamentos para materiales correspondientes, las cuales se indican en el apartado de Bibliografías de este documento [43-51].

3.3.5.9 Descripción de modelo de análisis

El análisis de la estructura se realizó mediante un modelo numérico empleando un software comercial (ETABS). A partir de dicho modelo se obtuvieron los elementos mecánicos en los miembros que fueron utilizados para su diseño (**Figura 43**).

Las cargas gravitacionales (carga muerta y carga viva) se consideraron como cargas uniformemente repartidas sobre las losas de cada nivel y el peso propio de la estructura se determinó mediante el propio programa de análisis, para lo que se requirió definir el peso volumétrico de los materiales y las secciones transversales de cada elemento.

Para el análisis ante cargas factorizadas, se consideró una inercia reducida para losas del 25% y para dalas del 50% de su inercia bruta, mientras que para los castillos la reducción fue del 70%. En el caso de los muros de mampostería, se consideró un factor de reducción de rigidez a cortante igual a 0.5 para los muros del primer y segundo nivel, por ser una estructura de cuatro pisos.

Para el análisis sísmico, los sistemas de piso se consideraron como diafragmas rígidos y se realizó un análisis dinámico modal espectral elástico (véase sección 2.5) tomando en cuenta las recomendaciones establecidas en el Manual de Obras Civiles de la CFE (MOC-CFE, 2015) [31].

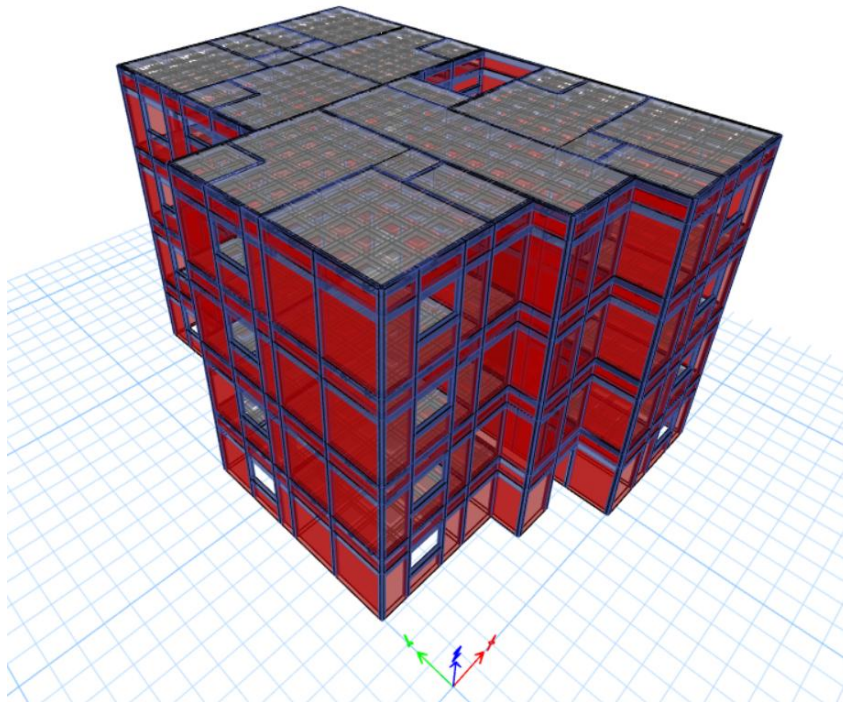


Figura 43. Modelo estructural tridimensional.

En cuanto a la modelación de la estructura, se siguieron las pautas establecidas en la NTC-Mampostería [23], que están descritas en la sección 2.6 de esta investigación. En este sentido, la estructura fue analizada con el método de elementos finitos. Para los muros y losas se usó el elemento finito tipo cascarón (shell), mientras que para las dalas y castillos se utilizó el elemento finito tipo barra (frame). Los elementos (losas, muros, etc.) fueron debidamente discretizados para cumplir con la normativa mexicana (**Figura 44**).

A continuación, se presenta la cantidad de elementos finitos incluidos en el modelo, con tamaño de discretización de 300 mm (shell y frame):

- Número de barras (frame): 31,689
- Número de elementos cascarón (shell): 22,264
- Número de nodos (joints): 24,638
- Número de grados de libertad de rigidez: 118,998
- Número de grados de libertad de masa: 5,328

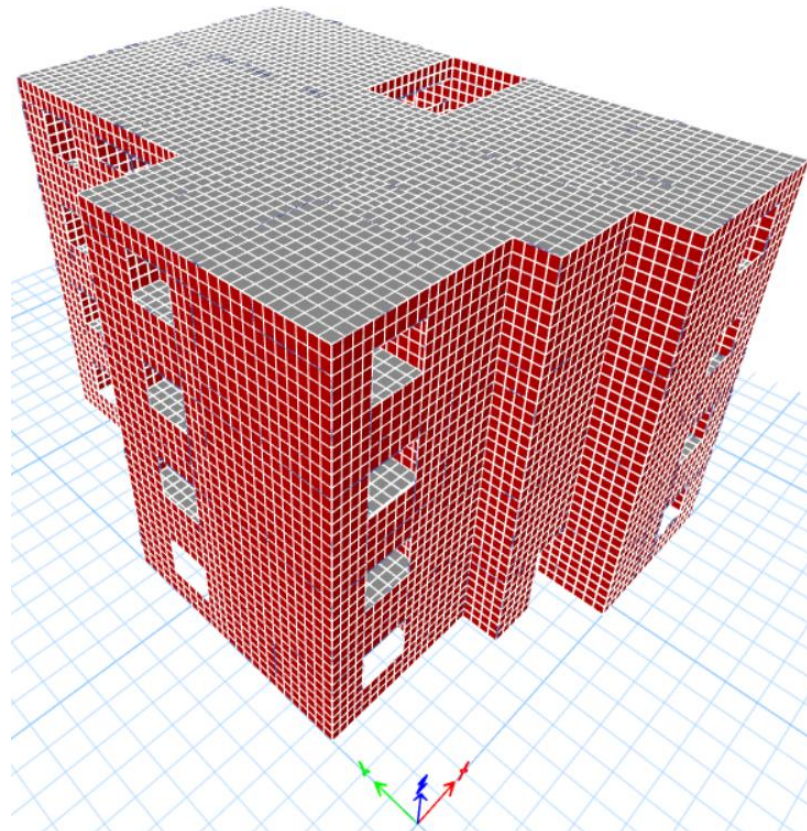


Figura 44. Estructura modelada con elementos finitos (casca y barras) discretizados.

3.3.6 Resultados del análisis dinámico modal espectral

3.3.6.1 Centros de masa y rigidez

La **Tabla 18** muestra los resultados obtenidos del análisis estructural en relación con la localización de los centros de masa (CMS) y los centros de rigidez (CR) en cada nivel de entrepiso de la estructura. Esta información es necesaria para evaluar la respuesta dinámica del edificio en términos de torsión accidental. Una separación significativa entre el centro de masa y el centro de rigidez puede inducir rotaciones excesivas durante la acción de un sismo.

A continuación, se describen las variables contenidas en la **Tabla 18**:

- Nivel: Identifica el nivel o entrepiso del edificio.
- Diafragma: Nombre del diafragma correspondiente al nivel considerado.
- Masa X/Masa Y ($N \cdot s^2/mm$): Masa de cada entrepiso distribuida en las direcciones globales X y Y.

- XCMS/YCMS (mm): Coordenadas del centro de masa en las direcciones X y Y, respectivamente.
- XCR/YCR (mm): Coordenadas del centro de rigidez en X y Y, respectivamente. Este punto representa la ubicación teórica desde la cual, al aplicar una fuerza lateral, se genera un desplazamiento puramente traslacional (sin rotación) del nivel.

Tabla 18. Centro de masa y rigidez.

Nivel (m)	Diafragma	Masa X ($N \cdot s^2/mm$)	Masa Y ($N \cdot s^2/mm$)	XCMS (mm)	YCMS (mm)	XCR (mm)	YCR (mm)
NPT 2.70	D1	95.27	95.27	6,515	8,727	6,751	8,835
NPT 5.40	D2	95.27	95.27	6,515	8,727	6,783	8,818
NPT 8.10	D3	95.27	95.27	6,515	8,727	6,851	8,854
NPT 10.80	D4	92.17	92.17	6,439	8,434	6,929	8,871

Los resultados muestran una distribución razonablemente simétrica de masa y rigidez. Las coordenadas en dirección X del centro de masa (XCMS) y el centro de rigidez (XCR) difieren, en promedio, en un 3.6%; mientras que las coordenadas en dirección Y, en promedio, en un 1.2%. El adecuado alineamiento entre XCMS – YCMS y XCR – YCR en cada nivel produce que los efectos de torsión sean mínimos y mejora el desempeño sísmico de la estructura.

3.3.6.2 Participación de las masas

Los resultados presentados en la **Tabla 19** corresponden al análisis de la participación de las masas en el análisis modal de la estructura. Este resultado es fundamental para evaluar el grado de participación de cada modo de vibración en la respuesta global de una estructura ante cargas dinámicas. A continuación, se describe el significado de cada variable:

- Modo: Número del modo de vibración analizado. Los modos representan las formas en que la estructura vibra naturalmente.
- UX, UY, UZ: Participación de masa modal en las direcciones traslacionales X, Y y Z, respectivamente. Estos valores representan la fracción de la masa total

de la estructura que contribuye a la vibración en cada dirección para un modo específico.

- Sum UX, Sum UY, Sum UZ: Suma acumulativa de la participación de masa en las direcciones X, Y y Z. Muestran cómo la contribución de los modos se acumula hasta alcanzar un porcentaje significativo de la masa total.
- RX, RY, RZ: Participación de masa modal en las direcciones rotacionales (giros alrededor de los ejes X, Y y Z. Estos valores son relevantes para estructuras con comportamientos torsionales.
- Sum RX, Sum RY, Sum RZ: Suma acumulativa de la participación de masa en las direcciones rotacionales.

En la **Tabla 19** se observa que con los primeros cinco modos de vibración se alcanzó más del 90% de participación en todos los grados de libertad de las masas. Considerando los doce modos de vibración se alcanzó una participación del 99.9%.

Tabla 19. Participación de masas modales.

Modo	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	0.885	0.0001	0.885	0.0001	0.005	0.005
2	0.0009	0.8326	0.8858	0.8327	0.0572	0.0622
3	0.0042	0.0577	0.8901	0.8904	0.846	0.9082
4	0.0889	0.00001159	0.9789	0.8904	0.0003	0.9085
5	0.0001	0.0832	0.979	0.9737	0.0054	0.9139
6	0.0004	0.0057	0.9794	0.9793	0.0691	0.983
7	0.0194	0	0.9988	0.9793	0.0001	0.9831
8	0.000006414	0.0165	0.9988	0.9958	0.0016	0.9847
9	0.00004369	0.0011	0.9988	0.997	0.0136	0.9984
10	0	0.0002	0.9988	0.9972	0.000008017	0.9984
11	0.0000008183	0.0014	0.9988	0.9986	0.0002	0.9986
12	0.000001021	0.00001976	0.9988	0.9986	0.000009406	0.9986

3.3.6.3 Períodos y frecuencias modales

Los resultados mostrados en la **Tabla 20** corresponden al análisis de períodos y frecuencias modales, parámetros fundamentales para caracterizar el comportamiento dinámico de una estructura. Estos valores describen cómo la estructura vibra naturalmente ante excitaciones externas, como sismos. A continuación, se detalla el significado de cada variable incluida en dicha Tabla:

- Modo: Número del modo de vibración analizado.
- Período (segundos): Tiempo que tarda la estructura en completar un ciclo de vibración para cada modo.
- Frecuencia en Hz (Ciclo/seg): Número de ciclos de vibración por segundo. Relacionado inversamente con el periodo (Frecuencia = 1/Período).
- Frecuencia circular (radianes/segundo): Frecuencia angular, calculada como $2\pi \times$ Frecuencia.

Tabla 20. Períodos y frecuencias modales.

Modo	Período (seg ²)	Frecuencia (Ciclo/seg)	Frec Circular (rad/seg)
1	0.248	4.04	25.383
2	0.207	4.839	30.4017
3	0.184	5.441	34.1868
4	0.076	13.074	82.1447
5	0.063	15.757	99.0029
6	0.056	17.903	112.4903
7	0.049	20.492	128.7557
8	0.041	24.362	153.0711
9	0.038	26.579	167.0003
10	0.037	26.861	168.7705
11	0.037	27.29	171.4685
12	0.036	27.475	172.629

Se observa que el primer modo de vibración presenta un período de 0.248 segundos, el cual corresponde al modo fundamental de la estructura. Es importante recordar que, a mayor período, la estructura es más flexible; en cambio, si el período es menor, la estructura es más rígida. A medida que se incrementa el número de modos, el período disminuye progresivamente, alcanzando valores de alrededor de 0.036 segundos en el modo 12.

3.3.6.4 Reacciones en la base

La **Tabla 21** incluye los resultados de las reacciones en la base obtenidas a través del análisis modal de la estructura. Este resultado es fundamental para evaluar las fuerzas y momentos que una estructura transfiere a su cimentación bajo condiciones dinámicas y son críticos para el diseño estructural y la verificación de la estabilidad global del sistema. A continuación, se describe el significado de cada variable:

- Combinación de salida: Nombre de la combinación considerada (por ejemplo, ELF_DIN_100SX + 30SY).
- Tipo del paso: Indica si los valores reportados son los máximos (Max) o mínimos (Min) de la combinación.
- Fuerzas (N) FX, FY, FZ: Fuerzas en las direcciones X (horizontal), Y (perpendicular a X), y Z (vertical).
- Momentos (N – mm) MX, MY, MZ: Momentos total alrededor de los ejes X, Y, Z, respectivamente.

Las combinaciones $ELF_DIN_100SX \pm 30SY$ y $ELF_DIN_30SX \pm 100SY$ consideran distintos escenarios de carga sísmica en X y Y, permitiendo capturar efectos direccionales. Los valores de FZ se mantienen constantes en la mayoría de los casos (5,835.01 kN), ya que provienen principalmente del peso propio y no se ven afectados significativamente por las cargas laterales. Las fuerzas horizontales FX y FY, así como los momentos MX, MY y MZ, varían dependiendo del tipo y dirección de la carga sísmica aplicada.

Tabla 21. Reacciones en la base del análisis dinámico modal espectral lineal.

Combinación de salida	Tipo de caso	Tipo de paso	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kN-mm)	MY (kN-mm)	MZ (kN-mm)
LF_GRAVITACIONALES	Combination		0.00	0.00	7,707.09	65,926,332.29	-49,985,951.24	0.02
ELF_DIN_100SX+30SY	Combination	Max	1,174.84	378.78	5,835.02	52,763,383.43	-29,008,921.86	11,615,293.54
ELF_DIN_100SX+30SY	Combination	Min	-1,174.84	-378.78	5,835.02	47,032,065.67	-46,777,690.00	-11,615,293.50
ELF_DIN_100SX-30SY	Combination	Max	1,174.84	378.78	5,835.02	52,763,383.43	-29,008,921.86	11,615,293.54
ELF_DIN_100SX-30SY	Combination	Min	-1,174.84	-378.78	5,835.02	47,032,065.67	-46,777,690.00	-11,615,293.50
ELF_DIN_-100SX+30SY	Combination	Max	1,174.84	378.78	5,835.02	52,763,383.43	-29,008,921.86	11,615,293.54
ELF_DIN_-100SX+30SY	Combination	Min	-1,174.84	-378.78	5,835.02	47,032,065.67	-46,777,690.00	-11,615,293.50
ELF_DIN_-100SX-30SY	Combination	Max	1,174.84	378.78	5,835.02	52,763,383.43	-29,008,921.86	11,615,293.54
ELF_DIN_-100SX-30SY	Combination	Min	-1,174.84	-378.78	5,835.02	47,032,065.67	-46,777,690.00	-11,615,293.50
ELF_DIN_30SX+100SY	Combination	Max	380.17	1,170.20	5,835.02	58,748,746.89	-35,025,146.39	9,623,535.80
ELF_DIN_30SX+100SY	Combination	Min	-380.17	-1,170.20	5,835.02	41,046,702.22	-40,761,465.47	-9,623,535.76
ELF_DIN_30SX-100SY	Combination	Max	380.17	1,170.20	5,835.02	58,748,746.89	-35,025,146.39	9,623,535.80
ELF_DIN_30SX-100SY	Combination	Min	-380.17	-1,170.20	5,835.02	41,046,702.22	-40,761,465.47	-9,623,535.76
ELF_DIN_-30SX-100SY	Combination	Max	380.17	1,170.20	5,835.02	58,748,746.89	-35,025,146.39	9,623,535.80
ELF_DIN_-30SX-100SY	Combination	Min	-380.17	-1,170.20	5,835.02	41,046,702.22	-40,761,465.47	-9,623,535.76
ELF_DIN_-30SX+100SY	Combination	Max	380.17	1,170.20	5,835.02	58,748,746.89	-35,025,146.39	9,623,535.80
ELF_DIN_-30SX+100SY	Combination	Min	-380.17	-1,170.20	5,835.02	41,046,702.22	-40,761,465.47	-9,623,535.76

3.3.6.5 Revisión del cortante basal

Se revisó que el cortante basal cumpla con las especificaciones establecidas en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (MOC-CFE, 2015) [31], ver **Tabla 22**:

Si con el método dinámico aplicado se encuentra que, en la dirección considerada, la relación $\frac{V_0}{W_T}$ es menor que $0.7 \frac{a(T_e, \beta)}{Q'(T_e, Q) R(T_e, R_0) \rho}$ ó $0.7 \frac{a(T_e, \beta) A_{cd}(T_e)}{Q'(T_e, Q) R(T_e, R_0) \rho}$ para estructuras con comportamiento histerético degradante ubicadas en terrenos Tipo II y III (suelos blandos), según sea el caso, se incrementarán todas las fuerzas de diseño y los desplazamientos laterales correspondientes en una proporción tal que $\frac{V_0}{W_T}$ iguale a este valor. Esta condición implica que siempre debe hacerse el análisis estático independientemente de las restricciones indicadas para el uso de este método. La fuerza cortante basal de diseño no puede ser menor que 70% de la que suministraría dicho análisis tomando en cuenta el periodo fundamental de la estructura. Sin embargo, en ningún caso el cortante será menor que $\frac{a(0, \beta)}{Q'(0, Q) R(0, R_0) \rho}$ ó $\frac{a(0, \beta) A_{cd}(0)}{Q'(0, Q) R(0, R_0) \rho} W_T$, donde $T_e = 0$. Siendo, W_T el peso total de la construcción, incluyendo cargas muertas y vivas.

Tabla 22. Cortante basal del análisis dinámico modal espectral lineal.

Combinación de salida	Tipo de caso	Tipo de paso	FX kN	FY kN	FZ kN
ELF_SX_DIN	LinRespSpec	Max	1,059.73	27.69	0.00
ELF_SY_DIN	LinRespSpec	Max	27.69	1,055.51	0.00
PP+CM+CVA	Combination		0.00	0.00	5,304.56

La primera condición nos dice que la relación $\frac{V_0}{W_T} \geq 0.7 \frac{a(T_e, \beta)}{Q'(T_e, Q) R(T_e, R_0) \rho}$ para ambas direcciones del análisis debe cumplirse. A continuación, se muestran las operaciones correspondientes:

Dirección en X:

$$\frac{1,059.73 \text{ kN}}{5,304.56 \text{ kN}} \geq 0.7 \cdot 0.2339$$

$$0.20 \geq 0.16373 \text{ OK}$$

Dirección en Y:

$$\frac{1,055.51 \text{ kN}}{5,304.56 \text{ kN}} \geq 0.7 \cdot 0.2395$$

$$0.19 \geq 0.16765 \text{ OK}$$

Y la segunda condición nos dice que en ningún caso el cortante será menor que $\frac{\alpha\langle 0, \beta \rangle}{Q'\langle 0, Q \rangle R\langle 0, R_o \rangle \rho}$ ó $\frac{\alpha\langle 0, \beta \rangle A_{cd}\langle 0 \rangle}{Q'\langle 0, Q \rangle R\langle 0, R_o \rangle \rho} W_T$, donde $T_e = 0$. Siendo, W_T el peso total de la construcción, incluyendo cargas muertas y vivas.

$$VX_{din} \geq \frac{\alpha\langle 0, \beta \rangle A_{cd}\langle 0 \rangle}{Q'\langle 0, Q \rangle R\langle 0, R_o \rangle \rho} W_T$$

$$1,059.73 \text{ kN} \geq 0.0477 \cdot 5,304.56 \text{ kN}$$

$$1,059.73 \text{ kN} \geq 253.03 \text{ kN OK}$$

$$VY_{din} \geq \frac{\alpha\langle 0, \beta \rangle A_{cd}\langle 0 \rangle}{Q'\langle 0, Q \rangle R\langle 0, R_o \rangle \rho} W_T$$

$$1,055.51 \text{ kN} \geq 0.0477 \cdot 5,304.56 \text{ kN}$$

$$1,055.51 \text{ kN} \geq 253.03 \text{ kN OK}$$

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento ante cargas dinámicas y estáticas de la estructura prototipo de mampostería se evaluó por medio de los parámetros críticos como las fuerzas cortantes de entrepisos, la resistencia individual al cortante de los muros y los desplazamientos relativos en cada nivel. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

4.1 Cortante de entrepiso

Se verificó que la resistencia a cortante de cada entrepiso (V_{Ri}) calculada para cada una de las dos direcciones ortogonales de análisis, sea mayor que el 80 por ciento de la fuerza cortante de diseño en el i -ésimo entrepiso (V_{ui}), de acuerdo con la ecuación 50.

$$V_{Ri} \geq 0.8V_{ui} \quad i = 1, \dots, n \text{ entrepisos} \quad (50)$$

La fuerza cortante que actúa en un entrepiso se obtuvo como la suma de las fuerzas sísmicas F_i , arriba de dicho entrepiso, calculadas de acuerdo con el método estático indicado en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (MOC-CFE, 2015) [31], multiplicadas por el factor de carga correspondiente. Para efectos de la revisión de este requisito, la resistencia a corte de entrepiso (V_{Ri}) en cada dirección de análisis, se evaluó con la ecuación 51:

$$V_{Ri} = F_R(0.5v'_m + 0.3\sigma_i + \eta(p_h f_{yh})_e) \Sigma A_T \quad \sigma_i \leq 3.33v'_m \quad (51)$$

donde la sumatoria se refiere al área de los muros en la dirección de análisis; σ_i es el esfuerzo normal promedio en los muros del entrepiso i , calculado como el peso total desde azotea hasta el entrepiso considerado, dividido entre la suma de las áreas transversales de todos los muros. De acuerdo con el tipo de mampostería considerada en este proyecto, se utilizó un factor $\eta(p_h f_y)_e$ igual a 0.92 kg/cm², es decir que para cumplir con este requisito fue necesario incluir refuerzo horizontal en los muros de los cuatros niveles. La revisión del cortante de entrepiso para cada dirección de análisis se muestra en la **Tabla 23** y **Tabla 24**.

Tabla 23. Revisión de cortante de entrepiso en dirección X.

Nivel	$\sum A_T$ (m ²)	σ_i (kg/cm ²)	$\sum A_{TX}$ (m ²)	V_{RiX} (Ton)	V_{uiX} (Ton)	$0.8V_{uiX}$ (Ton)	CUMPLE
Piso 1	13.79	3.46	5.70	117.95	136.29	109.03	OK
Piso 2	13.79	2.50	5.70	104.24	123.13	98.50	OK
Piso 3	13.79	1.54	5.70	90.00	96.68	77.34	OK
Piso 4	13.79	0.58	5.70	58.43	57.00	45.60	OK

Tabla 24. Revisión de cortante de entrepiso en dirección Y.

Nivel	$\sum A_T$ (m ²)	σ_i (kg/cm ²)	$\sum A_{TY}$ (m ²)	V_{RiY} (Ton)	V_{uiY} (Ton)	$0.8V_{uiY}$ (Ton)	CUMPLE
Piso 1	13.79	3.46	8.09	132.42	136.29	109.03	OK
Piso 2	13.79	2.50	8.09	136.30	123.13	98.50	OK
Piso 3	13.79	1.54	8.09	117.94	96.68	77.34	OK
Piso 4	13.79	0.58	8.09	88.55	57.00	45.60	OK

4.2 Revisión por cortante para cada muro

Se revisó que cada muro de mampostería que compone a la estructura tuviera la resistencia a compresión, a flexión y a cortante requerida de acuerdo con las solicitudes de las cargas. La revisión de la resistencia cortante fue la condición crítica en el diseño de los muros, por lo que en este documento solo se presentan los resultados asociados a dicha revisión. Las fuerzas internas se obtuvieron a partir del análisis del modelo y se compararon con las resistencias de cada muro calculadas con las especificaciones de la NTC-Mampostería [23].

4.2.1 Revisión de la resistencia a cortante de los muros sin refuerzo

Como primera etapa en el diseño de los muros, se revisó que éstos tuvieran una resistencia a cortante adecuada, sin considerar la incorporación de algún tipo de refuerzo. Es decir, se revisó si la mampostería confinada sin refuerzo podía resistir, por si sola, las cargas sísmicas de diseño.

En la **Figura 45**, **Figura 46**, **Figura 47** y **Figura 48** se presenta la localización de cada muro en cada planta del edificio, con propósito de dar una mejor referencia para su revisión. En las **Tabla 25**, **Tabla 26**, **Tabla 27** y **Tabla 28** se revisó que cada muro de mampostería que compone a la estructura tuviera la resistencia a cortante requerida de

acuerdo con las solicitudes de las cargas. Se observa que, en los primeros tres niveles, los muros ubicados en la dirección X son los que, en su mayoría, no cumplen con la resistencia a cortante. Esto se debe a la escasa distribución de muros en dicha dirección (**Figura 45**). Además, como es bien sabido, los primeros niveles concentran la mayor demanda para la resistencia a cortante durante la ocurrencia de un sismo, algunos muros en dirección Y tampoco satisfacen la resistencia a cortante exigida. El trabajo a cortante de los muros sin refuerzo se mantiene entre 105% y 170%, esto nos indica que la demanda es mayor y se requiere de un refuerzo.

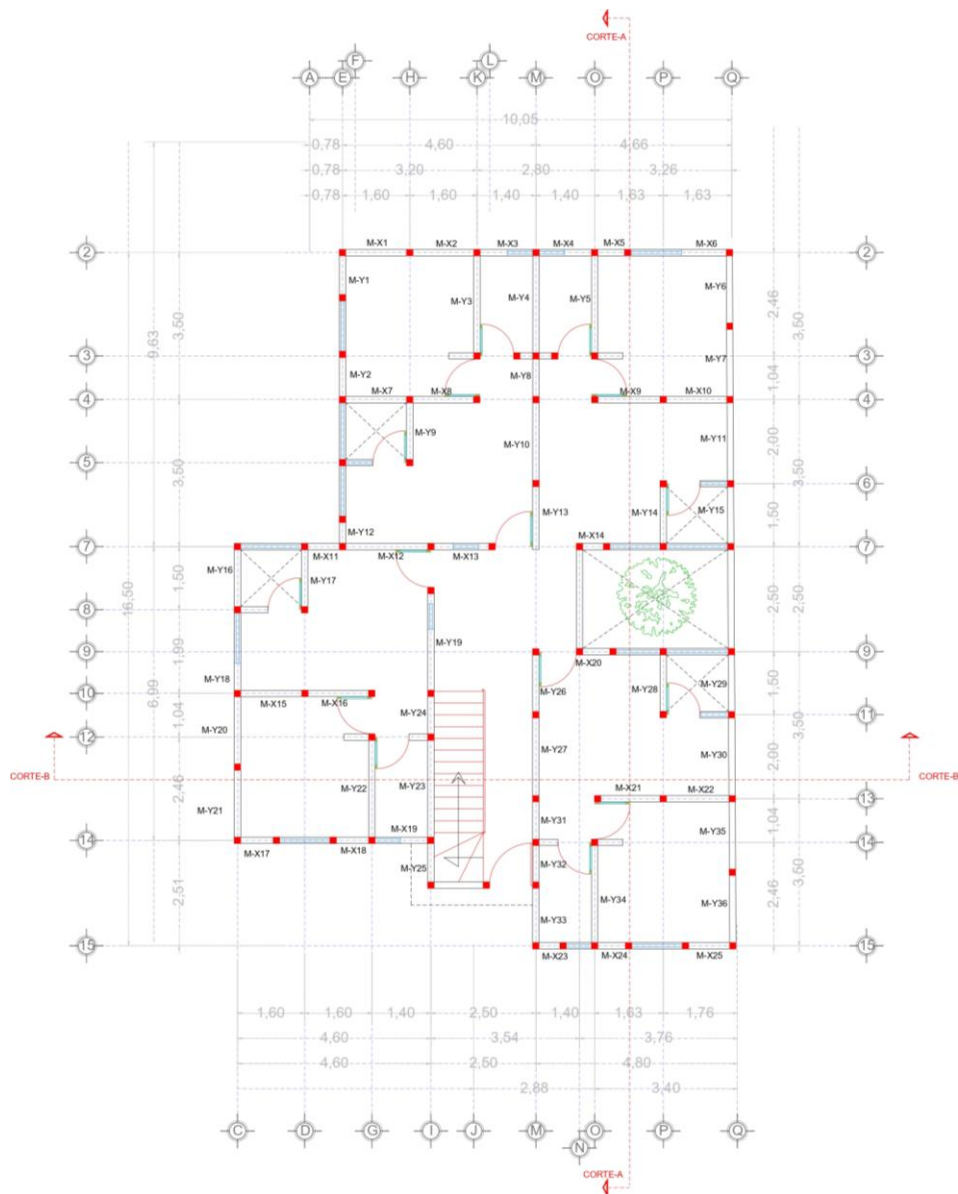


Figura 45. Localización de muros de mampostería en primer nivel.

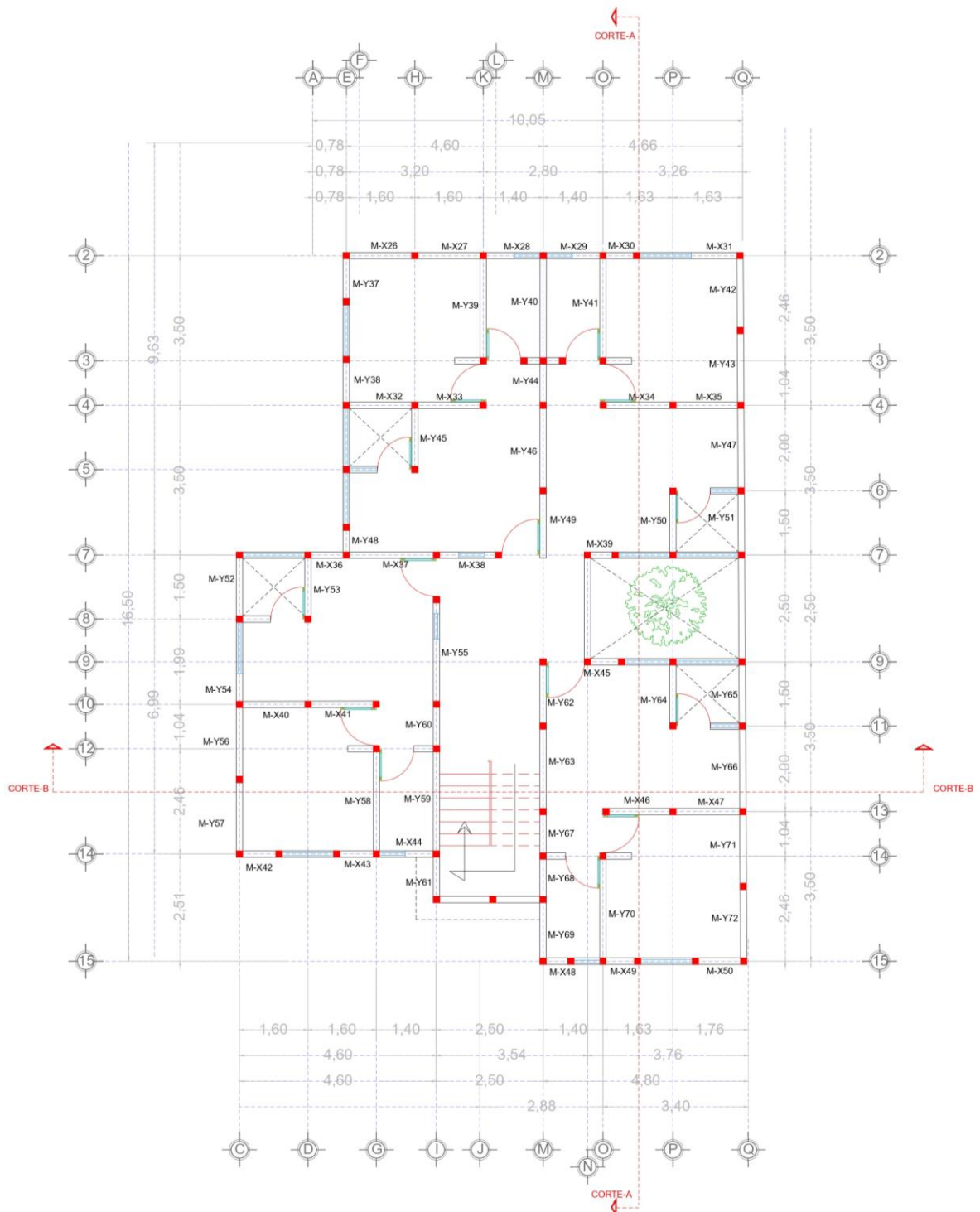


Figura 46. Localización de muros de mampostería en segundo nivel.

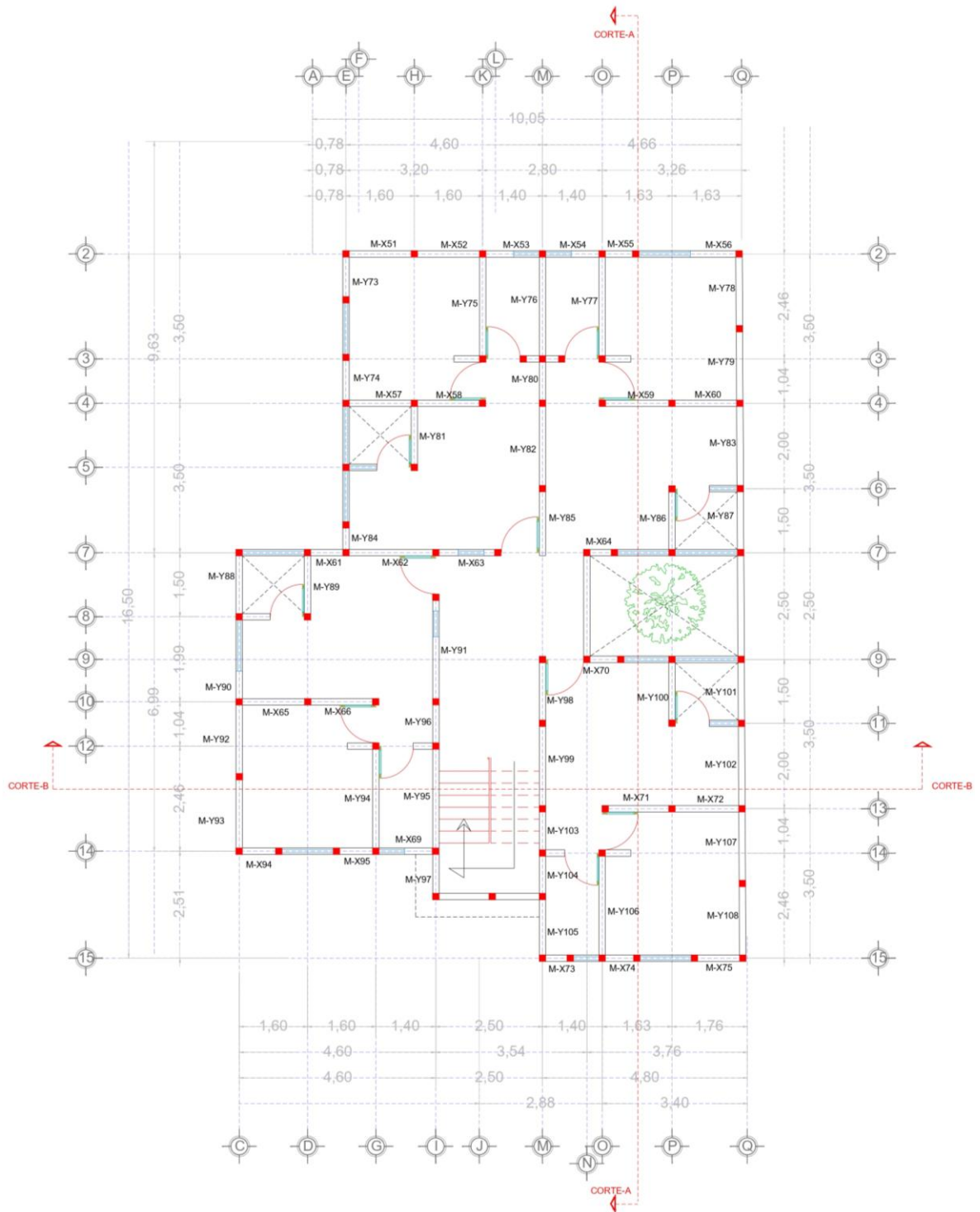


Figura 47. Localización de muros de mampostería en tercer nivel.

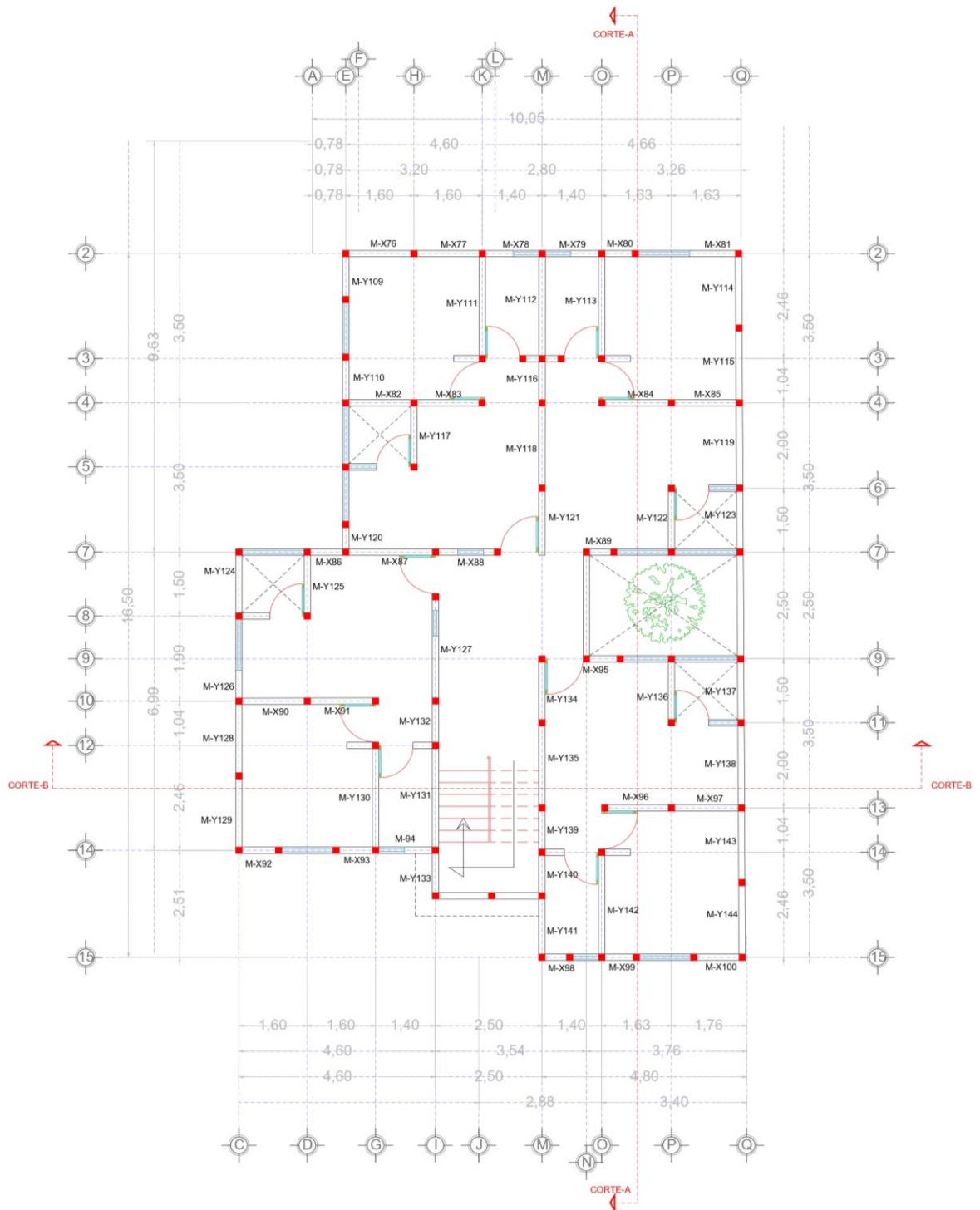


Figura 48. Localización de muros de mampostería en cuarto nivel.

Tabla 25. Resistencia a cargas laterales de muros sin refuerzo nivel 1 dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTOS MECÁNICOS ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	P (N)	V _R (N)	Estado	Trabajo Cortante
MX-1	1,600	38,964.53	94,439.42	33,012.40	NO CUMPLE	118%
MX-2	1,600	36,647.22	65,463.15	26,927.39	NO CUMPLE	136%
MX-3	1,400	30,259.27	44,728.58	20,925.61	NO CUMPLE	145%
MX-4	1,400	29,092.28	49,445.67	21,916.20	NO CUMPLE	133%
MX-5	1,030	17,246.45	39,786.33	16,839.83	NO CUMPLE	102%
MX-6	1,030	19,759.01	53,738.04	19,769.69	CUMPLE	100%
MX-7	1,600	37,191.20	85,809.38	31,200.10	NO CUMPLE	119%
MX-8	1,600	38,235.90	88,019.70	31,664.26	NO CUMPLE	121%
MX-9	1,630	39,527.43	86,538.02	31,600.24	NO CUMPLE	125%
MX-10	1,630	37,533.64	79,637.67	30,151.16	NO CUMPLE	124%
MX-11	900	22,412.98	43,038.70	16,451.95	NO CUMPLE	136%
MX-12	2,095	48,696.44	83,131.58	34,715.36	NO CUMPLE	140%
MX-13	1,460	38,532.45	100,202.49	33,069.39	NO CUMPLE	117%
MX-14	650	7,786.87	31,503.54	11,970.17	CUMPLE	65%
MX-15	1,600	36,995.65	81,072.58	30,205.37	NO CUMPLE	122%
MX-16	1,600	37,935.62	97,941.18	33,747.77	NO CUMPLE	112%
MX-17	1,000	18,380.10	44,108.31	17,500.32	NO CUMPLE	105%
MX-18	1,000	19,719.10	44,010.24	17,479.73	NO CUMPLE	113%
MX-19	1,400	31,338.49	48,432.06	21,703.34	NO CUMPLE	144%
MX-20	650	7,948.77	35,071.29	12,719.40	CUMPLE	62%
MX-21	1,600	40,504.47	103,044.85	34,819.54	NO CUMPLE	116%
MX-22	1,600	37,649.07	76,927.80	29,334.96	NO CUMPLE	128%
MX-23	1,400	31,829.51	60,404.69	24,217.60	NO CUMPLE	131%
MX-24	1,030	18,728.04	36,141.00	16,074.32	NO CUMPLE	117%
MX-25	1,030	21,673.07	49,167.56	18,809.89	NO CUMPLE	115%
	∑V_{ux}=	744,587.56	∑V_{Rx}=	616,826.00		
MY-1	1,150	13,876.59	40,953.12	18,073.37	CUMPLE	77%
MY-2	1,150	13,092.36	38,621.98	17,583.83	CUMPLE	74%
MY-3	2,460	37,973.67	92,744.54	39,740.80	CUMPLE	96%
MY-4	2,460	40,520.35	108,237.66	42,994.35	CUMPLE	94%
MY-5	2,460	35,059.82	96,483.62	40,526.00	CUMPLE	87%
MY-6	1,750	29,447.77	89,310.26	33,170.92	CUMPLE	89%
MY-7	1,750	27,944.51	67,421.44	28,574.26	CUMPLE	98%
MY-8	1,040	17,055.22	38,560.60	16,664.81	NO CUMPLE	102%
MY-9	1,500	19,542.87	82,012.94	29,579.08	CUMPLE	66%
MY-10	2,000	32,672.39	93,333.04	36,075.09	CUMPLE	91%
MY-11	2,000	30,075.50	67,700.64	30,692.29	CUMPLE	98%
MY-12	800	6,794.43	23,095.23	11,440.06	CUMPLE	59%
MY-13	1,500	28,727.38	93,496.91	31,990.72	CUMPLE	90%

MY-14	1,500	16,592.93	65,925.63	26,200.75	CUMPLE	63%
MY-15	1,500	23,118.76	43,845.10	21,563.84	NO CUMPLE	107%
MY-16	1,500	25,150.50	65,500.03	26,111.37	CUMPLE	96%
MY-17	1,500	20,878.14	72,377.33	27,555.61	CUMPLE	76%
MY-18	800	11,572.23	29,281.16	12,739.11	CUMPLE	91%
MY-19	2,450	47,667.92	145,589.88	50,755.94	CUMPLE	94%
MY-20	1,040	31,107.16	54,519.63	20,016.20	NO CUMPLE	155%
MY-21	2,460	36,051.08	84,063.41	37,917.76	CUMPLE	95%
MY-22	2,460	42,659.67	87,094.45	38,554.28	NO CUMPLE	111%
MY-23	2,460	46,818.77	91,858.81	39,554.79	NO CUMPLE	118%
MY-24	1,040	18,809.92	40,333.83	17,037.19	NO CUMPLE	110%
MY-25	1,150	21,363.96	49,949.15	19,962.54	NO CUMPLE	107%
MY-26	1,500	27,583.83	104,707.37	34,344.92	CUMPLE	80%
MY-27	2,000	32,224.33	86,905.37	34,725.29	CUMPLE	93%
MY-28	1,500	16,562.34	65,791.28	26,172.54	CUMPLE	63%
MY-29	1,500	22,883.70	43,443.52	21,479.51	NO CUMPLE	107%
MY-30	2,000	30,800.01	66,633.18	30,468.13	NO CUMPLE	101%
MY-31	1,040	17,476.12	32,792.43	15,453.49	NO CUMPLE	113%
MY-32	1,150	16,951.66	36,727.73	17,186.04	CUMPLE	99%
MY-33	1,310	26,756.44	70,617.52	25,620.91	NO CUMPLE	104%
MY-34	2,460	35,375.89	93,872.40	39,977.65	CUMPLE	88%
MY-35	1,750	27,121.15	66,169.62	28,311.38	CUMPLE	96%
MY-36	1,750	29,025.70	87,300.68	32,748.90	CUMPLE	89%
	$\sum V_{uy} =$	957,335.08	$\sum VR_y =$	1,021,563.71		

Tabla 26. Resistencia a cargas laterales de muros sin refuerzo nivel 2 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTOS MECÁNICOS ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	P (N)	V _R (N)	Estado	Trabajo Cortante
MX-26	1,600	34,507.71	68,654.82	27,597.64	NO CUMPLE	125%
MX-27	1,600	36,633.88	50,189.51	23,719.92	NO CUMPLE	154%
MX-28	1,400	30,835.22	36,627.80	19,224.45	NO CUMPLE	160%
MX-29	1,400	29,231.83	40,650.29	20,069.17	NO CUMPLE	146%
MX-30	1,030	14,078.32	27,204.31	14,197.61	CUMPLE	99%
MX-31	1,030	13,656.83	40,984.21	17,091.39	CUMPLE	80%
MX-32	1,600	33,863.90	60,716.15	25,930.52	NO CUMPLE	131%
MX-33	1,600	34,983.62	51,409.55	23,976.13	NO CUMPLE	146%
MX-34	1,630	34,754.74	48,011.16	23,509.60	NO CUMPLE	148%
MX-35	1,630	35,441.89	55,558.94	25,094.63	NO CUMPLE	141%
MX-36	900	20,577.37	34,856.82	14,733.75	NO CUMPLE	140%
MX-37	2,095	49,893.93	60,330.85	29,927.20	NO CUMPLE	167%
MX-38	1,460	32,095.76	61,305.53	24,901.03	NO CUMPLE	129%
MX-39	650	2,744.49	18,486.89	9,236.67	CUMPLE	30%
MX-40	1,600	34,023.65	56,552.55	25,056.16	NO CUMPLE	136%
MX-41	1,600	31,106.96	56,127.13	24,966.82	NO CUMPLE	125%
MX-42	1,000	12,833.17	34,529.97	15,488.87	CUMPLE	83%
MX-43	1,000	16,147.22	28,750.62	14,275.21	NO CUMPLE	113%
MX-44	1,400	30,713.62	31,561.69	18,160.57	NO CUMPLE	169%
MX-45	650	2,516.58	21,437.61	9,856.32	CUMPLE	26%
MX-46	1,600	32,574.03	59,070.40	25,584.91	NO CUMPLE	127%
MX-47	1,600	34,503.98	52,139.75	24,129.47	NO CUMPLE	143%
MX-48	1,400	27,502.72	36,542.78	19,206.59	NO CUMPLE	143%
MX-49	1,030	14,911.39	22,721.30	13,256.18	NO CUMPLE	112%
MX-50	1,030	14,720.65	38,055.75	16,476.41	CUMPLE	89%
	∑V_{ux}=	654,853.46	∑V_{Rx}=	505,667.23		
MY-37	1,150	10,630.59	32,564.91	16,311.85	CUMPLE	65%
MY-38	1,150	10,313.35	29,174.07	15,599.77	CUMPLE	66%
MY-39	2,460	34,917.62	70,552.70	35,080.51	CUMPLE	100%
MY-40	2,460	37,675.74	78,861.28	36,825.31	NO CUMPLE	102%
MY-41	2,460	31,967.10	72,790.97	35,550.55	CUMPLE	90%
MY-42	1,750	25,015.37	63,851.92	27,824.67	CUMPLE	90%
MY-43	1,750	28,280.49	51,800.05	25,293.77	NO CUMPLE	112%
MY-44	1,040	17,951.25	28,834.17	14,622.26	NO CUMPLE	123%
MY-45	1,500	16,008.36	56,490.17	24,219.30	CUMPLE	66%
MY-46	2,000	35,081.98	65,150.81	30,156.83	NO CUMPLE	116%
MY-47	2,000	30,831.79	51,929.89	27,380.43	NO CUMPLE	113%
MY-48	800	3,915.40	19,444.41	10,673.39	CUMPLE	37%

MY-49	1,500	24,123.16	63,877.52	25,770.65	CUMPLE	94%
MY-50	1,500	13,045.38	43,181.68	21,424.52	CUMPLE	61%
MY-51	1,500	23,773.16	34,415.72	19,583.67	NO CUMPLE	121%
MY-52	1,500	18,705.97	50,330.82	22,925.84	CUMPLE	82%
MY-53	1,500	17,302.45	45,098.68	21,827.09	CUMPLE	79%
MY-54	800	9,240.31	20,036.63	10,797.76	CUMPLE	86%
MY-55	2,450	42,264.86	93,044.43	39,721.40	NO CUMPLE	106%
MY-56	1,040	29,924.87	41,631.54	17,309.71	NO CUMPLE	173%
MY-57	2,460	33,275.21	60,164.72	32,899.03	NO CUMPLE	101%
MY-58	2,460	39,281.97	64,583.01	33,826.87	NO CUMPLE	116%
MY-59	2,460	47,340.58	71,794.61	35,341.31	NO CUMPLE	134%
MY-60	1,040	19,709.29	29,933.99	14,853.22	NO CUMPLE	133%
MY-61	1,150	21,182.64	35,337.15	16,894.02	NO CUMPLE	125%
MY-62	1,500	20,923.25	70,450.71	27,151.02	CUMPLE	77%
MY-63	2,000	34,583.90	65,877.48	30,309.43	NO CUMPLE	114%
MY-64	1,500	12,913.97	43,015.16	21,389.55	CUMPLE	60%
MY-65	1,500	22,686.88	34,113.48	19,520.20	NO CUMPLE	116%
MY-66	2,000	32,110.08	51,164.29	27,219.66	NO CUMPLE	118%
MY-67	1,040	17,677.16	25,966.42	14,020.03	NO CUMPLE	126%
MY-68	1,150	16,182.13	27,571.67	15,263.26	NO CUMPLE	106%
MY-69	1,310	27,069.86	48,550.42	20,986.82	NO CUMPLE	129%
MY-70	2,460	31,754.20	70,710.88	35,113.73	CUMPLE	90%
MY-71	1,750	26,882.75	50,803.99	25,084.60	NO CUMPLE	107%
MY-72	1,750	26,066.74	62,172.93	27,472.08	CUMPLE	95%
	$\sum V_{uy} =$	890,609.81	$\sum V_{Ry} =$	876,244.09		

Tabla 27. Resistencia a cargas laterales de muros sin refuerzo nivel 3 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTOS MECÁNICOS ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	P (N)	V _R (N)	Estado	Trabajo Cortante
MX-51	1,600	27,482.23	42,012.92	22,002.84	NO CUMPLE	125%
MX-52	1,600	33,407.01	34,247.83	20,372.17	NO CUMPLE	164%
MX-53	1,400	29,620.47	26,526.77	17,103.23	NO CUMPLE	173%
MX-54	1,400	26,720.74	29,142.10	17,652.45	NO CUMPLE	151%
MX-55	1,030	10,085.15	16,526.25	11,955.22	CUMPLE	84%
MX-56	1,030	7,322.03	25,505.50	13,840.86	CUMPLE	53%
MX-57	1,600	28,537.03	36,070.79	20,754.99	NO CUMPLE	137%
MX-58	1,600	28,404.15	33,090.94	20,129.22	NO CUMPLE	141%
MX-59	1,630	27,969.52	31,144.42	19,967.58	NO CUMPLE	140%
MX-60	1,630	32,330.63	33,064.56	20,370.81	NO CUMPLE	159%
MX-61	900	16,872.33	23,891.63	12,431.06	NO CUMPLE	136%
MX-62	2,095	49,851.86	41,797.18	26,076.32	NO CUMPLE	191%
MX-63	1,460	25,955.04	30,918.87	18,519.83	NO CUMPLE	140%
MX-64	650	1,583.87	12,818.85	8,046.38	CUMPLE	20%
MX-65	1,600	27,808.10	33,566.17	20,229.02	NO CUMPLE	137%
MX-66	1,600	20,321.71	27,630.80	18,982.59	NO CUMPLE	107%
MX-67	1,000	7,761.17	21,442.32	12,740.47	CUMPLE	61%
MX-68	1,000	11,572.52	17,043.75	11,816.77	CUMPLE	98%
MX-69	1,400	30,656.93	26,489.31	17,095.36	NO CUMPLE	179%
MX-70	650	2,217.77	12,814.73	8,045.52	CUMPLE	28%
MX-71	1,600	22,139.86	26,482.83	18,741.52	NO CUMPLE	118%
MX-72	1,600	29,131.80	29,672.64	19,411.38	NO CUMPLE	150%
MX-73	1,400	24,837.28	24,542.10	16,686.45	NO CUMPLE	149%
MX-74	1,030	10,201.36	13,051.46	11,225.51	CUMPLE	91%
MX-75	1,030	8,003.49	23,412.28	13,401.28	CUMPLE	60%
	∑V_{ux}=	540,794.08	∑V_{Rx}=	417,598.85		
MY-73	1,150	8,860.99	21,554.31	13,999.62	CUMPLE	63%
MY-74	1,150	7,001.75	19,534.04	13,575.36	CUMPLE	52%
MY-75	2,460	29,145.34	47,609.97	30,262.54	CUMPLE	96%
MY-76	2,460	31,225.42	49,828.13	30,728.35	NO CUMPLE	102%
MY-77	2,460	25,357.42	48,667.61	30,484.64	CUMPLE	83%
MY-78	1,750	19,984.17	38,860.97	22,576.57	CUMPLE	89%
MY-79	1,750	25,269.36	35,586.53	21,888.93	NO CUMPLE	115%
MY-80	1,040	18,872.78	21,755.25	13,135.68	NO CUMPLE	144%
MY-81	1,500	10,684.63	33,504.19	19,392.25	CUMPLE	55%
MY-82	2,000	37,803.23	39,657.57	24,803.25	NO CUMPLE	152%
MY-83	2,000	31,749.59	35,376.97	23,904.32	NO CUMPLE	133%
MY-84	800	852.88	14,191.68	9,570.32	CUMPLE	9%

MY-85	1,500	19,097.84	37,168.15	20,161.68	CUMPLE	95%
MY-86	1,500	8,098.03	28,112.99	18,260.10	CUMPLE	44%
MY-87	1,500	23,367.56	23,908.59	17,377.17	NO CUMPLE	134%
MY-88	1,500	11,773.26	30,309.97	18,721.46	CUMPLE	63%
MY-89	1,500	11,601.94	29,133.27	18,474.36	CUMPLE	63%
MY-90	800	6,714.02	12,377.26	9,189.29	CUMPLE	73%
MY-91	2,450	38,383.09	48,928.08	30,456.96	NO CUMPLE	126%
MY-92	1,040	24,444.23	28,767.78	14,608.32	NO CUMPLE	167%
MY-93	2,460	28,044.54	36,087.36	27,842.79	NO CUMPLE	101%
MY-94	2,460	33,116.54	43,607.68	29,422.06	NO CUMPLE	113%
MY-95	2,460	45,054.06	50,605.50	30,891.60	NO CUMPLE	146%
MY-96	1,040	19,942.88	20,204.92	12,810.11	NO CUMPLE	156%
MY-97	1,150	29,161.13	21,346.21	13,955.92	NO CUMPLE	209%
MY-98	1,500	15,593.83	39,534.00	20,658.51	CUMPLE	75%
MY-99	2,000	36,097.07	44,432.81	25,806.05	NO CUMPLE	140%
MY-100	1,500	8,097.25	28,171.73	18,272.43	CUMPLE	44%
MY-101	1,500	22,143.79	23,803.95	17,355.20	NO CUMPLE	128%
MY-102	2,000	34,851.53	35,019.81	23,829.32	NO CUMPLE	146%
MY-103	1,040	17,017.46	20,855.69	12,946.78	NO CUMPLE	131%
MY-104	1,150	14,581.89	19,531.30	13,574.79	NO CUMPLE	107%
MY-105	1,310	30,351.36	28,307.65	16,735.84	NO CUMPLE	181%
MY-106	2,460	24,113.06	47,196.32	30,175.67	CUMPLE	80%
MY-107	1,750	23,115.72	34,965.87	21,758.60	NO CUMPLE	106%
MY-108	1,750	20,734.77	37,677.02	22,327.94	CUMPLE	93%
	$\sum V_{uy} =$	792,304.42	$\sum V_{Ry} =$	739,934.74		

Tabla 28. Resistencia a cargas laterales de muros sin refuerzo nivel 4 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTOS MECÁNICOS ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	P (N)	V _R (N)	Estado	Trabajo Cortante
MX-76	1,600	12,761.87	16,937.34	16,736.97	CUMPLE	76%
MX-77	1,600	17,354.71	16,475.25	16,639.93	NO CUMPLE	104%
MX-78	1,400	16,347.77	13,579.35	14,384.27	NO CUMPLE	114%
MX-79	1,400	14,781.16	14,268.56	14,529.01	NO CUMPLE	102%
MX-80	1,030	5,068.17	7,196.80	9,996.03	CUMPLE	51%
MX-81	1,030	4,000.03	11,245.08	10,846.17	CUMPLE	37%
MX-82	1,600	14,887.36	15,484.78	16,431.93	CUMPLE	91%
MX-83	1,600	14,871.57	21,088.00	17,608.61	CUMPLE	84%
MX-84	1,630	17,147.40	20,656.51	17,765.12	CUMPLE	97%
MX-85	1,630	19,483.25	14,563.55	16,485.60	NO CUMPLE	118%
MX-86	900	8,456.36	11,302.06	9,787.25	CUMPLE	86%
MX-87	2,095	29,311.07	22,146.53	21,908.50	NO CUMPLE	134%
MX-88	1,460	17,339.51	18,435.21	15,898.26	NO CUMPLE	109%
MX-89	650	965.17	7,618.58	6,954.33	CUMPLE	14%
MX-90	1,600	13,176.20	14,531.87	16,231.82	CUMPLE	81%
MX-91	1,600	9,378.09	19,636.62	17,303.82	CUMPLE	54%
MX-92	1,000	4,508.01	9,520.19	10,236.82	CUMPLE	44%
MX-93	1,000	5,670.10	7,475.50	9,807.43	CUMPLE	58%
MX-94	1,400	17,819.16	15,501.26	14,787.87	NO CUMPLE	120%
MX-95	650	1,245.93	6,508.37	6,721.18	CUMPLE	19%
MX-96	1,600	10,674.63	18,776.78	17,123.25	CUMPLE	62%
MX-97	1,600	15,249.72	12,605.16	15,827.21	CUMPLE	96%
MX-98	1,400	14,577.38	14,762.62	14,632.76	CUMPLE	100%
MX-99	1,030	4,712.19	6,293.12	9,806.26	CUMPLE	48%
MX-100	1,030	3,778.01	10,332.96	10,654.63	CUMPLE	35%
	$\sum V_{ux} =$	293,564.84	$\sum V_{Rx} =$	349,105.03		
MY-109	1,150	5,634.21	10,305.70	11,637.41	CUMPLE	48%
MY-110	1,150	3,112.04	10,209.40	11,617.19	CUMPLE	27%
MY-111	2,460	18,168.67	24,845.52	25,482.00	CUMPLE	71%
MY-112	2,460	16,020.72	22,346.79	24,957.27	CUMPLE	64%
MY-113	2,460	16,432.60	24,769.22	25,465.98	CUMPLE	65%
MY-114	1,750	10,600.00	16,358.16	17,850.98	CUMPLE	59%
MY-115	1,750	13,339.97	17,309.02	18,050.66	CUMPLE	74%
MY-116	1,040	13,341.94	11,903.89	11,066.90	NO CUMPLE	121%
MY-117	1,500	7,933.18	17,581.84	16,048.55	CUMPLE	49%
MY-118	2,000	26,478.52	18,404.52	20,340.11	NO CUMPLE	130%
MY-119	2,000	21,284.82	17,563.20	20,163.43	NO CUMPLE	106%
MY-120	800	1,057.84	7,549.54	8,175.47	CUMPLE	13%

MY-121	1,500	12,419.33	17,506.23	16,032.68	CUMPLE	77%
MY-122	1,500	7,545.82	15,747.80	15,663.41	CUMPLE	48%
MY-123	1,500	14,593.85	12,028.34	14,882.32	CUMPLE	98%
MY-124	1,500	6,319.69	12,816.30	15,047.79	CUMPLE	42%
MY-125	1,500	10,660.31	17,694.22	16,072.15	CUMPLE	66%
MY-126	800	3,741.04	6,264.19	7,905.54	CUMPLE	47%
MY-127	2,450	26,260.91	22,058.27	24,814.30	NO CUMPLE	106%
MY-128	1,040	11,293.62	14,912.86	11,698.78	CUMPLE	97%
MY-129	2,460	13,820.79	14,921.59	23,397.98	CUMPLE	59%
MY-130	2,460	21,852.82	22,874.87	25,068.17	CUMPLE	87%
MY-131	2,460	27,770.84	28,993.73	26,353.13	NO CUMPLE	105%
MY-132	1,040	13,250.64	10,445.64	10,760.67	NO CUMPLE	123%
MY-133	1,150	22,988.24	9,842.53	11,540.15	NO CUMPLE	199%
MY-134	1,500	10,542.24	16,992.46	15,924.78	CUMPLE	66%
MY-135	2,000	24,182.00	24,041.47	21,523.87	NO CUMPLE	112%
MY-136	1,500	7,793.73	15,680.33	15,649.24	CUMPLE	50%
MY-137	1,500	14,503.73	12,042.16	14,885.22	CUMPLE	97%
MY-138	2,000	23,816.80	17,539.18	20,158.38	NO CUMPLE	118%
MY-139	1,040	11,662.94	12,783.15	11,251.54	NO CUMPLE	104%
MY-140	1,150	9,988.95	10,653.05	11,710.36	CUMPLE	85%
MY-141	1,310	21,090.95	12,083.84	13,328.83	NO CUMPLE	158%
MY-142	2,460	15,506.55	23,931.05	25,289.96	CUMPLE	61%
MY-143	1,750	12,254.77	17,093.27	18,005.35	CUMPLE	68%
MY-144	1,750	11,963.61	15,852.73	17,744.84	CUMPLE	67%
	$\sum V_{uy} =$	509,228.66	$\sum V_{Ry} =$	615,565.36		

4.2.2 Revisión de la resistencia de los muros considerando el uso de refuerzo horizontal

De acuerdo con los datos obtenidos y mostrados anteriormente, se observa que casi todos los muros requieren refuerzo horizontal, por lo que en el diseño se decidió colocar el refuerzo mínimo consistente de una varilla de $\frac{1}{4}$ pulg ($f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$) a cada dos hiladas (420 mm). Se utilizó un factor de área neta $f_{an} = 0.60$, donde f_{an} es el cociente entre área neta y el área bruta de las piezas de block. Además, un factor $\eta_s = 0.55$, ya que $f'_m \leq 6 \text{ MPa} \left(60 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$, donde η_s es el factor parcial de eficiencia del refuerzo horizontal que depende de la resistencia a compresión de la mampostería. En algunos muros de la estructura no requirió dicho refuerzo.

Los resultados derivados de este procedimiento se presentan en las siguientes **Tabla 29**, **Tabla 30**, **Tabla 31** y **Tabla 32**.

Se observa que solamente fue necesario el refuerzo mínimo para poder cumplir con la resistencia a cortante demandada a los muros en todos los niveles. El trabajo del refuerzo horizontal se mantiene entre el 60% y 90%, el cual indica un uso suficiente del refuerzo horizontal sin presentar algún sobre diseño.

Tabla 29. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo horizontal nivel 1 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTO MECÁNICO ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			REFORZAMIENTO EN JUNTAS								
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	VR (N)	Estado	Trabajo Cortante	Espesor hj (mm)	K0	ph	KI	η	VSR (N)	VR (N)	Estado	Trabajo Cortante
MX-1	1,600	37,292.01	32,498.77	NO CUMPLE	115%	10	1.00	0.063%	0.89	0.44	13,887.90	46,386.67	CUMPLE	80%
MX-2	1,600	34,981.27	26,740.42	NO CUMPLE	131%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	14,509.80	41,250.21	CUMPLE	85%
MX-3	1,400	28,837.60	20,893.36	NO CUMPLE	138%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	12,966.56	33,859.92	CUMPLE	85%
MX-4	1,400	27,746.62	21,834.77	NO CUMPLE	127%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	12,864.89	34,699.66	CUMPLE	80%
MX-5	1,030	16,490.85	16,661.59	CUMPLE	99%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,661.59	CUMPLE	99%
MX-6	1,030	18,901.61	19,506.98	CUMPLE	97%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	19,506.98	CUMPLE	97%
MX-7	1,600	35,534.36	30,891.37	NO CUMPLE	115%	10	1.00	0.063%	0.89	0.44	14,061.50	44,952.87	CUMPLE	79%
MX-8	1,600	36,480.41	31,402.31	NO CUMPLE	116%	10	1.00	0.063%	0.89	0.44	14,006.32	45,408.62	CUMPLE	80%
MX-9	1,630	37,688.00	31,348.78	NO CUMPLE	120%	10	1.00	0.063%	0.89	0.44	14,338.30	45,687.09	CUMPLE	82%
MX-10	1,630	35,860.04	29,861.06	NO CUMPLE	120%	10	1.00	0.063%	0.89	0.45	14,498.98	44,360.04	CUMPLE	81%
MX-11	900	21,409.66	16,314.71	NO CUMPLE	131%	10	1.00	0.063%	0.89	0.45	8,024.25	24,338.96	CUMPLE	88%
MX-12	2,095	46,334.32	34,696.37	NO CUMPLE	134%	10	1.13	0.063%	0.89	0.55	22,955.19	57,651.56	CUMPLE	80%
MX-13	1,460	36,801.09	32,665.58	NO CUMPLE	113%	10	1.00	0.063%	0.89	0.43	12,347.58	45,013.16	CUMPLE	82%
MX-14	650	7,406.27	11,894.20	CUMPLE	62%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	11,894.20	CUMPLE	62%
MX-15	1,600	35,308.61	29,915.69	NO CUMPLE	118%	10	1.00	0.063%	0.89	0.45	14,166.87	44,082.56	CUMPLE	80%
MX-16	1,600	36,154.24	33,355.56	NO CUMPLE	108%	10	1.00	0.063%	0.89	0.44	13,795.36	47,150.93	CUMPLE	77%
MX-17	1,000	17,530.16	17,291.69	NO CUMPLE	101%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	9,006.10	26,297.79	CUMPLE	67%
MX-18	1,000	18,777.07	17,288.35	NO CUMPLE	109%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	9,006.46	26,294.81	CUMPLE	71%
MX-19	1,400	29,903.98	21,588.45	NO CUMPLE	139%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	12,891.49	34,479.94	CUMPLE	87%
MX-20	650	7,558.47	12,608.52	CUMPLE	60%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	12,608.52	CUMPLE	60%
MX-21	1,600	38,606.29	34,386.41	NO CUMPLE	112%	10	1.00	0.063%	0.89	0.43	13,684.03	48,070.44	CUMPLE	80%
MX-22	1,600	35,943.50	29,068.81	NO CUMPLE	124%	10	1.00	0.063%	0.89	0.45	14,258.33	43,327.14	CUMPLE	83%
MX-23	1,400	30,378.82	23,966.49	NO CUMPLE	127%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	12,634.66	36,601.16	CUMPLE	83%
MX-24	1,030	17,839.55	15,921.34	NO CUMPLE	112%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	9,480.31	25,401.65	CUMPLE	70%
MX-25	1,030	20,671.22	18,574.28	NO CUMPLE	111%	10	1.00	0.063%	0.89	0.45	9,193.79	27,768.07	CUMPLE	74%

		$\sum V_{mrX} =$	611,175.87								$\sum V_{mrX} =$	883,754.53		
MY-1	1,150	13,538.36	18,027.86	CUMPLE	75%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	18,027.86	CUMPLE	75%
MY-2	1,150	12,739.51	17,557.35	CUMPLE	73%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	17,557.35	CUMPLE	73%
MY-3	2,460	36,999.38	39,701.98	CUMPLE	93%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	39,701.98	CUMPLE	93%
MY-4	2,460	39,600.79	42,820.66	CUMPLE	92%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	42,820.66	CUMPLE	92%
MY-5	2,460	34,198.70	40,454.56	CUMPLE	85%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	40,454.56	CUMPLE	85%
MY-6	1,750	28,821.82	32,943.60	CUMPLE	87%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	32,943.60	CUMPLE	87%
MY-7	1,750	27,287.96	28,485.42	CUMPLE	96%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	28,485.42	CUMPLE	96%
MY-8	1,040	16,639.91	16,652.00	CUMPLE	100%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,652.00	CUMPLE	100%
MY-9	1,500	19,029.98	29,459.37	CUMPLE	65%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	29,459.37	CUMPLE	65%
MY-10	2,000	31,827.65	36,004.50	CUMPLE	88%	10	1.09	0.000%	1.00	0.00	0.00	36,004.50	CUMPLE	88%
MY-11	2,000	29,371.28	30,643.67	CUMPLE	96%	10	1.09	0.000%	1.00	0.00	0.00	30,643.67	CUMPLE	96%
MY-12	800	6,620.37	11,427.62	CUMPLE	58%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	11,427.62	CUMPLE	58%
MY-13	1,500	28,085.44	31,825.97	CUMPLE	88%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	31,825.97	CUMPLE	88%
MY-14	1,500	16,201.65	26,151.35	CUMPLE	62%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	26,151.35	CUMPLE	62%
MY-15	1,500	22,548.90	21,555.60	NO CUMPLE	105%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	13,982.40	35,538.00	CUMPLE	63%
MY-16	1,500	24,501.11	25,987.03	CUMPLE	94%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	25,987.03	CUMPLE	94%
MY-17	1,500	20,337.50	27,455.70	CUMPLE	74%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	27,455.70	CUMPLE	74%
MY-18	800	11,257.44	12,676.62	CUMPLE	89%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	12,676.62	CUMPLE	89%
MY-19	2,450	46,505.45	50,528.03	CUMPLE	92%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	50,528.03	CUMPLE	92%
MY-20	1,040	30,257.51	20,008.34	NO CUMPLE	151%	10	1.00	0.063%	0.89	0.44	9,147.65	29,155.98	NO CUMPLE	104%
MY-21	2,460	35,140.14	37,730.64	CUMPLE	93%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	37,730.64	CUMPLE	93%
MY-22	2,460	41,507.20	38,549.31	NO CUMPLE	108%	10	1.24	0.063%	0.89	0.64	30,888.70	69,438.01	CUMPLE	60%
MY-23	2,460	45,623.63	39,451.68	NO CUMPLE	116%	10	1.24	0.063%	0.89	0.64	30,985.60	70,437.27	CUMPLE	65%
MY-24	1,040	18,324.69	17,020.30	NO CUMPLE	108%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	9,470.35	26,490.65	CUMPLE	69%
MY-25	1,150	20,820.77	19,824.70	NO CUMPLE	105%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	10,363.58	30,188.28	CUMPLE	69%
MY-26	1,500	26,953.75	34,130.37	CUMPLE	79%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	34,130.37	CUMPLE	79%
MY-27	2,000	31,400.86	34,644.31	CUMPLE	91%	10	1.09	0.000%	1.00	0.00	0.00	34,644.31	CUMPLE	91%
MY-28	1,500	16,173.99	26,123.79	CUMPLE	62%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	26,123.79	CUMPLE	62%
MY-29	1,500	22,326.88	21,472.05	NO CUMPLE	104%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	13,991.42	35,463.47	CUMPLE	63%

MY-30	2,000	30,047.84	30,422.10	CUMPLE	99%	10	1.09	0.000%	1.00	0.00	0.00	30,422.10	CUMPLE	99%
MY-31	1,040	17,041.00	15,440.62	NO CUMPLE	110%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	9,640.96	25,081.58	CUMPLE	68%
MY-32	1,150	16,541.94	17,143.95	CUMPLE	96%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	17,143.95	CUMPLE	96%
MY-33	1,310	26,127.44	25,450.84	NO CUMPLE	103%	10	1.00	0.063%	0.89	0.44	11,495.73	36,946.57	CUMPLE	71%
MY-34	2,460	34,491.04	39,905.42	CUMPLE	86%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	39,905.42	CUMPLE	86%
MY-35	1,750	26,513.43	28,225.14	CUMPLE	94%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	28,225.14	CUMPLE	94%
MY-36	1,750	28,419.16	32,523.85	CUMPLE	87%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	32,523.85	CUMPLE	87%
		$\Sigma V_{mry} =$	1,018,426.30									$\Sigma V_{mry} =$	1,158,392.68	

Tabla 30. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo horizontal nivel 2 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTO MECÁNICO ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			REFORZAMIENTO EN JUNTAS								
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	VR (N)	Estado	Trabajo Cortante	Espesor hj (mm)	K0	ph	KI	η	VSR (N)	VR (N)	Estado	Trabajo Cortante
MX-26	1,600	33,017.59	27,240.72	NO CUMPLE	121%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	14,455.77	41,696.49	CUMPLE	79%
MX-27	1,600	34,950.28	23,577.43	NO CUMPLE	148%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	14,851.40	38,428.83	CUMPLE	91%
MX-28	1,400	29,371.09	19,198.73	NO CUMPLE	153%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	13,149.58	32,348.31	CUMPLE	91%
MX-29	1,400	27,857.53	20,002.03	NO CUMPLE	139%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	13,062.82	33,064.86	CUMPLE	84%
MX-30	1,030	13,447.94	14,105.25	CUMPLE	95%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	14,105.25	CUMPLE	95%
MX-31	1,030	13,102.06	16,898.61	CUMPLE	78%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,898.61	CUMPLE	78%
MX-32	1,600	32,359.07	25,738.07	NO CUMPLE	126%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	14,618.05	40,356.12	CUMPLE	80%
MX-33	1,600	33,370.53	23,906.07	NO CUMPLE	140%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	14,815.91	38,721.98	CUMPLE	86%
MX-34	1,630	33,103.10	23,449.87	NO CUMPLE	141%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	15,191.39	38,641.26	CUMPLE	86%
MX-35	1,630	33,896.56	24,899.30	NO CUMPLE	136%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	15,034.85	39,934.14	CUMPLE	85%
MX-36	900	19,664.37	14,633.23	NO CUMPLE	134%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	8,205.85	22,839.09	CUMPLE	86%
MX-37	2,095	47,519.84	29,913.02	NO CUMPLE	159%	10	1.13	0.063%	0.89	0.55	22,931.06	52,844.08	CUMPLE	90%
MX-38	1,460	30,605.06	24,719.86	NO CUMPLE	124%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	13,205.72	37,925.58	CUMPLE	81%
MX-39	650	2,614.35	9,224.32	CUMPLE	28%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	9,224.32	CUMPLE	28%
MX-40	1,600	32,511.56	24,862.66	NO CUMPLE	131%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	14,712.60	39,575.26	CUMPLE	82%
MX-41	1,600	29,627.24	24,816.34	NO CUMPLE	119%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	14,717.60	39,533.94	CUMPLE	75%
MX-42	1,000	12,278.60	15,325.05	CUMPLE	80%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	15,325.05	CUMPLE	80%
MX-43	1,000	15,358.87	14,187.83	NO CUMPLE	108%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	9,341.32	23,529.15	CUMPLE	65%
MX-44	1,400	29,317.74	18,150.54	NO CUMPLE	162%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	13,262.79	31,413.32	CUMPLE	93%
MX-45	650	2,398.02	9,816.56	CUMPLE	24%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	9,816.56	CUMPLE	24%
MX-46	1,600	31,018.90	25,408.03	NO CUMPLE	122%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	14,653.70	40,061.73	CUMPLE	77%
MX-47	1,600	32,982.77	23,966.49	NO CUMPLE	138%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	14,809.38	38,775.88	CUMPLE	85%
MX-48	1,400	26,268.85	19,133.59	NO CUMPLE	137%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	13,156.62	32,290.20	CUMPLE	81%
MX-49	1,030	14,197.27	13,197.55	NO CUMPLE	108%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	9,774.48	22,972.02	CUMPLE	62%
MX-50	1,030	14,076.75	16,296.07	CUMPLE	86%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,296.07	CUMPLE	86%

		$\sum V_{mrX} =$	502,667.21								$\sum V_{mrX} =$	766,618.08		
MY-37	1,150	10,362.09	16,268.06	CUMPLE	64%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,268.06	CUMPLE	64%
MY-38	1,150	10,016.99	15,592.40	CUMPLE	64%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	15,592.40	CUMPLE	64%
MY-39	2,460	34,052.38	35,011.31	CUMPLE	97%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	35,011.31	CUMPLE	97%
MY-40	2,460	36,813.84	36,706.30	NO CUMPLE	100%	10	1.24	0.063%	0.89	0.63	30,690.78	67,397.08	CUMPLE	55%
MY-41	2,460	31,199.53	35,463.45	CUMPLE	88%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	35,463.45	CUMPLE	88%
MY-42	1,750	24,499.83	27,674.14	CUMPLE	89%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	27,674.14	CUMPLE	89%
MY-43	1,750	27,586.67	25,225.55	NO CUMPLE	109%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	16,304.45	41,529.99	CUMPLE	66%
MY-44	1,040	17,533.98	14,621.64	NO CUMPLE	120%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	9,729.41	24,351.05	CUMPLE	72%
MY-45	1,500	15,633.55	24,159.15	CUMPLE	65%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	24,159.15	CUMPLE	65%
MY-46	2,000	34,204.49	30,105.69	NO CUMPLE	114%	10	1.09	0.063%	0.89	0.53	20,912.68	51,018.37	CUMPLE	67%
MY-47	2,000	30,094.23	27,347.98	NO CUMPLE	110%	10	1.09	0.063%	0.89	0.53	20,989.12	48,337.10	CUMPLE	62%
MY-48	800	3,818.12	10,664.86	CUMPLE	36%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	10,664.86	CUMPLE	36%
MY-49	1,500	23,560.06	25,680.63	CUMPLE	92%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	25,680.63	CUMPLE	92%
MY-50	1,500	12,756.09	21,415.15	CUMPLE	60%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	21,415.15	CUMPLE	60%
MY-51	1,500	23,177.21	19,579.41	NO CUMPLE	118%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	14,195.83	33,775.23	CUMPLE	69%
MY-52	1,500	18,223.29	22,838.87	CUMPLE	80%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	22,838.87	CUMPLE	80%
MY-53	1,500	16,873.80	21,802.60	CUMPLE	77%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	21,802.60	CUMPLE	77%
MY-54	800	8,976.90	10,772.59	CUMPLE	83%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	10,772.59	CUMPLE	83%
MY-55	2,450	41,172.59	39,594.95	NO CUMPLE	104%	10	1.24	0.063%	0.89	0.64	30,797.31	70,392.26	CUMPLE	58%
MY-56	1,040	29,119.06	17,304.39	NO CUMPLE	168%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	9,439.67	26,744.07	NO CUMPLE	109%
MY-57	2,460	32,389.57	32,773.56	CUMPLE	99%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	32,773.56	CUMPLE	99%
MY-58	2,460	38,247.27	33,790.22	NO CUMPLE	113%	10	1.24	0.063%	0.89	0.62	30,377.64	64,167.85	CUMPLE	60%
MY-59	2,460	46,174.27	35,266.16	NO CUMPLE	131%	10	1.24	0.063%	0.89	0.63	30,536.13	65,802.30	CUMPLE	70%
MY-60	1,040	19,223.47	14,841.25	NO CUMPLE	130%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	9,705.69	24,546.95	CUMPLE	78%
MY-61	1,150	20,575.22	16,813.97	NO CUMPLE	122%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	10,688.73	27,502.70	CUMPLE	75%
MY-62	1,500	20,388.99	27,027.06	CUMPLE	75%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	27,027.06	CUMPLE	75%
MY-63	2,000	33,758.68	30,244.45	NO CUMPLE	112%	10	1.09	0.063%	0.89	0.53	20,908.83	51,153.28	CUMPLE	66%
MY-64	1,500	12,636.84	21,381.09	CUMPLE	59%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	21,381.09	CUMPLE	59%
MY-65	1,500	22,142.41	19,516.51	NO CUMPLE	113%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	14,202.62	33,719.13	CUMPLE	66%

MY-66	2,000	31,284.07	27,188.95	NO CUMPLE	115%	10	1.09	0.063%	0.89	0.53	20,993.53	48,182.48	CUMPLE	65%
MY-67	1,040	17,250.67	14,016.84	NO CUMPLE	123%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	9,794.73	23,811.57	CUMPLE	72%
MY-68	1,150	15,747.90	15,227.62	NO CUMPLE	103%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	10,860.06	26,087.68	CUMPLE	60%
MY-69	1,310	26,334.07	20,872.50	NO CUMPLE	126%	10	1.00	0.063%	0.89	0.46	11,990.19	32,862.69	CUMPLE	80%
MY-70	2,460	30,984.77	35,024.37	CUMPLE	88%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	35,024.37	CUMPLE	88%
MY-71	1,750	26,253.26	25,018.25	NO CUMPLE	105%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	16,326.83	41,345.08	CUMPLE	63%
MY-72	1,750	25,478.05	27,322.89	CUMPLE	93%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	27,322.89	CUMPLE	93%
		$\Sigma V_{mry} =$	874,154.83									$\Sigma V_{mry} =$	1,213,599.07	

Tabla 31. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo horizontal nivel 3 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTO MECÁNICO ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			REFORZAMIENTO EN JUNTAS								
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	VR (N)	Estado	Trabajo Cortante	Espesor hj (mm)	K0	ph	KI	η	VSR (N)	VR (N)	Estado	Trabajo Cortante
MX-51	1,600	26,340.05	21,813.60	NO CUMPLE	121%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	15,041.90	36,855.50	CUMPLE	71%
MX-52	1,600	31,908.06	20,276.90	NO CUMPLE	157%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	15,207.86	35,484.76	CUMPLE	90%
MX-53	1,400	28,225.47	17,085.81	NO CUMPLE	165%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	13,377.78	30,463.59	CUMPLE	93%
MX-54	1,400	25,466.47	17,608.30	NO CUMPLE	145%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	13,321.35	30,929.65	CUMPLE	82%
MX-55	1,030	9,656.21	11,917.70	CUMPLE	81%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	11,917.70	CUMPLE	81%
MX-56	1,030	7,098.34	13,737.13	CUMPLE	52%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	13,737.13	CUMPLE	52%
MX-57	1,600	27,422.02	20,672.61	NO CUMPLE	133%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	15,165.12	35,837.74	CUMPLE	77%
MX-58	1,600	27,114.38	20,083.40	NO CUMPLE	135%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	15,228.76	35,312.16	CUMPLE	77%
MX-59	1,630	26,663.28	19,908.17	NO CUMPLE	134%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	15,573.89	35,482.06	CUMPLE	75%
MX-60	1,630	31,133.24	20,272.91	NO CUMPLE	154%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	15,534.50	35,807.41	CUMPLE	87%
MX-61	900	16,157.72	12,372.12	NO CUMPLE	131%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	8,450.05	20,822.18	CUMPLE	78%
MX-62	2,100	47,676.46	26,041.48	NO CUMPLE	183%	10	1.13	0.063%	0.89	0.55	23,008.67	49,050.15	CUMPLE	97%
MX-63	1,460	24,719.01	18,493.78	NO CUMPLE	134%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	13,878.13	32,371.91	CUMPLE	76%
MX-64	650	1,531.99	8,032.94	CUMPLE	19%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	8,032.94	CUMPLE	19%
MX-65	1,600	26,804.39	20,135.22	NO CUMPLE	133%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	15,223.16	35,358.38	CUMPLE	76%
MX-66	1,600	19,371.25	18,965.83	NO CUMPLE	102%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	15,349.45	34,315.28	CUMPLE	56%
MX-67	1,000	7,563.76	12,651.29	CUMPLE	60%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	12,651.29	CUMPLE	60%
MX-68	1,000	11,015.70	11,786.27	CUMPLE	93%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	11,786.27	CUMPLE	93%
MX-69	1,400	29,348.82	17,051.13	NO CUMPLE	172%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	13,381.52	30,432.65	CUMPLE	96%
MX-70	650	2,131.67	8,036.58	CUMPLE	27%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	8,036.58	CUMPLE	27%
MX-71	1,600	21,114.78	18,739.38	NO CUMPLE	113%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	15,373.91	34,113.29	CUMPLE	62%
MX-72	1,600	28,080.53	19,346.88	NO CUMPLE	145%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	15,308.30	34,655.18	CUMPLE	81%
MX-73	1,400	23,844.65	16,650.68	NO CUMPLE	143%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	13,424.77	30,075.45	CUMPLE	79%
MX-74	1,030	9,730.25	11,212.72	CUMPLE	87%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	11,212.72	CUMPLE	87%

MX-75	1,030	7,718.32	13,305.73	CUMPLE	58%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	13,305.73	CUMPLE	58%
		$\Sigma V_{mrX} =$	416,198.54									$\Sigma V_{mrX} =$	668,047.67	
MY-73	1,150	8,556.88	13,971.16	CUMPLE	61%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	13,971.16	CUMPLE	61%
MY-74	1,150	6,729.12	13,572.63	CUMPLE	50%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	13,572.63	CUMPLE	50%
MY-75	2,460	28,544.39	30,195.91	CUMPLE	95%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	30,195.91	CUMPLE	95%
MY-76	2,460	30,596.52	30,668.09	CUMPLE	100%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	30,668.09	CUMPLE	100%
MY-77	2,460	24,845.81	30,410.96	CUMPLE	82%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	30,410.96	CUMPLE	82%
MY-78	1,750	19,575.72	22,501.15	CUMPLE	87%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	22,501.15	CUMPLE	87%
MY-79	1,750	24,672.92	21,842.62	NO CUMPLE	113%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	16,669.80	38,512.42	CUMPLE	64%
MY-80	1,040	18,501.60	13,128.70	NO CUMPLE	141%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	9,890.65	23,019.35	CUMPLE	80%
MY-81	1,500	10,523.02	19,375.46	CUMPLE	54%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	19,375.46	CUMPLE	54%
MY-82	2,000	36,962.11	24,776.27	NO CUMPLE	149%	10	1.09	0.063%	0.89	0.53	21,060.41	45,836.68	CUMPLE	81%
MY-83	2,000	30,969.27	23,887.06	NO CUMPLE	130%	10	1.09	0.063%	0.89	0.53	21,085.06	44,972.12	CUMPLE	69%
MY-84	800	830.13	9,564.16	CUMPLE	9%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	9,564.16	CUMPLE	9%
MY-85	1,500	18,618.89	20,130.81	CUMPLE	92%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	20,130.81	CUMPLE	92%
MY-86	1,500	7,995.94	18,250.97	CUMPLE	44%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	18,250.97	CUMPLE	44%
MY-87	1,500	22,784.65	17,372.95	NO CUMPLE	131%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	14,434.13	31,807.08	CUMPLE	72%
MY-88	1,500	11,446.80	18,686.39	CUMPLE	61%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	18,686.39	CUMPLE	61%
MY-89	1,500	11,387.57	18,459.45	CUMPLE	62%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	18,459.45	CUMPLE	62%
MY-90	800	6,531.22	9,183.91	CUMPLE	71%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	9,183.91	CUMPLE	71%
MY-91	2,450	37,426.95	30,417.24	NO CUMPLE	123%	10	1.24	0.063%	0.89	0.62	29,833.76	60,251.00	CUMPLE	62%
MY-92	1,040	23,806.41	14,602.73	NO CUMPLE	163%	10	1.00	0.063%	0.89	0.47	9,731.45	24,334.19	CUMPLE	98%
MY-93	2,460	27,290.41	27,783.42	CUMPLE	98%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	27,783.42	CUMPLE	98%
MY-94	2,460	32,334.65	29,374.61	NO CUMPLE	110%	10	1.24	0.063%	0.89	0.61	29,903.47	59,278.07	CUMPLE	55%
MY-95	2,460	44,048.20	30,849.01	NO CUMPLE	143%	10	1.24	0.063%	0.89	0.62	30,061.80	60,910.81	CUMPLE	72%
MY-96	1,040	19,526.49	12,803.63	NO CUMPLE	153%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	9,925.76	22,729.38	CUMPLE	86%
MY-97	1,150	27,959.32	13,925.05	NO CUMPLE	201%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	11,000.74	24,925.79	NO CUMPLE	112%
MY-98	1,500	15,203.24	20,610.24	CUMPLE	74%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	20,610.24	CUMPLE	74%
MY-99	2,000	35,377.95	25,765.85	NO CUMPLE	137%	10	1.09	0.063%	0.89	0.53	21,032.98	46,798.82	CUMPLE	76%

MY-100	1,500	8,004.96	18,262.53	CUMPLE	44%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	18,262.53	CUMPLE	44%
MY-101	1,500	21,614.52	17,350.85	NO CUMPLE	125%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	14,436.51	31,787.36	CUMPLE	68%
MY-102	2,000	33,975.70	23,812.53	NO CUMPLE	143%	10	1.09	0.063%	0.89	0.53	21,087.12	44,899.65	CUMPLE	76%
MY-103	1,040	16,668.15	12,937.47	NO CUMPLE	129%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	9,911.30	22,848.77	CUMPLE	73%
MY-104	1,150	14,092.34	13,553.97	NO CUMPLE	104%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	11,040.81	24,594.78	CUMPLE	57%
MY-105	1,310	29,061.98	16,684.87	NO CUMPLE	174%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	12,442.45	29,127.32	CUMPLE	100%
MY-106	2,460	23,631.75	30,099.21	CUMPLE	79%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	30,099.21	CUMPLE	79%
MY-107	1,750	22,590.68	21,712.92	NO CUMPLE	104%	10	1.00	0.063%	0.89	0.48	16,683.81	38,396.73	CUMPLE	59%
MY-108	1,750	20,255.13	22,252.42	CUMPLE	91%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	22,252.42	CUMPLE	91%
		$\Sigma V_{mry} =$	738,777.17									$\Sigma V_{mry} =$	1,049,009.17	

Tabla 32. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo horizontal nivel 4 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTO MECÁNICO ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			REFORZAMIENTO EN JUNTAS								
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	VR (N)	Estado	Trabajo Cortante	Espesor hj (mm)	K0	ph	KI	n	VSR (N)	VR (N)	Estado	Trabajo Cortante
MX-76	1,600	12,267.42	16,684.37	CUMPLE	74%	10	1.000	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,684.37	CUMPLE	74%
MX-77	1,600	16,625.00	16,598.68	NO CUMPLE	100%	10	1.000	0.063%	0.89	0.49	15,605.11	32,203.79	CUMPLE	52%
MX-78	1,400	15,597.46	14,376.70	NO CUMPLE	108%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	13,670.36	28,047.06	CUMPLE	56%
MX-79	1,400	14,125.49	14,514.51	CUMPLE	97%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	14,514.51	CUMPLE	97%
MX-80	1,030	4,859.48	9,990.51	CUMPLE	49%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	9,990.51	CUMPLE	49%
MX-81	1,030	3,936.39	10,810.77	CUMPLE	36%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	10,810.77	CUMPLE	36%
MX-82	1,600	14,470.48	16,412.94	CUMPLE	88%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,412.94	CUMPLE	88%
MX-83	1,600	14,192.17	17,534.34	CUMPLE	81%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	17,534.34	CUMPLE	81%
MX-84	1,630	16,436.91	17,680.19	CUMPLE	93%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	17,680.19	CUMPLE	93%
MX-85	1,630	18,962.61	16,455.63	NO CUMPLE	115%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	15,946.76	32,402.40	CUMPLE	59%
MX-86	900	8,111.86	9,768.14	CUMPLE	83%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	9,768.14	CUMPLE	83%
MX-87	2,095	28,220.47	21,876.52	NO CUMPLE	129%	10	1.13	0.063%	0.89	0.55	22,890.53	44,767.05	CUMPLE	63%
MX-88	1,460	16,604.70	15,849.97	NO CUMPLE	105%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	14,163.66	30,013.63	CUMPLE	55%
MX-89	650	948.01	6,935.13	CUMPLE	14%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	6,935.13	CUMPLE	14%
MX-90	1,600	12,953.00	16,207.06	CUMPLE	80%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,207.06	CUMPLE	80%
MX-91	1,600	9,050.55	17,232.46	CUMPLE	53%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	17,232.46	CUMPLE	53%
MX-92	1,000	4,412.99	10,204.71	CUMPLE	43%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	10,204.71	CUMPLE	43%
MX-93	1,000	5,409.83	9,806.08	CUMPLE	55%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	9,806.08	CUMPLE	55%
MX-94	1,400	17,094.94	14,751.88	NO CUMPLE	116%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	13,629.84	28,381.72	CUMPLE	60%
MX-95	650	1,220.63	6,717.00	CUMPLE	18%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	6,717.00	CUMPLE	18%
MX-96	1,600	10,289.32	17,054.28	CUMPLE	60%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	17,054.28	CUMPLE	60%
MX-97	1,600	14,944.44	15,817.47	CUMPLE	94%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	15,817.47	CUMPLE	94%
MX-98	1,400	14,090.87	14,590.21	CUMPLE	97%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	14,590.21	CUMPLE	97%
MX-99	1,030	4,507.52	9,803.46	CUMPLE	46%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	9,803.46	CUMPLE	46%

MX-100	1,030	3,683.67	10,621.99	CUMPLE	35%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	10,621.99	CUMPLE	35%
		$\Sigma V_{mrX} =$	348,295.01									$\Sigma V_{mrX} =$	444,201.28	
MY-109	1,150	5,466.61	11,624.95	CUMPLE	47%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	11,624.95	CUMPLE	47%
MY-110	1,150	3,026.33	11,613.52	CUMPLE	26%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	11,613.52	CUMPLE	26%
MY-111	2,460	17,896.63	25,443.00	CUMPLE	70%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	25,443.00	CUMPLE	70%
MY-112	2,460	15,778.79	24,942.07	CUMPLE	63%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	24,942.07	CUMPLE	63%
MY-113	2,460	16,065.93	25,427.63	CUMPLE	63%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	25,427.63	CUMPLE	63%
MY-114	1,750	10,287.75	17,829.85	CUMPLE	58%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	17,829.85	CUMPLE	58%
MY-115	1,750	13,080.00	18,031.01	CUMPLE	73%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	18,031.01	CUMPLE	73%
MY-116	1,040	13,135.01	11,062.06	NO CUMPLE	119%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	10,113.84	21,175.90	CUMPLE	62%
MY-117	1,500	7,844.14	16,045.13	CUMPLE	49%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,045.13	CUMPLE	49%
MY-118	2,000	25,971.81	20,332.88	NO CUMPLE	128%	10	1.09	0.063%	0.89	0.54	21,183.58	41,516.45	CUMPLE	63%
MY-119	2,000	20,772.43	20,157.02	NO CUMPLE	103%	10	1.09	0.063%	0.89	0.54	21,188.45	41,345.48	CUMPLE	50%
MY-120	800	1,035.97	8,173.51	CUMPLE	13%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	8,173.51	CUMPLE	13%
MY-121	1,500	12,087.86	16,029.15	CUMPLE	75%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,029.15	CUMPLE	75%
MY-122	1,500	7,480.31	15,653.46	CUMPLE	48%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	15,653.46	CUMPLE	48%
MY-123	1,500	14,244.24	14,879.56	CUMPLE	96%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	14,879.56	CUMPLE	96%
MY-124	1,500	6,064.82	15,043.26	CUMPLE	40%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	15,043.26	CUMPLE	40%
MY-125	1,500	10,467.80	16,051.83	CUMPLE	65%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	16,051.83	CUMPLE	65%
MY-126	800	3,652.09	7,904.24	CUMPLE	46%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	7,904.24	CUMPLE	46%
MY-127	2,450	25,682.71	24,801.76	NO CUMPLE	104%	10	1.24	0.063%	0.89	0.60	29,244.21	54,045.97	CUMPLE	48%
MY-128	1,040	11,037.96	11,692.73	CUMPLE	94%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	11,692.73	CUMPLE	94%
MY-129	2,460	13,468.34	23,385.21	CUMPLE	58%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	23,385.21	CUMPLE	58%
MY-130	2,460	21,241.77	25,034.70	CUMPLE	85%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	25,034.70	CUMPLE	85%
MY-131	2,460	27,239.71	26,341.70	NO CUMPLE	103%	10	1.24	0.063%	0.89	0.61	29,577.78	55,919.47	CUMPLE	49%
MY-132	1,040	13,031.95	10,758.61	NO CUMPLE	121%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	10,146.62	20,905.22	CUMPLE	62%
MY-133	1,150	22,081.61	11,536.36	NO CUMPLE	191%	10	1.00	0.063%	0.89	0.50	11,258.72	22,795.07	CUMPLE	97%
MY-134	1,500	10,328.45	15,923.65	CUMPLE	65%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	15,923.65	CUMPLE	65%
MY-135	2,000	23,807.39	21,511.41	NO CUMPLE	111%	10	1.09	0.063%	0.89	0.53	21,150.91	42,662.32	CUMPLE	56%

MY-136	1,500	7,726.65	15,639.27	CUMPLE	49%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	15,639.27	CUMPLE	49%
MY-137	1,500	14,160.10	14,882.17	CUMPLE	95%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	14,882.17	CUMPLE	95%
MY-138	2,000	23,256.06	20,151.77	NO CUMPLE	115%	10	1.09	0.063%	0.89	0.54	21,188.60	41,340.37	CUMPLE	56%
MY-139	1,040	11,481.03	11,247.30	NO CUMPLE	102%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	10,093.84	21,341.14	CUMPLE	54%
MY-140	1,150	9,694.94	11,703.68	CUMPLE	83%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	11,703.68	CUMPLE	83%
MY-141	1,310	20,171.77	13,316.56	NO CUMPLE	151%	10	1.00	0.063%	0.89	0.49	12,806.23	26,122.79	CUMPLE	77%
MY-142	2,460	15,172.93	25,250.28	CUMPLE	60%	10	1.24	0.000%	1.00	0.00	0.00	25,250.28	CUMPLE	60%
MY-143	1,750	11,996.07	17,985.64	CUMPLE	67%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	17,985.64	CUMPLE	67%
MY-144	1,750	11,545.65	17,723.27	CUMPLE	65%	10	1.00	0.000%	1.00	0.00	0.00	17,723.27	CUMPLE	65%
		$\Sigma V_{mry} =$	615,130.21									$\Sigma V_{mry} =$	813,082.98	

4.2.3 Revisión de la resistencia de los muros considerando el uso de refuerzo con GFRP de acuerdo con la CNR DT 200 R1 2014

Una vez concluido el proceso de calibración de las ecuaciones propuestas en la guía italiana CNR-DT 200 R1/2014 [30], a partir de resultados experimentales locales, se desarrolló una hoja de cálculo que integra todos los parámetros descritos en la sección **3.3.3** del presente documento. Mediante dicha hoja de cálculo se determinó la cantidad de refuerzo GFRP que requiere cada muro del edificio prototipo para soportar las cargas sísmicas de diseño. Los resultados derivados de este procedimiento se presentan en las **Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36**. Como se presenta a continuación, cabe destacar que algunos parámetros se consideraron constantes, en virtud de que depende de propiedades invariables, tales como las propiedades mecánicas y geométricas de la mampostería, así como las propiedades mecánicas de los materiales y condiciones geométricas de la mampostería.

En las **Tabla 33-Tabla 36** se observa que después de la aplicación del GFRP, se aprecia que todos los muros cumplen con la resistencia a cortante requerida, lo que demuestra la efectividad del refuerzo. En la mayoría de los casos, el trabajo de la fibra se mantiene entre el 65% y el 90%, con áreas cubiertas de fibra de entre el 11% y 23%, lo que indica un uso eficiente del material sin llegar a un sobre-reforzamiento. Asimismo, es pertinente señalar que, en la mayoría de los casos, los muros fueron reforzados mediante la aplicación de tres tiras de fibras de vidrio.

PARÁMETROS CONSTANTES EN LAS ECUACIONES EXISTENTES
CNR-DT 200 R1 2014
 (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures)

1. Datos de entrada

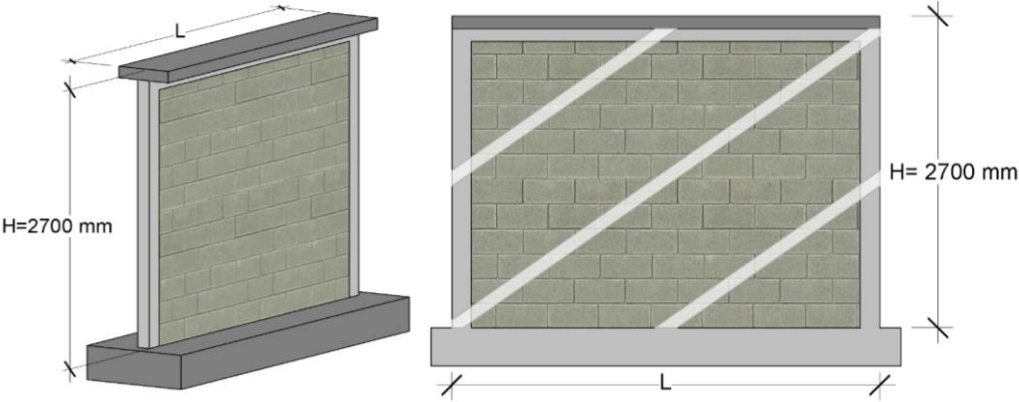
1.1 Geometría y propiedades mecánicas de la mampostería

Altura del muro	H	<table border="1"><tr><td>2.70</td><td>m</td></tr></table>	2.70	m
2.70	m			
Espesor del muro	t	<table border="1"><tr><td>0.12</td><td>m</td></tr></table>	0.12	m
0.12	m			
Resistencia a la compresión de blocks de mampostería	f_{bm}	<table border="1"><tr><td>5.88</td><td>MPa</td></tr></table>	5.88	MPa
5.88	MPa			
Resistencia a la tensión de blocks de mampostería	f_{btm}	<table border="1"><tr><td>0.588</td><td>MPa</td></tr></table>	0.588	MPa
0.588	MPa			
Resistencia a compresión diagonal de la mampostería.	$v'm$	<table border="1"><tr><td>0.196</td><td>MPa</td></tr></table>	0.196	MPa
0.196	MPa			

1.2 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio

Espesor de la fibra	t_f	<table border="1"><tr><td>1.00</td><td>mm</td></tr></table>	1.00	mm
1.00	mm			
Resistencia a la tensión de la fibra	f_{fu}^*	<table border="1"><tr><td>960</td><td>MPa</td></tr></table>	960	MPa
960	MPa			
Módulo de elasticidad de la fibra	E_f	<table border="1"><tr><td>73000</td><td>MPa</td></tr></table>	73000	MPa
73000	MPa			
Elongación de rotura de la fibra	ϵ_{fu}^*	<table border="1"><tr><td>0.0133</td><td></td></tr></table>	0.0133	
0.0133				
Ancho de la banda ó tira de la fibra	b_f	<table border="1"><tr><td>100</td><td>mm</td></tr></table>	100	mm
100	mm			
Numero de banda o tira de FRP	n	<table border="1"><tr><td>3</td><td></td></tr></table>	3	
3				

2. Cálculo de la resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada NTC-Mampostería 2023



3. Cálculo de las propiedades mecánicas de diseño del FRP

3.1 Factor correctivo geométrico

Dimensiones del block (mm)	
$b =$	400
$h =$	200
$t =$	120
$j =$	10
$bd =$	310
$b =$	410
$b_f =$	100

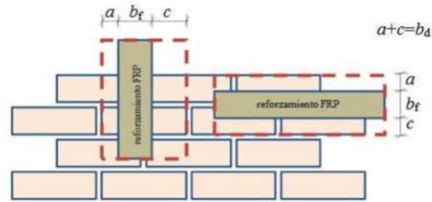


Figura 1. Distribución de resistencia de pegado para piedras de forma regular.

Factor correctivo geométrico

$$k_b = 1.49$$

$$k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f/b}{1 + b_f/b}}$$

3.2 Valor de diseño de la energía específica de fractura

k_G es un factor correctivo, expresado en milímetros y dependiente del tipo de mampostería.

para mampostería de bloques perforados: $k_G = 0.031$ mm

para mampostería de pómez: $k_G = 0.048$ mm

para mampostería de piedras calcarenitas y Lecce: $k_G = 0.012$ mm

Factor de confianza $FC = 1$

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}}$$

Valor de diseño de la energía específica de fractura $\Gamma_{Fd} = 0.086$ N/mm

3.3 Resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería

$$f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$$

Si los datos experimentales no están disponibles, s_u en la ecuación anterior es igual a 0.4 mm para piedra pómez (porosas) y bloques perforados, y 0.3 mm para mampostería calcarenitas y piedras

Resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería $f_{bd} = 0.4293$ N/mm²

3.4 Longitud óptima de pegado

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 150 \text{ mm} \right\}$$

Factores parciales γ_{Rd}	
Modelo de resistencia	γ_{Rd}
Flexión y Flexocompresión	1
Corte/Torsión	1.2
Confinamiento	1.1

Longitud óptima de pegado $l_{ed} = 341.39$ mm

3.5 Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (Modo 1)

$$f_{fd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}$$

Factores parciales γ_m		
	ELU	ELS
$\gamma_m = \gamma_f$	1.1	1
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.2	-
$\gamma_m = \gamma_{f,d}$	1.5	-

Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (Modo 1) $f_{fd} = 93.30$ N/mm²

3.6 Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP intermedio (Modo 2)

$$f_{fdd,2} = \alpha \cdot f_{fdd} \quad (1.0 \leq \alpha \leq 2.0)$$

Resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP intermedio $f_{fdd,2}$

186.60

 N/mm²

3.7 Deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado compatible con el despegamiento en el soporte.

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f}$$

Deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado compatible con el despegamiento en el soporte. ε_{fdd}

0.0026

3.8 Desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal

$$\delta_{Rd,1} = 0.005 \cdot H$$

Desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal $\delta_{Rd,1}$

13.50

 mm

4. Cálculo de la contribución del FRP a la resistencia al corte, $V_{Rd,f}$

Área de la fibra	A_{fib}	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>100</td></tr></table> mm ²	100
100			
Área total de la fibra utilizada	$A_{totalfib}$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>300</td></tr></table> mm ²	300
300			
Área efectiva de la fibra utilizada, $F_{efec}=1$	A_{efec}	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>300</td></tr></table> mm ²	300
300			

Tabla 33. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo GFRP nivel 1 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTO MECÁNICO ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			REFORZAMIENTO FRP CNR DT200 R1/2013										
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	Relación de aspecto (H/L)	VR (N)	Estado	VRd,m (N)	θ	$\delta R_{d,2}$ (mm)	$\delta R_{d/H}$	η	VRd,f (N)	VRd (N)	V2 (N)	Estado	Trabajo Cortante	Área cubierta de fibra
MX-1	1,600	37,292.01	1.69	32,498.77	NO CUMPLE	32,498.77	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	46,768.38	37,292.01	CUMPLE	80%	15%
MX-2	1,600	34,981.27	1.69	26,740.42	NO CUMPLE	26,740.42	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	41,010.02	34,981.27	CUMPLE	85%	15%
MX-3	1,400	28,837.60	1.93	20,893.36	NO CUMPLE	20,893.36	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	33,777.85	28,837.60	CUMPLE	85%	16%
MX-4	1,400	27,746.62	1.93	21,834.77	NO CUMPLE	21,834.77	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	34,719.26	27,746.62	CUMPLE	80%	16%
MX-5	1,030	16,490.85	2.62	16,661.59	CUMPLE	16,661.59	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	16,661.59	16,490.85	CUMPLE	99%	0%
MX-6	1,030	18,901.61	2.62	19,506.98	CUMPLE	19,506.98	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	19,506.98	18,901.61	CUMPLE	97%	0%
MX-7	1,600	35,534.36	1.69	30,891.37	NO CUMPLE	30,891.37	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	45,160.98	35,534.36	CUMPLE	79%	15%
MX-8	1,600	36,480.41	1.69	31,402.31	NO CUMPLE	31,402.31	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	45,671.91	36,480.41	CUMPLE	80%	15%
MX-9	1,630	37,688.00	1.66	31,348.78	NO CUMPLE	31,348.78	58.88	7.80	0.0029	3	14,466.18	45,814.96	37,688.00	CUMPLE	82%	14%
MX-10	1,630	35,860.04	1.66	29,861.06	NO CUMPLE	29,861.06	58.88	7.80	0.0029	3	14,466.18	44,327.24	35,860.04	CUMPLE	81%	14%
MX-11	900	21,409.66	3.00	16,314.71	NO CUMPLE	16,314.71	71.57	11.50	0.0043	3	8,851.36	25,166.07	21,409.66	CUMPLE	85%	23%
MX-12	2,095	46,334.32	1.29	34,696.37	NO CUMPLE	34,696.37	52.19	7.13	0.0026	3	17,158.96	51,855.33	46,334.32	CUMPLE	89%	12%
MX-13	1,460	36,801.09	1.85	32,665.58	NO CUMPLE	32,665.58	61.60	8.25	0.0031	3	13,313.76	45,979.34	36,801.09	CUMPLE	80%	16%
MX-14	650	7,406.27	4.15	11,894.20	CUMPLE	11,894.20	76.46	15.17	0.0050	0	0.00	11,894.20	7,406.27	CUMPLE	62%	0%
MX-15	1,600	35,308.61	1.69	29,915.69	NO CUMPLE	29,915.69	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	44,185.30	35,308.61	CUMPLE	80%	15%

MX-16	1,600	36,154.24	1.69	33,355.56	NO CUMPLE	33,355.56	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	47,625.17	36,154.24	CUMPLE	76%	15%
MX-17	1,000	17,530.16	2.70	17,291.69	NO CUMPLE	17,291.69	69.68	10.60	0.0039	3	9,721.49	27,013.18	17,530.16	CUMPLE	65%	21%
MX-18	1,000	18,777.07	2.70	17,288.35	NO CUMPLE	17,288.35	69.68	10.60	0.0039	3	9,721.49	27,009.84	18,777.07	CUMPLE	70%	21%
MX-19	1,400	29,903.98	1.93	21,588.45	NO CUMPLE	21,588.45	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	34,472.94	29,903.98	CUMPLE	87%	16%
MX-20	650	7,558.47	4.15	12,608.52	CUMPLE	12,608.52	76.46	15.17	0.0050	0	0.00	12,608.52	7,558.47	CUMPLE	60%	0%
MX-21	1,600	38,606.29	1.69	34,386.41	NO CUMPLE	34,386.41	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	48,656.02	38,606.29	CUMPLE	79%	15%
MX-22	1,600	35,943.50	1.69	29,068.81	NO CUMPLE	29,068.81	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	43,338.41	35,943.50	CUMPLE	83%	15%
MX-23	1,400	30,378.82	1.93	23,966.49	NO CUMPLE	23,966.49	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	36,850.98	30,378.82	CUMPLE	82%	16%
MX-24	1,030	17,839.55	2.62	15,921.34	NO CUMPLE	15,921.34	69.12	10.36	0.0038	3	9,976.56	25,897.90	17,839.55	CUMPLE	69%	21%
MX-25	1,030	20,671.22	2.62	18,574.28	NO CUMPLE	18,574.28	69.12	10.36	0.0038	3	9,976.56	28,550.83	20,671.22	CUMPLE	72%	21%
	$\sum V_{ux} =$	710,436.03	$\sum V_{mrx} =$	611,175.87							$\sum VR_{dx} =$	884,523.21				
MY-1	1,150	13,538.36	2.35	18,027.86	CUMPLE	18,027.86	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	18,027.86	13,538.36	CUMPLE	75%	0%
MY-2	1,150	12,739.51	2.35	17,557.35	CUMPLE	17,557.35	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	17,557.35	12,739.51	CUMPLE	73%	0%
MY-3	2,460	36,999.38	1.10	39,701.98	CUMPLE	39,701.98	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	39,701.98	36,999.38	CUMPLE	93%	0%
MY-4	2,460	39,600.79	1.10	42,820.66	CUMPLE	42,820.66	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	42,820.66	39,600.79	CUMPLE	92%	0%
MY-5	2,460	34,198.70	1.10	40,454.56	CUMPLE	40,454.56	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	40,454.56	34,198.70	CUMPLE	85%	0%
MY-6	1,750	28,821.82	1.54	32,943.60	CUMPLE	32,943.60	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	32,943.60	28,821.82	CUMPLE	87%	0%
MY-7	1,750	27,287.96	1.54	28,485.42	CUMPLE	28,485.42	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	28,485.42	27,287.96	CUMPLE	96%	0%
MY-8	1,040	16,639.91	2.60	16,652.00	CUMPLE	16,652.00	68.93	10.29	0.0038	0	0.00	16,652.00	16,639.91	CUMPLE	100%	0%
MY-9	1,500	19,029.98	1.80	29,459.37	CUMPLE	29,459.37	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	29,459.37	19,029.98	CUMPLE	65%	0%
MY-10	2,000	31,827.65	1.35	36,004.50	CUMPLE	36,004.50	53.47	7.21	0.0027	0	0.00	36,004.50	31,827.65	CUMPLE	88%	0%
MY-11	2,000	29,371.28	1.35	30,643.67	CUMPLE	30,643.67	53.47	7.21	0.0027	0	0.00	30,643.67	29,371.28	CUMPLE	96%	0%
MY-12	800	6,620.37	3.38	11,427.62	CUMPLE	11,427.62	73.50	12.67	0.0047	0	0.00	11,427.62	6,620.37	CUMPLE	58%	0%
MY-13	1,500	28,085.44	1.80	31,825.97	CUMPLE	31,825.97	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	31,825.97	28,085.44	CUMPLE	88%	0%
MY-14	1,500	16,201.65	1.80	26,151.35	CUMPLE	26,151.35	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	26,151.35	16,201.65	CUMPLE	62%	0%

MY-15	1,500	22,548.90	1.80	21,555.60	NO CUMPLE	21,555.60	60.95	8.13	0.0030	3	13,593.37	35,148.97	22,548.90	CUMPLE	64%	15%
MY-16	1,500	24,501.11	1.80	25,987.03	CUMPLE	25,987.03	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	25,987.03	24,501.11	CUMPLE	94%	0%
MY-17	1,500	20,337.50	1.80	27,455.70	CUMPLE	27,455.70	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	27,455.70	20,337.50	CUMPLE	74%	0%
MY-18	800	11,257.44	3.38	12,676.62	CUMPLE	12,676.62	73.50	12.67	0.0047	0	0.00	12,676.62	11,257.44	CUMPLE	89%	0%
MY-19	2,450	46,505.45	1.10	50,528.03	CUMPLE	50,528.03	47.78	6.93	0.0026	0	0.00	50,528.03	46,505.45	CUMPLE	92%	0%
MY-20	1,040	30,257.51	2.60	20,008.34	NO CUMPLE	20,008.34	68.93	10.29	0.0038	5	16,768.26	36,776.60	30,257.51	CUMPLE	82%	31%
MY-21	2,460	35,140.14	1.10	37,730.64	CUMPLE	37,730.64	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	37,730.64	35,140.14	CUMPLE	93%	0%
MY-22	2,460	41,507.20	1.10	38,549.31	NO CUMPLE	38,549.31	47.66	6.93	0.0026	3	18,851.30	57,400.61	41,507.20	CUMPLE	72%	11%
MY-23	2,460	45,623.63	1.10	39,451.68	NO CUMPLE	39,451.68	47.66	6.93	0.0026	3	18,851.30	58,302.98	45,623.63	CUMPLE	78%	11%
MY-24	1,040	18,324.69	2.60	17,020.30	NO CUMPLE	17,020.30	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	27,081.25	18,324.69	CUMPLE	68%	21%
MY-25	1,150	20,820.77	2.35	19,824.70	NO CUMPLE	19,824.70	66.93	9.57	0.0035	3	10,968.40	30,793.10	20,820.77	CUMPLE	68%	19%
MY-26	1,500	26,953.75	1.80	34,130.37	CUMPLE	34,130.37	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	34,130.37	26,953.75	CUMPLE	79%	0%
MY-27	2,000	31,400.86	1.35	34,644.31	CUMPLE	34,644.31	53.47	7.21	0.0027	0	0.00	34,644.31	31,400.86	CUMPLE	91%	0%
MY-28	1,500	16,173.99	1.80	26,123.79	CUMPLE	26,123.79	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	26,123.79	16,173.99	CUMPLE	62%	0%
MY-29	1,500	22,326.88	1.80	21,472.05	NO CUMPLE	21,472.05	60.95	8.13	0.0030	3	13,593.37	35,065.42	22,326.88	CUMPLE	64%	15%
MY-30	2,000	30,047.84	1.35	30,422.10	CUMPLE	30,422.10	53.47	7.21	0.0027	0	0.00	30,422.10	30,047.84	CUMPLE	99%	0%
MY-31	1,040	17,041.00	2.60	15,440.62	NO CUMPLE	15,440.62	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	25,501.58	17,041.00	CUMPLE	67%	21%
MY-32	1,150	16,541.94	2.35	17,143.95	CUMPLE	17,143.95	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	17,143.95	16,541.94	CUMPLE	96%	0%
MY-33	1,310	26,127.44	2.06	25,450.84	NO CUMPLE	25,450.84	64.12	8.79	0.0033	3	12,218.36	37,669.21	26,127.44	CUMPLE	69%	17%
MY-34	2,460	34,491.04	1.10	39,905.42	CUMPLE	39,905.42	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	39,905.42	34,491.04	CUMPLE	86%	0%
MY-35	1,750	26,513.43	1.54	28,225.14	CUMPLE	28,225.14	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	28,225.14	26,513.43	CUMPLE	94%	0%
MY-36	1,750	28,419.16	1.54	32,523.85	CUMPLE	32,523.85	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	32,523.85	28,419.16	CUMPLE	87%	0%
	$\sum V_{uy} =$	933,824.44	$\sum V_{mry} =$	1,018,426.30							$\sum VR_{dy} =$	1,143,392.57				

Tabla 34. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo GFRP nivel 2 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTO MECÁNICO ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			REFORZAMIENTO FRP CNR DT200 R1/2013										
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	Relación de aspecto (H/L)	VR (N)	Estado	VRd,m (N)	θ	$\delta R_{d,2}$ (mm)	$\delta R_{d/H}$	η	VRd,f (N)	VRd (N)	V2 (N)	Estado	Trabajo Cortante	Área cubierta de fibra
MX-26	1,600	33,017.59	1.69	27,240.72	NO CUMPLE	27,240.72	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	41,510.33	33,017.59	CUMPLE	80%	15%
MX-27	1,600	34,950.28	1.69	23,577.43	NO CUMPLE	23,577.43	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	37,847.04	34,950.28	CUMPLE	92%	15%
MX-28	1,400	29,371.09	1.93	19,198.73	NO CUMPLE	19,198.73	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	32,083.22	29,371.09	CUMPLE	92%	16%
MX-29	1,400	27,857.53	1.93	20,002.03	NO CUMPLE	20,002.03	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	32,886.53	27,857.53	CUMPLE	85%	16%
MX-30	1,030	13,447.94	2.62	14,105.25	CUMPLE	14,105.25	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	14,105.25	13,447.94	CUMPLE	95%	0%
MX-31	1,030	13,102.06	2.62	16,898.61	CUMPLE	16,898.61	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	16,898.61	13,102.06	CUMPLE	78%	0%
MX-32	1,600	32,359.07	1.69	25,738.07	NO CUMPLE	25,738.07	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	40,007.67	32,359.07	CUMPLE	81%	15%
MX-33	1,600	33,370.53	1.69	23,906.07	NO CUMPLE	23,906.07	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	38,175.68	33,370.53	CUMPLE	87%	15%
MX-34	1,630	33,103.10	1.66	23,449.87	NO CUMPLE	23,449.87	58.88	7.80	0.0029	3	14,466.18	37,916.05	33,103.10	CUMPLE	87%	14%
MX-35	1,630	33,896.56	1.66	24,899.30	NO CUMPLE	24,899.30	58.88	7.80	0.0029	3	14,466.18	39,365.48	33,896.56	CUMPLE	86%	14%
MX-36	900	19,664.37	3.00	14,633.23	NO CUMPLE	14,633.23	71.57	11.50	0.0043	3	8,851.36	23,484.60	19,664.37	CUMPLE	84%	23%
MX-37	2,095	47,519.84	1.29	29,913.02	NO CUMPLE	29,913.02	52.19	7.13	0.0026	5	28,598.26	58,511.27	47,519.84	CUMPLE	81%	18%
MX-38	1,460	30,605.06	1.85	24,719.86	NO CUMPLE	24,719.86	61.60	8.25	0.0031	3	13,313.76	38,033.62	30,605.06	CUMPLE	80%	16%
MX-39	650	2,614.35	4.15	9,224.32	CUMPLE	9,224.32	76.46	15.17	0.0050	0	0.00	9,224.32	2,614.35	CUMPLE	28%	0%
MX-40	1,600	32,511.56	1.69	24,862.66	NO CUMPLE	24,862.66	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	39,132.27	32,511.56	CUMPLE	83%	15%

MX-41	1,600	29,627.24	1.69	24,816.34	NO CUMPLE	24,816.34	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	39,085.95	29,627.24	CUMPLE	76%	15%
MX-42	1,000	12,278.60	2.70	15,325.05	CUMPLE	15,325.05	69.68	10.60	0.0039	0	0.00	15,325.05	12,278.60	CUMPLE	80%	0%
MX-43	1,000	15,358.87	2.70	14,187.83	NO CUMPLE	14,187.83	69.68	10.60	0.0039	3	9,721.49	23,909.32	15,358.87	CUMPLE	64%	21%
MX-44	1,400	29,317.74	1.93	18,150.54	NO CUMPLE	18,150.54	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	31,035.03	29,317.74	CUMPLE	94%	16%
MX-45	650	2,398.02	4.15	9,816.56	CUMPLE	9,816.56	76.46	15.17	0.0050	0	0.00	9,816.56	2,398.02	CUMPLE	24%	0%
MX-46	1,600	31,018.90	1.69	25,408.03	NO CUMPLE	25,408.03	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	39,677.63	31,018.90	CUMPLE	78%	15%
MX-47	1,600	32,982.77	1.69	23,966.49	NO CUMPLE	23,966.49	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	38,236.10	32,982.77	CUMPLE	86%	15%
MX-48	1,400	26,268.85	1.93	19,133.59	NO CUMPLE	19,133.59	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	32,018.08	26,268.85	CUMPLE	82%	16%
MX-49	1,030	14,197.27	2.62	13,197.55	NO CUMPLE	13,197.55	69.12	10.36	0.0038	3	9,976.56	23,174.11	14,197.27	CUMPLE	61%	21%
MX-50	1,030	14,076.75	2.62	16,296.07	CUMPLE	16,296.07	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	16,296.07	14,076.75	CUMPLE	86%	0%
	$\sum V_{ux} =$	624,915.94	$\sum V_{mrx} =$	502,667.21							$\sum VR_{dx} =$	767,755.81				
MY-37	1,150	10,362.09	2.35	16,268.06	CUMPLE	16,268.06	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	16,268.06	10,362.09	CUMPLE	64%	0%
MY-38	1,150	10,016.99	2.35	15,592.40	CUMPLE	15,592.40	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	15,592.40	10,016.99	CUMPLE	64%	0%
MY-39	2,460	34,052.38	1.10	35,011.31	CUMPLE	35,011.31	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	35,011.31	34,052.38	CUMPLE	97%	0%
MY-40	2,460	36,813.84	1.10	36,706.30	NO CUMPLE	36,706.30	47.66	6.93	0.0026	3	18,851.30	55,557.60	36,813.84	CUMPLE	66%	11%
MY-41	2,460	31,199.53	1.10	35,463.45	CUMPLE	35,463.45	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	35,463.45	31,199.53	CUMPLE	88%	0%
MY-42	1,750	24,499.83	1.54	27,674.14	CUMPLE	27,674.14	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	27,674.14	24,499.83	CUMPLE	89%	0%
MY-43	1,750	27,586.67	1.54	25,225.55	NO CUMPLE	25,225.55	57.05	7.56	0.0028	3	15,223.89	40,449.43	27,586.67	CUMPLE	68%	14%
MY-44	1,040	17,533.98	2.60	14,621.64	NO CUMPLE	14,621.64	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	24,682.60	17,533.98	CUMPLE	71%	21%
MY-45	1,500	15,633.55	1.80	24,159.15	CUMPLE	24,159.15	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	24,159.15	15,633.55	CUMPLE	65%	0%
MY-46	2,000	34,204.49	1.35	30,105.69	NO CUMPLE	30,105.69	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	46,766.39	34,204.49	CUMPLE	73%	12%
MY-47	2,000	30,094.23	1.35	27,347.98	NO CUMPLE	27,347.98	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	44,008.67	30,094.23	CUMPLE	68%	12%
MY-48	800	3,818.12	3.38	10,664.86	CUMPLE	10,664.86	73.50	12.67	0.0047	0	0.00	10,664.86	3,818.12	CUMPLE	36%	0%
MY-49	1,500	23,560.06	1.80	25,680.63	CUMPLE	25,680.63	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	25,680.63	23,560.06	CUMPLE	92%	0%
MY-50	1,500	12,756.09	1.80	21,415.15	CUMPLE	21,415.15	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	21,415.15	12,756.09	CUMPLE	60%	0%

MY-51	1,500	23,177.21	1.80	19,579.41	NO CUMPLE	19,579.41	60.95	8.13	0.0030	3	13,593.37	33,172.78	23,177.21	CUMPLE	70%	15%
MY-52	1,500	18,223.29	1.80	22,838.87	CUMPLE	22,838.87	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	22,838.87	18,223.29	CUMPLE	80%	0%
MY-53	1,500	16,873.80	1.80	21,802.60	CUMPLE	21,802.60	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	21,802.60	16,873.80	CUMPLE	77%	0%
MY-54	800	8,976.90	3.38	10,772.59	CUMPLE	10,772.59	73.50	12.67	0.0047	0	0.00	10,772.59	8,976.90	CUMPLE	83%	0%
MY-55	2,450	41,172.59	1.10	39,594.95	NO CUMPLE	39,594.95	47.78	6.93	0.0026	3	18,809.31	58,404.26	41,172.59	CUMPLE	70%	11%
MY-56	1,040	29,119.06	2.60	17,304.39	NO CUMPLE	17,304.39	68.93	10.29	0.0038	5	16,768.26	34,072.65	29,119.06	CUMPLE	85%	31%
MY-57	2,460	32,389.57	1.10	32,773.56	CUMPLE	32,773.56	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	32,773.56	32,389.57	CUMPLE	99%	0%
MY-58	2,460	38,247.27	1.10	33,790.22	NO CUMPLE	33,790.22	47.66	6.93	0.0026	3	18,851.30	52,641.52	38,247.27	CUMPLE	73%	11%
MY-59	2,460	46,174.27	1.10	35,266.16	NO CUMPLE	35,266.16	47.66	6.93	0.0026	3	18,851.30	54,117.46	46,174.27	CUMPLE	85%	11%
MY-60	1,040	19,223.47	2.60	14,841.25	NO CUMPLE	14,841.25	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	24,902.21	19,223.47	CUMPLE	77%	21%
MY-61	1,150	20,575.22	2.35	16,813.97	NO CUMPLE	16,813.97	66.93	9.57	0.0035	3	10,968.40	27,782.37	20,575.22	CUMPLE	74%	19%
MY-62	1,500	20,388.99	1.80	27,027.06	CUMPLE	27,027.06	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	27,027.06	20,388.99	CUMPLE	75%	0%
MY-63	2,000	33,758.68	1.35	30,244.45	NO CUMPLE	30,244.45	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	46,905.15	33,758.68	CUMPLE	72%	12%
MY-64	1,500	12,636.84	1.80	21,381.09	CUMPLE	21,381.09	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	21,381.09	12,636.84	CUMPLE	59%	0%
MY-65	1,500	22,142.41	1.80	19,516.51	NO CUMPLE	19,516.51	60.95	8.13	0.0030	3	13,593.37	33,109.88	22,142.41	CUMPLE	67%	15%
MY-66	2,000	31,284.07	1.35	27,188.95	NO CUMPLE	27,188.95	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	43,849.65	31,284.07	CUMPLE	71%	12%
MY-67	1,040	17,250.67	2.60	14,016.84	NO CUMPLE	14,016.84	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	24,077.79	17,250.67	CUMPLE	72%	21%
MY-68	1,150	15,747.90	2.35	15,227.62	NO CUMPLE	15,227.62	66.93	9.57	0.0035	3	10,968.40	26,196.02	15,747.90	CUMPLE	60%	19%
MY-69	1,310	26,334.07	2.06	20,872.50	NO CUMPLE	20,872.50	64.12	8.79	0.0033	3	12,218.36	33,090.86	26,334.07	CUMPLE	80%	17%
MY-70	2,460	30,984.77	1.10	35,024.37	CUMPLE	35,024.37	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	35,024.37	30,984.77	CUMPLE	88%	0%
MY-71	1,750	26,253.26	1.54	25,018.25	NO CUMPLE	25,018.25	57.05	7.56	0.0028	3	15,223.89	40,242.13	26,253.26	CUMPLE	65%	14%
MY-72	1,750	25,478.05	1.54	27,322.89	CUMPLE	27,322.89	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	27,322.89	25,478.05	CUMPLE	93%	0%
	$\sum V_{uy} =$	868,544.19	$\sum V_{mry} =$	874,154.83							$\sum VR_{dy} =$	1,154,901.63				

Tabla 35. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo GFRP nivel 3 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTO MECÁNICO ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			REFORZAMIENTO FRP CNR DT200 R1/2013										
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	Relacion de aspecto (H/L)	VR (N)	Estado	VRd,m (N)	θ	$\delta R_{d,2}$ (mm)	$\delta R_{d,H}$	η	VRd,f (N)	VRd (N)	V2 (N)	Estado	Trabajo Cortante	Área cubierta de fibra
MX-51	1,600	26,340.05	1.69	21,813.60	NO CUMPLE	21,813.60	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	36,083.21	26,340.05	CUMPLE	73%	15%
MX-52	1,600	31,908.06	1.69	20,276.90	NO CUMPLE	20,276.90	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	34,546.51	31,908.06	CUMPLE	92%	15%
MX-53	1,400	28,225.47	1.93	17,085.81	NO CUMPLE	17,085.81	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	29,970.30	28,225.47	CUMPLE	94%	16%
MX-54	1,400	25,466.47	1.93	17,608.30	NO CUMPLE	17,608.30	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	30,492.79	25,466.47	CUMPLE	84%	16%
MX-55	1,030	9,656.21	2.62	11,917.70	CUMPLE	11,917.70	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	11,917.70	9,656.21	CUMPLE	81%	0%
MX-56	1,030	7,098.34	2.62	13,737.13	CUMPLE	13,737.13	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	13,737.13	7,098.34	CUMPLE	52%	0%
MX-57	1,600	27,422.02	1.69	20,672.61	NO CUMPLE	20,672.61	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	34,942.22	27,422.02	CUMPLE	78%	15%
MX-58	1,600	27,114.38	1.69	20,083.40	NO CUMPLE	20,083.40	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	34,353.01	27,114.38	CUMPLE	79%	15%
MX-59	1,630	26,663.28	1.66	19,908.17	NO CUMPLE	19,908.17	58.88	7.80	0.0029	3	14,466.18	34,374.35	26,663.28	CUMPLE	78%	14%
MX-60	1,630	31,133.24	1.66	20,272.91	NO CUMPLE	20,272.91	58.88	7.80	0.0029	3	14,466.18	34,739.09	31,133.24	CUMPLE	90%	14%
MX-61	900	16,157.72	3.00	12,372.12	NO CUMPLE	12,372.12	71.57	11.50	0.0043	3	8,851.36	21,223.48	16,157.72	CUMPLE	76%	23%
MX-62	2,100	47,676.46	1.29	26,041.48	NO CUMPLE	26,041.48	52.13	7.12	0.0026	5	28,640.81	54,682.28	47,676.46	CUMPLE	87%	18%
MX-63	1,460	24,719.01	1.85	18,493.78	NO CUMPLE	18,493.78	61.60	8.25	0.0031	3	13,313.76	31,807.53	24,719.01	CUMPLE	78%	16%
MX-64	650	1,531.99	4.15	8,032.94	CUMPLE	8,032.94	76.46	15.17	0.0050	0	0.00	8,032.94	1,531.99	CUMPLE	19%	0%
MX-65	1,600	26,804.39	1.69	20,135.22	NO CUMPLE	20,135.22	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	34,404.82	26,804.39	CUMPLE	78%	15%
MX-66	1,600	19,371.25	1.69	18,965.83	NO CUMPLE	18,965.83	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	33,235.44	19,371.25	CUMPLE	58%	15%

MX-67	1,000	7,563.76	2.70	12,651.29	CUMPLE	12,651.29	69.68	10.60	0.0039	0	0.00	12,651.29	7,563.76	CUMPLE	60%	0%
MX-68	1,000	11,015.70	2.70	11,786.27	CUMPLE	11,786.27	69.68	10.60	0.0039	0	0.00	11,786.27	11,015.70	CUMPLE	93%	0%
MX-69	1,400	29,348.82	1.93	17,051.13	NO CUMPLE	17,051.13	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	29,935.62	29,348.82	CUMPLE	98%	16%
MX-70	650	2,131.67	4.15	8,036.58	CUMPLE	8,036.58	76.46	15.17	0.0050	0	0.00	8,036.58	2,131.67	CUMPLE	27%	0%
MX-71	1,600	21,114.78	1.69	18,739.38	NO CUMPLE	18,739.38	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	33,008.98	21,114.78	CUMPLE	64%	15%
MX-72	1,600	28,080.53	1.69	19,346.88	NO CUMPLE	19,346.88	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	33,616.49	28,080.53	CUMPLE	84%	15%
MX-73	1,400	23,844.65	1.93	16,650.68	NO CUMPLE	16,650.68	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	29,535.17	23,844.65	CUMPLE	81%	16%
MX-74	1,030	9,730.25	2.62	11,212.72	CUMPLE	11,212.72	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	11,212.72	9,730.25	CUMPLE	87%	0%
MX-75	1,030	7,718.32	2.62	13,305.73	CUMPLE	13,305.73	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	13,305.73	7,718.32	CUMPLE	58%	0%
	$\sum V_{ux}$	517,836.83	$\sum V_{mrx}$	416,198.54							$\sum VR_{dx}$	661,631.64				
MY-73	1,150	8,556.88	2.35	13,971.16	CUMPLE	13,971.16	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	13,971.16	8,556.88	CUMPLE	61%	0%
MY-74	1,150	6,729.12	2.35	13,572.63	CUMPLE	13,572.63	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	13,572.63	6,729.12	CUMPLE	50%	0%
MY-75	2,460	28,544.39	1.10	30,195.91	CUMPLE	30,195.91	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	30,195.91	28,544.39	CUMPLE	95%	0%
MY-76	2,460	30,596.52	1.10	30,668.09	CUMPLE	30,668.09	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	30,668.09	30,596.52	CUMPLE	100%	0%
MY-77	2,460	24,845.81	1.10	30,410.96	CUMPLE	30,410.96	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	30,410.96	24,845.81	CUMPLE	82%	0%
MY-78	1,750	19,575.72	1.54	22,501.15	CUMPLE	22,501.15	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	22,501.15	19,575.72	CUMPLE	87%	0%
MY-79	1,750	24,672.92	1.54	21,842.62	NO CUMPLE	21,842.62	57.05	7.56	0.0028	3	15,223.89	37,066.51	24,672.92	CUMPLE	67%	14%
MY-80	1,040	18,501.60	2.60	13,128.70	NO CUMPLE	13,128.70	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	23,189.66	18,501.60	CUMPLE	80%	21%
MY-81	1,500	10,523.02	1.80	19,375.46	CUMPLE	19,375.46	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	19,375.46	10,523.02	CUMPLE	54%	0%
MY-82	2,000	36,962.11	1.35	24,776.27	NO CUMPLE	24,776.27	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	41,436.96	36,962.11	CUMPLE	89%	12%
MY-83	2,000	30,969.27	1.35	23,887.06	NO CUMPLE	23,887.06	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	40,547.76	30,969.27	CUMPLE	76%	12%
MY-84	800	830.13	3.38	9,564.16	CUMPLE	9,564.16	73.50	12.67	0.0047	0	0.00	9,564.16	830.13	CUMPLE	9%	0%
MY-85	1,500	18,618.89	1.80	20,130.81	CUMPLE	20,130.81	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	20,130.81	18,618.89	CUMPLE	92%	0%
MY-86	1,500	7,995.94	1.80	18,250.97	CUMPLE	18,250.97	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	18,250.97	7,995.94	CUMPLE	44%	0%
MY-87	1,500	22,784.65	1.80	17,372.95	NO CUMPLE	17,372.95	60.95	8.13	0.0030	3	13,593.37	30,966.32	22,784.65	CUMPLE	74%	15%

MY-88	1,500	11,446.80	1.80	18,686.39	CUMPLE	18,686.39	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	18,686.39	11,446.80	CUMPLE	61%	0%
MY-89	1,500	11,387.57	1.80	18,459.45	CUMPLE	18,459.45	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	18,459.45	11,387.57	CUMPLE	62%	0%
MY-90	800	6,531.22	3.38	9,183.91	CUMPLE	9,183.91	73.50	12.67	0.0047	0	0.00	9,183.91	6,531.22	CUMPLE	71%	0%
MY-91	2,450	37,426.95	1.10	30,417.24	NO CUMPLE	30,417.24	47.78	6.93	0.0026	3	18,809.31	49,226.55	37,426.95	CUMPLE	76%	11%
MY-92	1,040	23,806.41	2.60	14,602.73	NO CUMPLE	14,602.73	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	24,663.69	23,806.41	CUMPLE	97%	21%
MY-93	2,460	27,290.41	1.10	27,783.42	CUMPLE	27,783.42	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	27,783.42	27,290.41	CUMPLE	98%	0%
MY-94	2,460	32,334.65	1.10	29,374.61	NO CUMPLE	29,374.61	47.66	6.93	0.0026	3	18,851.30	48,225.91	32,334.65	CUMPLE	67%	11%
MY-95	2,460	44,048.20	1.10	30,849.01	NO CUMPLE	30,849.01	47.66	6.93	0.0026	3	18,851.30	49,700.31	44,048.20	CUMPLE	89%	11%
MY-96	1,040	19,526.49	2.60	12,803.63	NO CUMPLE	12,803.63	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	22,864.58	19,526.49	CUMPLE	85%	21%
MY-97	1,150	27,959.32	2.35	13,925.05	NO CUMPLE	13,925.05	66.93	9.57	0.0035	5	18,280.67	32,205.72	27,959.32	CUMPLE	87%	28%
MY-98	1,500	15,203.24	1.80	20,610.24	CUMPLE	20,610.24	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	20,610.24	15,203.24	CUMPLE	74%	0%
MY-99	2,000	35,377.95	1.35	25,765.85	NO CUMPLE	25,765.85	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	42,426.54	35,377.95	CUMPLE	83%	12%
MY-100	1,500	8,004.96	1.80	18,262.53	CUMPLE	18,262.53	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	18,262.53	8,004.96	CUMPLE	44%	0%
MY-101	1,500	21,614.52	1.80	17,350.85	NO CUMPLE	17,350.85	60.95	8.13	0.0030	3	13,593.37	30,944.22	21,614.52	CUMPLE	70%	15%
MY-102	2,000	33,975.70	1.35	23,812.53	NO CUMPLE	23,812.53	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	40,473.23	33,975.70	CUMPLE	84%	12%
MY-103	1,040	16,668.15	2.60	12,937.47	NO CUMPLE	12,937.47	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	22,998.42	16,668.15	CUMPLE	72%	21%
MY-104	1,150	14,092.34	2.35	13,553.97	NO CUMPLE	13,553.97	66.93	9.57	0.0035	3	10,968.40	24,522.37	14,092.34	CUMPLE	57%	19%
MY-105	1,310	29,061.98	2.06	16,684.87	NO CUMPLE	16,684.87	64.12	8.79	0.0033	5	20,363.94	37,048.80	29,061.98	CUMPLE	78%	25%
MY-106	2,460	23,631.75	1.10	30,099.21	CUMPLE	30,099.21	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	30,099.21	23,631.75	CUMPLE	79%	0%
MY-107	1,750	22,590.68	1.54	21,712.92	NO CUMPLE	21,712.92	57.05	7.56	0.0028	3	15,223.89	36,936.80	22,590.68	CUMPLE	61%	14%
MY-108	1,750	20,255.13	1.54	22,252.42	CUMPLE	22,252.42	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	22,252.42	20,255.13	CUMPLE	91%	0%
	$\sum V_{uy} =$	772,941.40	$\sum V_{mry} =$	738,777.17								$\sum VR_{dy} =$	1,009,423.21			

Tabla 36. Resistencia a cargas laterales de muros con refuerzo GFRP nivel 4 en dirección X y Y.

UBICACIÓN DE MUROS		ELEMENTO MECÁNICO ETABS	RESISTENCIA A CARGAS LATERALES			REFORZAMIENTO FRP CNR DT200 R1/2013										
Etiquetas	Longitud (mm)	V2 (N)	Relacion de aspecto (H/L)	VR (N)	Estado	VRd,m (N)	θ	$\delta R_{d,2}$ (mm)	$\delta R_{d/H}$	η	VRd,f (N)	VRd (N)	V2 (N)	Estado	Trabajo Cortante	Área cubierta de fibra
MX-76	1,600	12,267.42	1.69	16,684.37	CUMPLE	16,684.37	59.35	7.87	0.0029	0	0.00	16,684.37	12,267.42	CUMPLE	74%	0%
MX-77	1,600	16,625.00	1.69	16,598.68	NO CUMPLE	16,598.68	59.35	7.87	0.0029	3	14,269.61	30,868.29	16,625.00	CUMPLE	54%	15%
MX-78	1,400	15,597.46	1.93	14,376.70	NO CUMPLE	14,376.70	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	27,261.19	15,597.46	CUMPLE	57%	16%
MX-79	1,400	14,125.49	1.93	14,514.51	CUMPLE	14,514.51	62.59	8.44	0.0031	0	0.00	14,514.51	14,125.49	CUMPLE	97%	0%
MX-80	1,030	4,859.48	2.62	9,990.51	CUMPLE	9,990.51	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	9,990.51	4,859.48	CUMPLE	49%	0%
MX-81	1,030	3,936.39	2.62	10,810.77	CUMPLE	10,810.77	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	10,810.77	3,936.39	CUMPLE	36%	0%
MX-82	1,600	14,470.48	1.69	16,412.94	CUMPLE	16,412.94	59.35	7.87	0.0029	0	0.00	16,412.94	14,470.48	CUMPLE	88%	0%
MX-83	1,600	14,192.17	1.69	17,534.34	CUMPLE	17,534.34	59.35	7.87	0.0029	0	0.00	17,534.34	14,192.17	CUMPLE	81%	0%
MX-84	1,630	16,436.91	1.66	17,680.19	CUMPLE	17,680.19	58.88	7.80	0.0029	0	0.00	17,680.19	16,436.91	CUMPLE	93%	0%
MX-85	1,630	18,962.61	1.66	16,455.63	NO CUMPLE	16,455.63	58.88	7.80	0.0029	3	14,466.18	30,921.81	18,962.61	CUMPLE	61%	14%
MX-86	900	8,111.86	3.00	9,768.14	CUMPLE	9,768.14	71.57	11.50	0.0043	0	0.00	9,768.14	8,111.86	CUMPLE	83%	0%
MX-87	2,095	28,220.47	1.29	21,876.52	NO CUMPLE	21,876.52	52.19	7.13	0.0026	3	17,158.96	39,035.47	28,220.47	CUMPLE	72%	12%
MX-88	1,460	16,604.70	1.85	15,849.97	NO CUMPLE	15,849.97	61.60	8.25	0.0031	3	13,313.76	29,163.72	16,604.70	CUMPLE	57%	16%
MX-89	650	948.01	4.15	6,935.13	CUMPLE	6,935.13	76.46	15.17	0.0050	0	0.00	6,935.13	948.01	CUMPLE	14%	0%
MX-90	1,600	12,953.00	1.69	16,207.06	CUMPLE	16,207.06	59.35	7.87	0.0029	0	0.00	16,207.06	12,953.00	CUMPLE	80%	0%
MX-91	1,600	9,050.55	1.69	17,232.46	CUMPLE	17,232.46	59.35	7.87	0.0029	0	0.00	17,232.46	9,050.55	CUMPLE	53%	0%

MX-92	1,000	4,412.99	2.70	10,204.71	CUMPLE	10,204.71	69.68	10.60	0.0039	0	0.00	10,204.71	4,412.99	CUMPLE	43%	0%
MX-93	1,000	5,409.83	2.70	9,806.08	CUMPLE	9,806.08	69.68	10.60	0.0039	0	0.00	9,806.08	5,409.83	CUMPLE	55%	0%
MX-94	1,400	17,094.94	1.93	14,751.88	NO CUMPLE	14,751.88	62.59	8.44	0.0031	3	12,884.49	27,636.37	17,094.94	CUMPLE	62%	16%
MX-95	650	1,220.63	4.15	6,717.00	CUMPLE	6,717.00	76.46	15.17	0.0050	0	0.00	6,717.00	1,220.63	CUMPLE	18%	0%
MX-96	1,600	10,289.32	1.69	17,054.28	CUMPLE	17,054.28	59.35	7.87	0.0029	0	0.00	17,054.28	10,289.32	CUMPLE	60%	0%
MX-97	1,600	14,944.44	1.69	15,817.47	CUMPLE	15,817.47	59.35	7.87	0.0029	0	0.00	15,817.47	14,944.44	CUMPLE	94%	0%
MX-98	1,400	14,090.87	1.93	14,590.21	CUMPLE	14,590.21	62.59	8.44	0.0031	0	0.00	14,590.21	14,090.87	CUMPLE	97%	0%
MX-99	1,030	4,507.52	2.62	9,803.46	CUMPLE	9,803.46	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	9,803.46	4,507.52	CUMPLE	46%	0%
MX-100	1,030	3,683.67	2.62	10,621.99	CUMPLE	10,621.99	69.12	10.36	0.0038	0	0.00	10,621.99	3,683.67	CUMPLE	35%	0%
	$\sum V_{ux} =$	283,016.23	$\sum V_{mrx} =$	348,295.01							$\sum VR_{dx} =$	433,272.49				
MY-109	1,150	5,466.61	2.35	11,624.95	CUMPLE	11,624.95	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	11,624.95	5,466.61	CUMPLE	47%	0%
MY-110	1,150	3,026.33	2.35	11,613.52	CUMPLE	11,613.52	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	11,613.52	3,026.33	CUMPLE	26%	0%
MY-111	2,460	17,896.63	1.10	25,443.00	CUMPLE	25,443.00	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	25,443.00	17,896.63	CUMPLE	70%	0%
MY-112	2,460	15,778.79	1.10	24,942.07	CUMPLE	24,942.07	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	24,942.07	15,778.79	CUMPLE	63%	0%
MY-113	2,460	16,065.93	1.10	25,427.63	CUMPLE	25,427.63	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	25,427.63	16,065.93	CUMPLE	63%	0%
MY-114	1,750	10,287.75	1.54	17,829.85	CUMPLE	17,829.85	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	17,829.85	10,287.75	CUMPLE	58%	0%
MY-115	1,750	13,080.00	1.54	18,031.01	CUMPLE	18,031.01	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	18,031.01	13,080.00	CUMPLE	73%	0%
MY-116	1,040	13,135.01	2.60	11,062.06	NO CUMPLE	11,062.06	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	21,123.01	13,135.01	CUMPLE	62%	21%
MY-117	1,500	7,844.14	1.80	16,045.13	CUMPLE	16,045.13	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	16,045.13	7,844.14	CUMPLE	49%	0%
MY-118	2,000	25,971.81	1.35	20,332.88	NO CUMPLE	20,332.88	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	36,993.57	25,971.81	CUMPLE	70%	12%
MY-119	2,000	20,772.43	1.35	20,157.02	NO CUMPLE	20,157.02	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	36,817.72	20,772.43	CUMPLE	56%	12%
MY-120	800	1,035.97	3.38	8,173.51	CUMPLE	8,173.51	73.50	12.67	0.0047	0	0.00	8,173.51	1,035.97	CUMPLE	13%	0%
MY-121	1,500	12,087.86	1.80	16,029.15	CUMPLE	16,029.15	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	16,029.15	12,087.86	CUMPLE	75%	0%
MY-122	1,500	7,480.31	1.80	15,653.46	CUMPLE	15,653.46	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	15,653.46	7,480.31	CUMPLE	48%	0%
MY-123	1,500	14,244.24	1.80	14,879.56	CUMPLE	14,879.56	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	14,879.56	14,244.24	CUMPLE	96%	0%

MY-124	1,500	6,064.82	1.80	15,043.26	CUMPLE	15,043.26	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	15,043.26	6,064.82	CUMPLE	40%	0%
MY-125	1,500	10,467.80	1.80	16,051.83	CUMPLE	16,051.83	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	16,051.83	10,467.80	CUMPLE	65%	0%
MY-126	800	3,652.09	3.38	7,904.24	CUMPLE	7,904.24	73.50	12.67	0.0047	0	0.00	7,904.24	3,652.09	CUMPLE	46%	0%
MY-127	2,450	25,682.71	1.10	24,801.76	NO CUMPLE	24,801.76	47.78	6.93	0.0026	3	18,809.31	43,611.07	25,682.71	CUMPLE	59%	11%
MY-128	1,040	11,037.96	2.60	11,692.73	CUMPLE	11,692.73	68.93	10.29	0.0038	0	0.00	11,692.73	11,037.96	CUMPLE	94%	0%
MY-129	2,460	13,468.34	1.10	23,385.21	CUMPLE	23,385.21	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	23,385.21	13,468.34	CUMPLE	58%	0%
MY-130	2,460	21,241.77	1.10	25,034.70	CUMPLE	25,034.70	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	25,034.70	21,241.77	CUMPLE	85%	0%
MY-131	2,460	27,239.71	1.10	26,341.70	NO CUMPLE	26,341.70	47.66	6.93	0.0026	3	18,851.30	45,192.99	27,239.71	CUMPLE	60%	11%
MY-132	1,040	13,031.95	2.60	10,758.61	NO CUMPLE	10,758.61	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	20,819.56	13,031.95	CUMPLE	63%	21%
MY-133	1,150	22,081.61	2.35	11,536.36	NO CUMPLE	11,536.36	66.93	9.57	0.0035	3	10,968.40	22,504.76	22,081.61	CUMPLE	98%	19%
MY-134	1,500	10,328.45	1.80	15,923.65	CUMPLE	15,923.65	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	15,923.65	10,328.45	CUMPLE	65%	0%
MY-135	2,000	23,807.39	1.35	21,511.41	NO CUMPLE	21,511.41	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	38,172.10	23,807.39	CUMPLE	62%	12%
MY-136	1,500	7,726.65	1.80	15,639.27	CUMPLE	15,639.27	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	15,639.27	7,726.65	CUMPLE	49%	0%
MY-137	1,500	14,160.10	1.80	14,882.17	CUMPLE	14,882.17	60.95	8.13	0.0030	0	0.00	14,882.17	14,160.10	CUMPLE	95%	0%
MY-138	2,000	23,256.06	1.35	20,151.77	NO CUMPLE	20,151.77	53.47	7.21	0.0027	3	16,660.70	36,812.47	23,256.06	CUMPLE	63%	12%
MY-139	1,040	11,481.03	2.60	11,247.30	NO CUMPLE	11,247.30	68.93	10.29	0.0038	3	10,060.96	21,308.26	11,481.03	CUMPLE	54%	21%
MY-140	1,150	9,694.94	2.35	11,703.68	CUMPLE	11,703.68	66.93	9.57	0.0035	0	0.00	11,703.68	9,694.94	CUMPLE	83%	0%
MY-141	1,310	20,171.77	2.06	13,316.56	NO CUMPLE	13,316.56	64.12	8.79	0.0033	3	12,218.36	25,534.92	20,171.77	CUMPLE	79%	17%
MY-142	2,460	15,172.93	1.10	25,250.28	CUMPLE	25,250.28	47.66	6.93	0.0026	0	0.00	25,250.28	15,172.93	CUMPLE	60%	0%
MY-143	1,750	11,996.07	1.54	17,985.64	CUMPLE	17,985.64	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	17,985.64	11,996.07	CUMPLE	67%	0%
MY-144	1,750	11,545.65	1.54	17,723.27	CUMPLE	17,723.27	57.05	7.56	0.0028	0	0.00	17,723.27	11,545.65	CUMPLE	65%	0%
	$\sum Vuy=$	497,483.64	$\sum Vmry=$	615,130.21								$\sum VRdy=$	772,803.24			

4.3 Revisión de los desplazamientos

Se revisó que la rigidez lateral de la estructura sea suficiente para cumplir con las condiciones de servicio y de seguridad ante el colapso. Además, se verificó que los desplazamientos verticales de losas no excedan los límites establecidos en la normativa vigente.

4.3.1 Desplazamiento lateral para el límite de servicio

Este requisito establece que las diferencias entre los desplazamientos laterales de pisos consecutivos debidos a las fuerzas cortantes horizontales no excederán a 0.002 veces las diferencias de elevaciones correspondientes, salvo que no haya elementos incapaces de soportar deformaciones apreciables, como los muros de mampostería, o estos estén separados de la estructura principal de manera que no sufran daños por sus deformaciones. En este caso, el límite será de 0.004. En la **Figura 49** y **Figura 50**, se presentan los desplazamientos laterales de los entrepisos en las direcciones X y Y de la estructura prototipo, respectivamente.

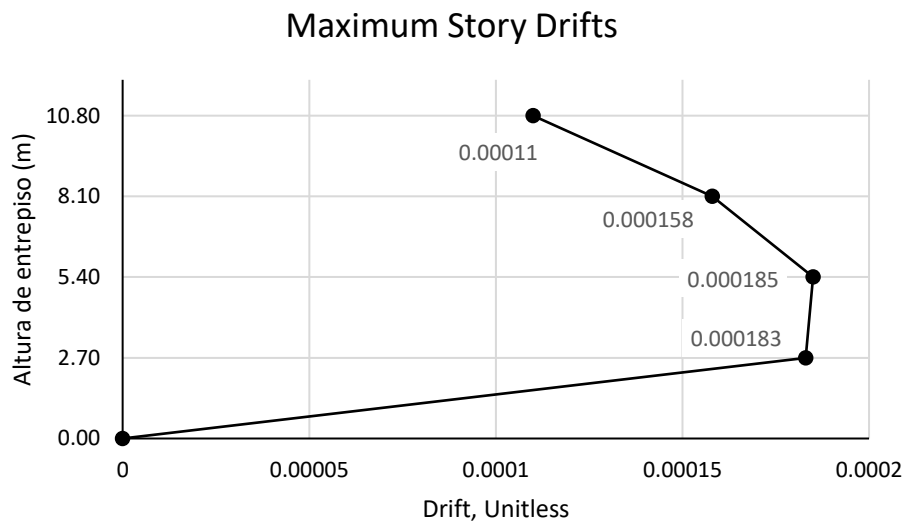


Figura 49. Gráfica de desplazamientos laterales para el estado límite de servicio dirección X.

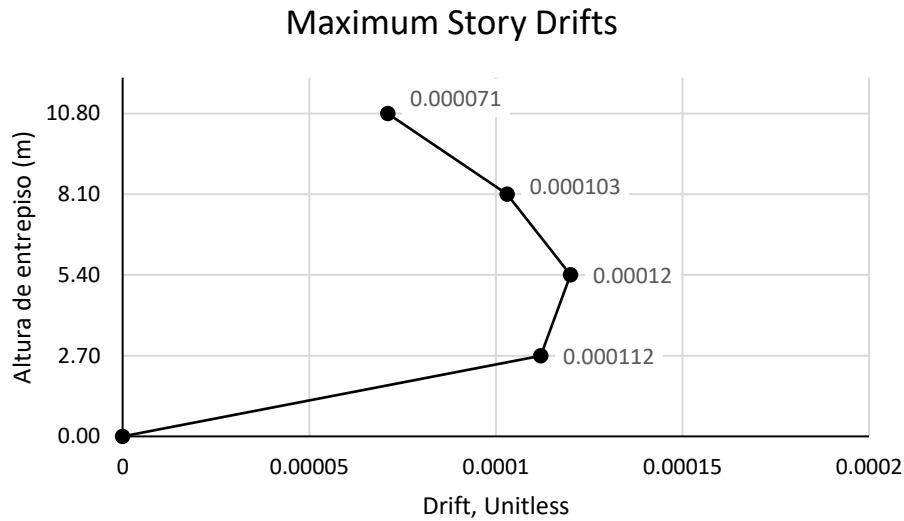


Figura 50. Gráfica de desplazamientos laterales para el estado límite de servicio dirección Y.

De acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (2015) [31], la distorsión máxima permisible para la estructura prototipo se establece en un valor de 0.002. En ambas direcciones de análisis, se determinó que la mayor distorsión se alcanzó en el primer entrepiso, alcanzando valores de 0.000185 y de 0.00012 para las direcciones X y Y, respectivamente. Estas distorsiones máximas son considerablemente inferiores al límite especificado por la normativa. Por tanto, se concluye que el criterio de distorsión permisible por el estado límite de servicio es satisfecho.

4.3.2 Desplazamientos laterales para seguridad contra el colapso

Las diferencias entre los desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas cortantes sísmicas de entrepiso, calculadas para las ordenadas espectrales modificadas $a\langle T_e, \beta \rangle / [Q'\langle T_e, Q \rangle R\langle T_e, R_o \rangle \rho]$ según corresponda, multiplicadas por el factor $QR\langle T_e, R_o \rangle \rho$ y divididas por la diferencia de elevaciones correspondiente, no debe exceder las distorsiones de entrepiso indicadas en la **Tabla 10**, según el sistema estructural correspondiente. El valor de $R\langle T_e, R_o \rangle$ se calculó para el periodo fundamental de la estructura.

Se empleó un factor reductor $Q'\langle T_e, Q \rangle$ igual a 1.16 y una sobre-resistencia total $R\langle T_e, R_o \rangle$ igual a 2.0. Ambos parámetros dependen directamente del período fundamental de la estructura (T_e), que en este caso fue de 0.24 segundos. Adicionalmente, para este análisis,

se utilizó un factor de redundancia (ρ) con un valor de 1.25. En las **Figura 51** y **Figura 52** se presentan los desplazamientos laterales en las direcciones X y Y, respectivamente, para la revisión del estado límite de seguridad contra el colapso.

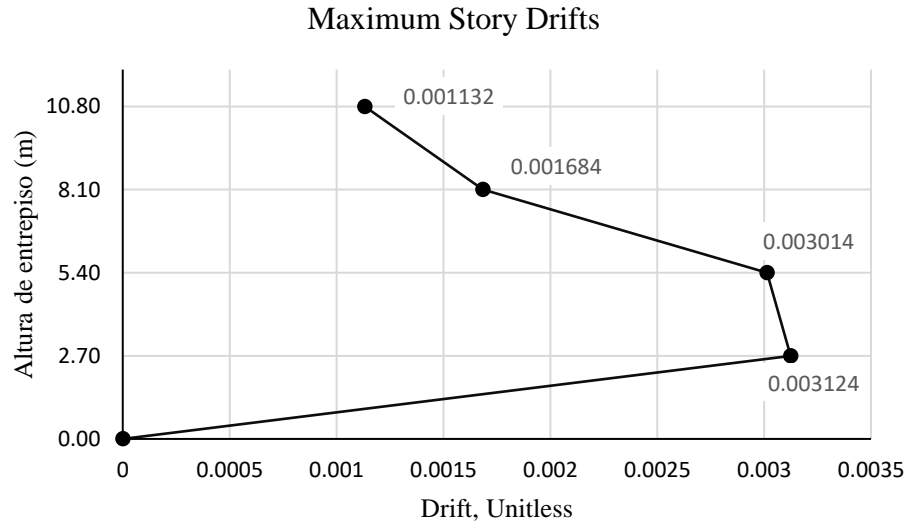


Figura 51. Gráfica de distorsiones de entrepisos para el estado límite de colapso dirección X.

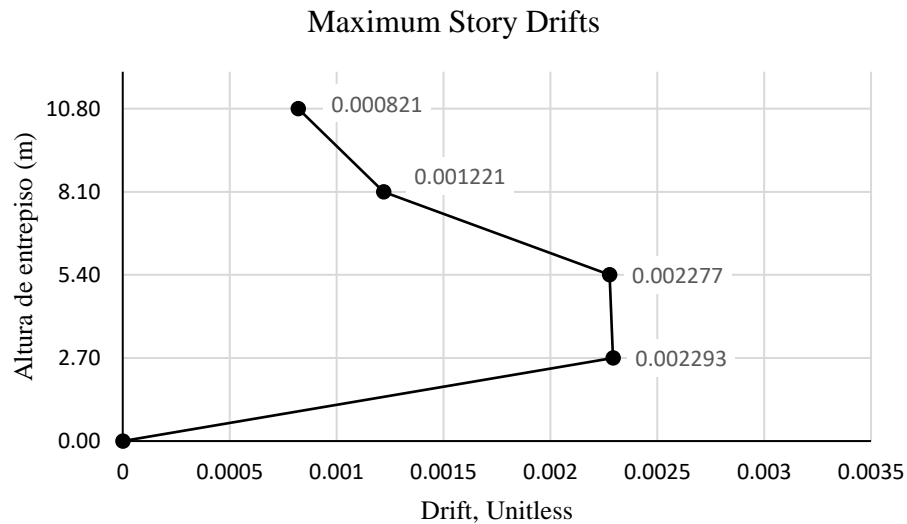


Figura 52. Gráfica de distorsiones de entrepisos para el estado límite de colapso dirección Y.

De acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (2015) [31], la distorsión máxima permisible es de 0.006. En este análisis, se determinó que, para la dirección X, la distorsión más crítica alcanzada fue de 0.003124, mientras que para la dirección Y fue de

0.002293, lo cual es considerablemente inferior al límite especificado por la normativa. Por tanto, se concluye que el criterio de distorsión permisible es satisfecho.

Estos valores sugieren un buen desempeño de la estructura frente a los desplazamientos laterales, evitando deformaciones excesivas que pudieran comprometer la integridad del sistema.

5 CONCLUSIONES

- A nivel global, existen pocas recomendaciones para el análisis y diseño de muros de mampostería reforzado con materiales compuestos. Se identificó solo un documento, la guía italiana CNR-DT 200 R1/2014, que puede aplicarse para la predicción de la resistencia de los especímenes ensayados en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Culiacán.
- La guía italiana CNR-DT 200 R1/2014 predice aceptablemente bien la contribución del refuerzo GFRP a la resistencia lateral de los muros mampostería de block. Para el espécimen MCB_FV10, la guía subestima la resistencia un 27%, mientras que para los muros MCB_FV30 y MCB_FV50 sobreestima un 17% y 13%, respectivamente.
- En este proyecto se plantea una metodología para la incorporación del refuerzo GFRP en el análisis y diseño de estructuras de mampostería. Consiste en los siguientes puntos: 1) realizar el análisis de la estructura por medio de un software comercial, no se requiere agregar elementos adicionales para representar al refuerzo, ya que este no afecta la rigidez de la estructura; 2) la resistencia a cortante de los muros es igual a la suma de la resistencia del panel de mampostería y la contribución del refuerzo GFRP; 3) La resistencia de la mampostería puede ser estimada con las ecuaciones de las normas mexicanas (NTC-mampostería, 2023) y la construcción del refuerzo se puede estimar con las especificaciones de la guía italiana CNR-DT 200 R1/2014; 4) Identificar la zona de esfuerzos de compresión en los muros producida por la carga lateral; 5) en la contribución del GFRP a la resistencia de cada muro, considerar un área efectiva del refuerzo, la cual se obtiene despreciando el material de refuerzo que se ubica en la zona de compresión.
- Los resultados experimentales muestran que el refuerzo a base de fibra de vidrio tiene efectos similares al refuerzo horizontal en la rigidez lateral, la capacidad de deformación, la ductilidad y agrietamiento en los muros. Por lo tanto, se recomienda que en el análisis y diseño se utilicen los mismos valores para el factor de

comportamiento sísmico ($Q = 2$) y distorsiones máximas ($\gamma_{max} = 0.006$) que para muros con refuerzo horizontal.

- Los resultados del análisis de la estructura prototipo indican que el diseño reforzado con GFRP cumple con los requisitos establecidos para el estado de servicio, al igual que el refuerzo horizontal, satisfaciendo de manera adecuada las exigencias previstas por las normativas de diseño vigentes.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] SMIE, “*Edificaciones de mampostería*”. Limusa, 1era. Ed. México. 419, 2019.
- [2] E. F. Espinosa Cazarín, A. Terán Gilmore, O. Zúñiga Cuevas y R. J. Perrilliat, “Consideraciones para el diseño sísmico de edificios altos de mampostería confinada ubicados en zonas sísmicas”. *Ing. Sísmica*. 90, 88-109, 2014.
- [3] S. Chandra Das y E. Haque Nizam, “Applications of Fiber Reinforced Polymer Composites (FRP) in Civil Engineering”. *Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng.* 3(3) 299-309, 2014.
- [4] R. Capuzocca, “Double-leaf masonry walls under in-plane loading strengthened with GFRP/SRG strips”. *Eng. Struct.* 128 453-473, 2016.
- [5] M. Corradi, A. Borri, G. Castori y R. Sisti, “Shear strengthening of wall panels through jacketing with cement mortar reinforced by GFRP grids”. *Compos. B Eng.* 64 33-42, 2014.
- [6] N. Gattesco, C. Amadio y C. Bedon, “Experimental and numerical study on the shear behavior of stone masonry walls strengthened with GFRP reinforced mortar coating and steel-cord reinforced repointing”. *Eng. Struct.* 90 143-157, 2015.
- [7] N. Gattesco y I. Boem, “Out-of-plane behavior of reinforced masonry walls: Experimental and numerical study”. *Compos. B Eng.* 128 39-52, 2017.
- [8] N. Reboul, A. S. Larbis y E. Ferrier, “Two-way bending behavior of hollow concrete block masonry walls reinforced by composites materials”. *Compos. B Eng.* 137 163-177, 2018.
- [9] NTC-EREEE, “*Norma Técnica Complementaria para Evaluación y Rehabilitación Estructural de Edificios Existentes*”. Gobierno de la Ciudad de México, Ciudad de México. 282, 2023.
- [10] ACI PRC-440.7R-22, “*Externally bonded Fiber Reinforced Polymer Systems Design and Construction for Strengthening Masonry Structures-Guide*”. American Concrete Institute (ACI). 1st Ed. United States of America. 77, 2010.
- [11] H. Gallegos y C. Casabonne, “*Albañilería estructural*”. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. 3era Ed. Perú. 444, 2005.
- [12] G. Schwegler, y P. Kelterborn, “Earthquake Resistance Of Masonry Structures Strengthened with Fiber Composites”, in *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*. México. 1996.
- [13] M. R. Eshani, H. Saadatmanesh y A. Al-Saidy, “Shear Behavior of URM Retrofitted with FRP Overlay”, *J. Compos. Constr.* 1(1) 17-25, 1997.
- [14] T. Triantafillou, “Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates”, *J. Compos. Constr.* 2(2) 96-104, 1998.
- [15] J. Velazquez, M. R. Eshani y H. Saadatmanesh, “Out-of-plane behavior of brick masonry walls strengthened with fiber composites”. *ACI Struct. J.* 97(3) 377-387,

2000.

- [16] B. Quiñónez, “*Comportamiento de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos sujetos a carga en el plano*”. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Sinaloa. México. 157, 2007.
- [17] P. Yu, P. Silva y A. Nanni, “In-plane response of URM walls strengthened with GFRP grid reinforced polyurea”. *10th North American Masonry Conference, USA*. 12, 2007.
- [18] M. El-Diasity, H. Okail, O. Kamal y M. Said, “Structural performance of confined masonry walls retrofitted using ferrocement and GFRP under in-plane cyclic loading”. *Eng Struct*. 94 54-69, 2015.
- [19] J.M. Leal-Graciano, B. Quiñónez, H.E. Rodríguez-Lozoya, J.J. Pérez-Gavilán y J.F. Lizárraga-Pereda, “Use of GFRP as retrofit alternative for confined masonry walls with window opening subjected to in-plane lateral load”. *Eng. Struct*. 223 1-17, 2020.
- [20] A. Mosallam y S. Banerjee, “Enhancement in in-plane shear capacity of unreinforced masonry (URM) walls strengthened with Fiber Reinforced Polymer composites”. *Compos. B Eng*. 42(6) 1657-1670, 2011.
- [21] I. Corbi, “FRP reinforcement of masonry panels by means of C-fiber strips”. *Compos. B Eng*. 47 348-356, 2013.
- [22] J. Guerreiro, J. Proenca, J. Gomes Ferreira y A. Gago, “Experimental characterization of in-plane behaviour of old masonry walls strengthened through the addition of CFRP reinforced render”. *Compos. B Eng*. 148 14-26, 2018.
- [23] NTC-DCEM, “*Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*”. Gobierno de la Ciudad de México, Ciudad de México. 119, 2023.
- [24] J. M. Leal Graciano, J.J. Pérez Gavilán, A. Reyes Salazar, J. Rivera Salas y J.R. Gaxiola Camacho, “Effects of concrete masonry infill walls with and without joint reinforcement on the cyclic behavior of RC frames”. *Eng. Struct*. 79, 2025.
- [25] E. Bazán Zurita y R. Meli Piralla, “*Diseño sísmico de estructuras*”. Limusa, 1ra Ed. México. 628, 2021.
- [26] L. Rubio Pérez, “*Contribución del refuerzo horizontal a la resistencia a corte de muros confinados de piezas de arcilla extruida*”. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 67, 2018.
- [27] J.J. Pérez Gavilán, L. Flores y A.I. Cruz, “Experimental study of in-plane shear strength of confined concrete masonry walls with joint reinforcement”. *Eng Struct*. 182 213-226, 2019.
- [28] J.J Pérez Gavilán y A.I Cruz, “Seismic performance of confined masonry walls with joint reinforcement and aspect ratio: An experimental study”. *Eng Struct*. 242, 2021.
- [29] D.C. García Leal, “*Ensayes de muros de block de concreto con refuerzo horizontal ante cargas laterales*”. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa.

- México. 66, 2023.
- [30] CNR-DT 200 R1/2014, “*Guía para el Diseño y Construcción de Sistemas FRP Pegados Externamente para el Reforzamiento de Estructuras Existentes*”. National Research Council (CNR). 165, 2014.
- [31] CFE, “*Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo*”. (INEEL). 1era Ed. México. 418, 2015.
- [32] NCh2123:1997 Mod 2003, “*Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo*”. Instituto Nacional de Normalización (INN). 2da Ed. Chile. 30, 2003.
- [33] AIS, “*Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*”. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). Colombia. 1625, 2010.
- [34] SENCICO, “*Reglamento Nacional de Edificaciones: Norma Técnica E.070: Albañilería*”. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO). 1ra Ed. Perú. 55, 2020.
- [35] INTI CIRSOC, “*Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería*”. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). 1ra Ed. Argentina. 68, 2007.
- [36] CFIA, “*Código Sísmico de Costa Rica*”. Tecnológica de Costa Rica. 4ta. Ed. Costa Rica. 400, 2010.
- [37] L. Abbott, “*Reglamento para construcciones en edificios de mampostería estructural*”. Secretaría de Estado de Obras Públicas y Comunicaciones (SEOPC). República dominicana. 103, 2004.
- [38] COVENIN 5008:2019, “*Análisis, diseño y construcción de edificaciones de mampostería estructural*”. Fondo de Desarrollo para la Normalización, Calidad, Certificación y Metrología (FODENORCA). Venezuela. 103, 2019.
- [39] K. Hoshimura, K. Kikuchi, y T.A. Sánchez. “*Normas de diseño para estructuras de mampostería del Instituto de Arquitectura del Japón*”. Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED), 1ra Ed. México. 133, 1994.
- [40] TMS 402/602-16, “*Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures*”, The Masonry Society. 2da. Ed. United States of America. 430, 2016.
- [41] S. Corrales, “*Ensayes ante carga lateral de muros confinados de mampostería de block reforzados con fibra de vidrio: 50%*”. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México. 77, 2023.
- [42] S. A. Zavala, “*Comportamiento de un muro de mampostería de block reforzado con GFRP, sujeto a carga lateral cíclica reversible en el plano*”. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México, 2012.
- [43] NMX-C-036-ONNCCE, “*Industria de la construcción – mampostería – resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines – método de ensayo*”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). 2013.
- [44] NMX-C-038-ONNCCE, “*Industria de la construcción – mampostería –*

- determinación de las dimensiones de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – método de ensayo*". Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). 2013.
- [45] NMX-C-061-ONNCCE, "*Industria de la construcción–cemento-determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*". Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). 2001.
- [46] NMX-C-083-ONNCCE, "*Industria de la construcción–concreto–determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto–método de prueba*". Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). 2014.
- [47] NMX-C-109-ONNCCE, "*Industria de la construcción - concreto hidráulico - cabeceo de especímenes*". Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). 2001.
- [48] NMX-C-128-ONNCCE, "*Industria de la construcción–concreto sometido a compresión–determinación del módulo de elasticidad estático y relación de poisson*". Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). 2013.
- [49] NMX-C-163-ONNCCE, "*Industria de la construcción–concreto- determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto*". Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). 1997.
- [50] NMX-C-404-ONNCCE, "*Industria de la construcción - mampostería - bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural - especificaciones y métodos de ensayo*". Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). 2012.
- [51] NMX-C-464-ONNCCE, "*Industria de la construcción–mampostería–determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulos de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto*". Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). México. 24, 2010.
- [52] NTC-Concreto, "*Norma Técnica complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*". Gaceta Oficial de la Ciudad de México, México. 2017.
- [53] CFE, "Programa de Diseño Sísmico (PRODISIS)". INEEL. México, 2015.
- [54] NTC-CADEE, "*Norma Técnica Complementaria sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de Edificaciones*". Gobierno de la Ciudad de México, México. 22, 2023.

7 ANEXOS

A continuación, se presenta el análisis de las deformaciones y fuerzas que se desarrollan en el refuerzo GFRP adherido a un muro de mampostería sujeto a carga lateral. Considere la banda inclinada de fibra de vidrio unida al muro que se muestra en la **Figura A1**.

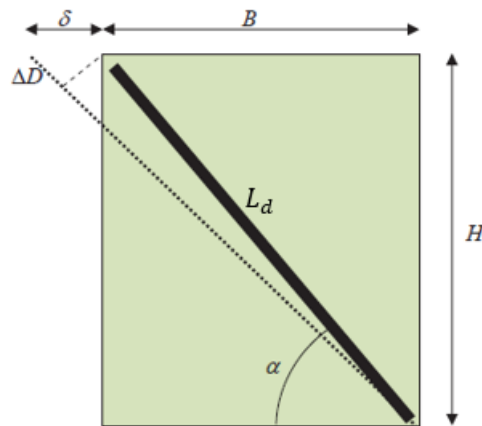


Figura A1. Muro reforzado con FRP inclinado por un ángulo α [30].

Las dimensiones del panel de mampostería son B (ancho) y H (alto). El elemento de refuerzo tiene una longitud inclinada L_d , la cual se determina a partir de la siguiente relación trigonométrica básica:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \alpha &= \frac{H}{L_d} \\ L_d &= \frac{H}{\operatorname{sen} \alpha} \end{aligned} \quad (\text{A1})$$

Donde α es el ángulo de inclinación de la banda de GFRP. Al estar sometido a una carga lateral, el muro desarrolla la deformación lateral δ y la banda de refuerzo un alargamiento ΔD . De forma análoga, al observar las condiciones de deformación de sistema, se obtiene que:

$$\begin{aligned} \operatorname{cos} \alpha &= \frac{\Delta D}{\delta} \\ \Delta D &= \delta \operatorname{cos} \alpha \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

Tomando en cuenta que la banda de GFRP es un elemento uniaxial y que tiene comportamiento elástico-lineal hasta la falla, es posible aplicar la Ley de Hooke uniaxial (ecuación A3).

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (A3)$$

Donde σ_f es el esfuerzo en el material compuesto, E_f es su módulo de elasticidad y ε_f su deformación unitaria. Considerando la condición límite en la que ocurre el despegamiento del refuerzo GFRP, su esfuerzo alcanza la resistencia de diseño por despegamiento ($\sigma_f = f_{fdd}$), con lo que se obtienen las ecuaciones A4 y A5.

$$f_{fdd} = E_f \varepsilon_f \quad (A4)$$

$$\varepsilon_f = \frac{f_{fdd}}{E_f} \quad (A5)$$

Por otro lado, la deformación unitaria del refuerzo puede expresarse en función del alargamiento relativo como (ecuación A6):

$$\varepsilon_f = \frac{L_f - L_i}{L_i} = \frac{\Delta D}{L_d} \quad (A6)$$

Sustituyendo las ecuaciones A1 y A2 en A6 resulta:

$$\varepsilon_f = \frac{\delta \cos \alpha}{H} = \frac{\delta \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha}{H}$$

Despejando el desplazamiento lateral y sustituyendo la ecuación A5:

$$\delta = \varepsilon_f \frac{H}{\cos \alpha \operatorname{sen} \alpha} = \frac{f_{fdd}}{E_f} \frac{H}{\cos \alpha \operatorname{sen} \alpha}$$

$$\delta = \delta_{Rd,2} = \frac{f_{fdd} \cdot H}{E_f \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha} \quad (A7)$$

La ecuación A7 corresponde a la ecuación 39 de esta tesis, donde $\delta = \delta_{Rd,2}$ es el desplazamiento lateral del muro al despegamiento del GFRP. La guía italiana CNR-DT 200 R1/2014 [30] establece un valor límite para el desplazamiento lateral al despegamiento $\delta_{Rd,1} = 0.005 \cdot H$, ya que un muro de mampostería difícilmente alcanza su resistencia máxima a un desplazamiento mayor a dicho límite. Por lo tanto, se establece que la distorsión lateral del muro al despegamiento del GFRP (δ_{Rd}/H) es (ecuación 8):

$$\frac{\delta_{Rd}}{H} = \frac{1}{H} \min\{\delta_{Rd,1}, \delta_{Rd,2}\} = \min\left\{0.005, \frac{f_{fdd}}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha}\right\} \quad (A8)$$

Con base en lo anterior, podemos despejar f_{fdd} de modo que (ecuación 9):

$$f_{fdd} = \frac{\delta_{Rd} E_f \cos\alpha \operatorname{sen}\alpha}{H} = \frac{\delta_{Rd}}{H} \cos\alpha \operatorname{sen}\alpha E_f \quad (\text{A9})$$

En la **Figura A2**, se muestra la disposición de las bandas diagonales de GFRP en un muro, donde puede observarse la inclinación de cada banda.

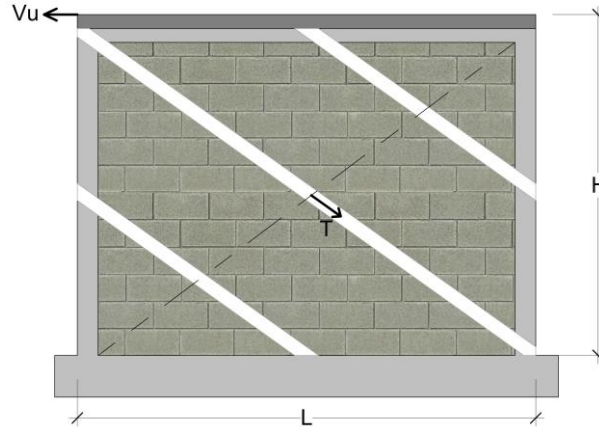


Figura A2. Distribución de bandas diagonales de GFRP en muro de mampostería.

Ahora bien, la fuerza resistente al despegamiento de la i -ésima banda inclinada (T_i) es (ecuación A10):

$$T_i = f_{fdd} A_{fi} \quad (\text{A10})$$

Donde A_{fi} es el área transversal de la i -ésima banda de GFRP.

La contribución al cortante de la i -ésima banda de material compuesto (V_{Rdi}) es la componente horizontal de T_i (ecuación A11).

$$V_{Rdi} = T_i \cos\alpha \quad (\text{A11})$$

En la **Figura A3** se ilustra la descomposición de la fuerza resistente en sus componentes horizontal y vertical, siendo la componente horizontal la que contribuye al cortante del muro.

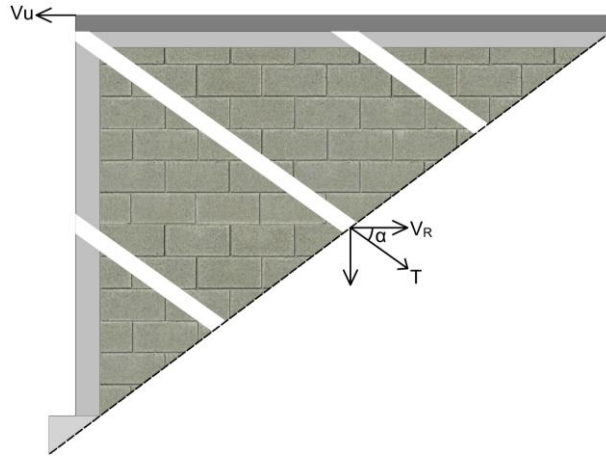


Figura A3. Componente de la fuerza T_i en una banda inclinada de GFRP.

Sustituyendo T las ecuaciones A9 y A10 en A11 se obtiene (ecuación 12):

$$V_{Rdi} = \left(\frac{\delta_{Rd}}{H} \cos\alpha \operatorname{sen}\alpha E_f \right) A_{fi} \cos\alpha$$

$$V_{Rdi} = \frac{\delta_{Rd}}{H} (\operatorname{sen}\alpha \cos^2\alpha \cdot E_f \cdot A_{fi}) \quad (\text{A12})$$

Por lo tanto, la contribución del GFRP a la resistencia a cortante a un muro de mampostería ($V_{Rd,f}$) se obtiene al sumar las componentes horizontales de la fuerza desarrollada por cada banda de material compuesto. Esto es (ecuación 13):

$$V_{Rd,f} = \sum_{i=1}^n V_{Rdi} = \frac{\delta_{Rd}}{H} (\operatorname{sen}\alpha \cos^2\alpha \cdot E_f) \cdot \sum_{i=1}^n A_{fi} \quad (\text{A13})$$

Donde n representa el número de bandas inclinadas de GFRP empleadas como refuerzo. La sumatoria en el lado derecho de la ecuación A13 representa el área total de material compuesto (A_f). Por lo que se deriva la ecuación A14, la cual es igual a la ecuación 41 de esta tesis y que se establece en la guía italiana CNR-DT 200 R1/2014 [30].

$$V_{Rd,f} = \frac{\delta_{Rd}}{H} (\operatorname{sen}\alpha \cos^2\alpha \cdot E_f \cdot A_f) \quad (\text{A14})$$