CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERIA ESTRUCTURAL CON BLOQUES DE PLÁSTICO RECICLADO

Trabajo de Grado

David Alexander Molina Laverde

Director:

Albert R. Ortiz, PhD

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Santiago de Cali

Enero 2025

1. RESUMEN

Es un hecho el incremento de la contaminación y los residuos en el planeta, especialmente en el sector de la construcción, que es en gran parte responsable de esta situación al estar ligado al avance de la sociedad. Sin embargo, muchas organizaciones y empresas trabajan para reducir las cifras de contaminación y la huella ambiental del sector de la construcción. Es por ello que la empresa Green Solutions, en busca de una alternativa para aprovechar los residuos plásticos, creó bloques de plástico reciclado con perforaciones verticales. El sistema constructivo de estos bloques es similar al de los Lego, por lo que no es necesario utilizar mortero para unir los bloques. El presente trabajo busca caracterizar y definir ecuaciones que predigan el comportamiento de estos bloques de plástico reciclado de forma individual y conjunta, a partir de datos recolectados mediante ensayos específicos para el material en bloques, muretes y muros a escala real. Esta investigación se centra en el análisis y comportamiento de la mampostería estructural frente a fuerzas de cortante y flexión. Además, se realiza diseño estructural de una vivienda de una planta fabricada con bloques de plástico reciclado, aplicando las propiedades encontradas durante la investigación.

Palabras clave: *Bloques de plástico reciclado, mampostería estructural, diseño estructural.*

TABLA DE CONTENIDO

Página

1. RESUMEN 1
LISTA DE TABLAS 5
LISTA DE FIGURAS 7
2. INTRODUCCIÓN 9
3. Planteamiento del problema 11
4. JUSTIFICACIÓN 13
5. OBJETIVOS 14
5.1. Objetivos generales 14
5.2. Objetivos específicos 14
6. ALCANCE 15
7. MARCO DE REFERENCIA 16
7.1. Antecedentes 16
7.2. Estado del arte 16
8. MARCO TEÓRICO 20
8.1. Mampostería 20
8.1.1. Tipos de mampostería 21
8.1.2. Modos de falla 22
8.2. Diseño por Esfuerzos de Trabajo Admisibles 23
8.2.1. Esfuerzos Admisibles Descritos en la NSR-10 23
8.3. Normatividad 26
8.3.1. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) 26
8.3.2. Norma mínima de diseño y construcción de mampostería de Nicaragua 27

Page

8.3.3. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería de México . . . 27
8.4. Bloque de plástico reciclado PLOCK . . . 28
8.5. Caracterización del material . . . 29
8.5.1. Resistencia a tensión . . . 29
8.5.2. Prueba de Creep a flexión . . . 31
8.6. Caracterización Bloques . . . 32
8.6.1. Resistencia a la compresión . . . 33
8.6.2. Resistencia a Flexión . . . 34
8.6.3. Prueba de adherencia . . . 35
8.6.4. Ensayo a cortante . . . 38
8.7. Ensayos sobre muretes . . . 39
8.7.1. Compresión en muretes . . . 39
8.7.2. Compresión diagonal en muretes . . . 40
8.8. Ensayos Muro a escala real . . . 43
9. Metodología . . . 45
9.1. Propiedades mecánicas y físicas . . . 45
9.1.1. Módulo de rotura . . . 45
9.1.2. Ensayo de resistencia a la compresión instrumentado . . . 46
9.2. Cortante . . . 52
9.2.1. Cortante por unidad de celda . . . 52
9.2.2. Definición de la ecuación . . . 54
9.3. Flexión . . . 59
9.3.1. Derivación de Fórmulas a Flexión . . . 59
9.4. Análisis de los muros de bloque de plástico reciclado . . . 63
10. Diseño de Estructura Residencial . . . 65
10.1. Predimensionamiento . . . 66
10.1.1. Avalúo de cargas gravitacionales . . . 66

Page

10.1.2. Obtención de la amenaza sísmica y valores de A_a y A_v 68
10.1.3. Movimientos sísmicos de diseño 68
10.1.4. Irregularidad estructural 69
10.1.5. Método de la Fuerza horizontal 70
10.1.6. Parámetros de diseño 71
10.2. Diseño Muros 72
10.2.1. Cálculo de centro de Rigidez de Muros 72
10.2.2. Centro de Masa Casa 75
10.2.3. Excentricidad 77
10.2.4. Cálculo de fuerzas y momentos actuantes en cada muro 77
10.2.5. Chequeo Derivas 81
10.2.6. Diseño Muro Estructural 83
10.2.7. Diseño Losa 83
10.2.8. Diseño dinteles 85
11. Conclusiones 88
BIBLIOGRAFÍA 91

LISTA DE TABLAS

Tabla Página

8.1. Valor del cortante nominal resistido por la mampostería, V_m. Fuente NSR-10 (2010) . . . 26

8.2. Resistencia a tensión en plástico de probetas tipo I según ASTM, D 638 (2014) . . . 30

8.3. Resistencia a tensión en plástico de probetas tipo I según ASTM, D 638 (2014) escalada longitudinalmente . . . 31

8.4. Resistencia a compresión en bloques B1 . . . 34

8.5. Módulos de elasticidad de bloques B1 . . . 34

8.6. Factores de corrección altura contra espesor, para la resistencia a la compresión de muretes de mampostería. NTC-3495 (2003) . . . 40

8.7. Resultados obtenidos del ensayo a compresión diagonal en muretes con mortero inyectado . . . 42

8.8. Resultados obtenidos del ensayo a compresión diagonal en muretes sin mortero inyectado . . . 43

8.9. Valores para carga máxima resistida por los muros a escala real . . . 44

9.1. Resultados ensayo a flexión . . . 45

9.2. Datos obtenidos ensayos de compresión . . . 49

9.3. Comparación de módulos de elasticidad obtenidos del ensayo a la compresión instrumentado en bloques . . . 49

9.4. Resistencia a compresión en muretes con refuerzo bloques B1 . . . 50

9.5. Resistencia a compresión en muretes sin refuerzo . . . 50

9.6. Módulos de elasticidad y resistencia a la compresión de la mampostería . . . 51

9.7. Fuerza máxima a cortante . . . 53

9.8. Datos de los ensayos realizados a cortante . . . 56

9.9. Valores del cortante resistido por la mampostería por metro lineal o cantidad de bloques . . . 57

Tabla Página

9.10. Comparación de los valores obtenidos de la carga máxima y % de error en las diferentes ecuaciones correspondientes a la interpolación realizada para cada valor de cortante resistida V_m. 58

9.11. Valores de la carga máxima y % de error correspondientes a la interpolación realizada para cada valor de cortante resistida V_m. 59

10.1. Cálculo espesor efectivo muros en X 73

10.2. Cálculo espesor efectivo muros en Y 73

10.3. Cálculo de la Rigidez de cada muro en la dirección X 74

10.4. Cálculo de la rigidez de los muros en la dirección Y 74

10.5. Cálculo de Centro de Masa Placa 76

10.6. Cálculo de centro de Masa Edificación 76

10.7. Cortantes y momentos de Muros en X 78

10.8. Cortantes y momentos de Muros en Y 79

10.9. Combinaciones de carga 80

10.10Solicitaciones 81

10.11Desplazamiento horizontal debido a la acción del sismo en el centro de masa 82

10.12Desplazamiento adicional por efecto torsional 82

10.13Desplazamientos máximos en los nodos 83

LISTA DE FIGURAS

Figura Página

7.1. Sistema constructivo desarrollado por Conceptos Plásticos 18
7.2. Sistema constructivo desarrollado por Green Solutions 18
7.3. Sistema unión mecánica en un murete Vargas García et al. (2015). 19
8.1. Fallas típicas en muros de mampostería: (a) Deslizamiento; (b) Flexión; (c) Aplastamiento; (d) Cortante; (e) Tensión diagonal. Mistler (2006) . . . 22
8.2. Dimensiones bloques, UniPlock y DuoPlock 28
8.3. Geometría probetas 30
8.4. Curva Esfuerzo-Deformación de probetas a tensión: a) probetas longitudinales. b) Probetas verticales 31
8.5. Curva de fluencia lenta a) Carga 1.8 Kg. b) Carga 1.2 Kg. c) Carga 0.6 Kg. 32
8.6. Montaje ensayo a compresión instrumentado 33
8.7. Montaje flexión. 35
8.8. a) Componentes del montaje b) Montaje de prueba de adherencia c) probetas a ensayar 37
8.9. Configuraciones del ensayo. a) 6 bloques, b) 3 bloques 38
8.10. Montaje compresión en murete horizontal 40
8.11. Montaje compresión diagonal en muretes 41
8.12. Montaje muros a escala real. 43
8.13. Ensayo del Muro 2 a escala real 44
9.1. a) Galga extensiometrica. b) Caja de puente Wheatstone. 47
9.2. a) Instrumentación bloque. b) falla del bloque. 47
9.3. Gráficas Esfuerzo - Deformación de los bloques 48
9.4. a) Instrumentación del murete. b) falla del murete. 51
9.5. Superposición de las gráficas obtenidas de los 3 ensayos realizados a muretes 52

Figura Página

9.6. Tipos de falla a) 3 bloques, b) 6 bloques 53
9.7. Gráfico del análisis por cantidad de celdas 53
9.8. Falla en las pestañas de los bloques 56
9.9. Relación entre ensayos de cortante. 57
9.10. Localización eje neutro para una viga. Amrhein (2009) 60
9.11. Bloque de esfuerzos a compresión para una viga en flexión. Amrhein (2009) 61
9.12. Representación de esfuerzos y deformaciones en una viga. Amrhein (2009) 61
9.13. Comportamiento de los muros frente a la carga lateral aplicada 64
10.1. Planta general y numeración de muros 65
10.2. Espectro de diseño de acuerdo a la microzonificación sísmica de Cali, zona 6.70
10.3. Hoja de Cálculo Muro 8x 84
10.4. Distribución paneles para diseño 85
10.5. Corte transversal losa con detalle de refuerzo 85

2. INTRODUCCIÓN

La mampostería es un sistema tradicional de construcción compuesto de materiales de origen pétreo unido ACI-Committee-318 (2014)con mortero de cemento y que adopta las características individuales de los elementos que lo conforman. Han sido muchos los materiales usados en la mampostería a lo largo de la historia. Entre los materiales más comunes en mampostería están los ladrillos, piedras de construcción como el mármol, granito y piedra caliza, piedra fundida, bloques de hormigón, bloques de vidrio y tapial (Rodríguez Miranda, 2015). La norma NSR-10 (2010) reconoce los siguientes tipos de mampostería estructural: mampostería de cavidad reforzada, reforzada, parcialmente reforzada, no reforzada, de muros confinados, de muros diafragma y externamente reforzada.

El uso de la mampostería se remonta hace miles de años, desde las antiguas civilizaciones egipcias, romanas y americanas. Inicialmente las construcciones se llevaban a cabo por el método de ensayo y error, esto sirvió para definir reglas y costumbres para construir. Más recientemente se definió el método elástico para diseño de estructuras de mampostería, en el que se limitan los esfuerzos de trabajo a valores menores que ciertos valores admisibles. El método de resistencia última empezó a usarse solo hasta hace algunas décadas en la mampostería, en este se pretende aprovechar la resistencia de los materiales y establecer factores de seguridad establecidos por varios estados limite, las cargas de diseño se mayoran y las resistencias de diseño se minoran multiplicando por factores mayores y menores que la unidad, respectivamente. (Alcocer, 1997)

Con el trascurso de los años el proceso de fabricación de materiales para la mampostería ha ido evolucionando. Sin embardo debido al cambio climático, la escasez de recursos, materia prima y los residuos generados por la sociedad, se ha optado por reutilizar los residuos de plástico como material alternativo para construcción de bloques para mampostería. Estos materiales son relativamente nuevos y carecen de estudios que caractericen su comportamiento y puedan ser regulados por las normas.

A partir de ensayos realizados en la laboratorio de estructuras de la Universidad del Valle a muros de bloques de plástico reciclado. Se buscará en esta investigación caracterizar y definir ecuaciones que predigan el comportamiento de estos muros de bloques de plástico reciclado. Se espera que los parámetros encontrados puedan servir para definir requisitos mínimos como guía para la reglamentación del diseño de este tipo sistema constructivo.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de la construcción constituye una de las actividades productivas más sustanciales del mundo, representando más del 10 % del producto bruto global. Esto muestra la importancia que tiene esta industria en la sociedad (Pertuz, 2010). Además de su impacto en el sector económico se le suma el impacto social, gracias a la transformación de la sociedad con grandes obras. Sin embargo con el fin de satisfacer necesidades primarias, el avance científico y tecnológico ha permitido transformar el espacio geográfico a través de la explotación y transformación de los recursos naturales. Este proceso ha causado alteraciones irremediables en los ecosistemas. Para Pertuz (2010) en términos generales se puede decir que el sector de la construcción es responsable del 50 % de los recursos naturales empleados, el 40 % de la energía consumida (incluyendo la energía en uso) y del 50 % de los residuos generados. Para el desarrollo de la sociedad y avance de las grandes ciudades se usan y desechan gran cantidad de materiales, de los cuales muchos no son aprovechables. Según Zaman y Lehmann (2011) en la superficie del mundo, las ciudades cubren sólo el 2 % sin embargo, generan alrededor del 70 % de los residuos del mundo.

Para contrarrestar el efecto de la contaminación, conservar los recursos naturales y la energía, en los últimos años se ha venido realizando investigaciones para encontrar soluciones alternativas que aporten a la fabricación de materia prima y disminución de la contaminación. Gracias a la innovación y tecnología desarrollada, ha permitido reciclar plástico para utilizar en el sector de la construcción, no solo en la parte arquitectónica sino también en la estructural. Muchas de las aplicaciones que tienen estos plásticos reciclados son, como por ejemplo, en muros, pinturas, estructura, techos, entre otros.

Green Solutions desarrolló un sistema constructivo a base de bloques con plástico reciclado para mampostería estructural. Estos bloques tienen muchas cualidades y ventajas frente a los bloques comunes de arcilla. Algunas de las ventajas y cualidades son la alta resistencia a la compresión, construcción rápida, resistentes a la humedad y bloques livianos. Empíricamente, esta alternativa ha presentado un buen desempeño

ante las cargas vivas y muertas adicionales típicas. Sin embargo, este comportamiento debe ser validado a la luz de los códigos actuales de diseño y construcción. El programa de Ingeniería Civil y Geomática ha realizado una serie de ensayos a muros de bloques plásticos, muretes y bloques individualmente para recopilar información sobre su comportamiento. Estos ensayos permiten identificar el comportamiento del material; sin embargo, aún no existen métodos de análisis y diseño que puedan ser utilizados para desarrollar proyectos de este tipo de materiales.

A partir de lo anteriormente expuesto, surge la siguiente pregunta problema:

¿Cómo estimar el comportamiento a flexión y compresión de muros de bloques de plástico reciclado?

4. JUSTIFICACIÓN

El el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (2010), Título D establece los requisitos mínimos de diseño y construcción para las estructuras de mampostería y sus elementos. En este título se referencia las normas Técnicas Colombianas NTC del Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, y de la sociedad Americana para ensayos de Materiales, ASTM. Los materiales base para definir estas normas son los más comunes en la industria de la construcción como lo son los bloques de hormigón y cerámicos.

El surgimiento de nuevas materias primas o materiales alternativos para la construcción ha ido en aumento gracias al desarrollo tecnológico y la necesidad de dar un nuevo uso a los residuos generados por la actividad humana. Los muros de mampostería en bloques plásticos son una solución práctica y económica para los problemas que se presentan en la sociedad. Sin embargo no se han realizado estudios analíticos que propongan ecuaciones que puedan ser usadas para el diseño. Se debe realizar mas investigaciones y experimentos con estos materiales para definir unos requisitos mínimos de diseño. Se espera que los resultados obtenidos en esta investigación puedan ser de utilidad para futuras investigaciones y la reglamentación en la norma de este material para su uso y diseño en la mampostería.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivos generales

Desarrollar expresiones para el análisis y diseño de estructuras de mampostería construidas con bloques de plástico reciclado.

5.2 Objetivos específicos

- Desarrollar modelos constitutivos del material que permitan desarrollar parámetros utilizados en la modelación del comportamiento mecánico del material.
- Definir expresiones para el comportamiento a flexión y cortante de muros de plástico reciclado.
- Caracterizar expresiones analíticas a partir de ensayos experimentales en probetas de muros de plástico reciclado.
- Realizar el análisis estructural de una estructura construida con bloques de plástico reciclado.

6. ALCANCE

Los requisitos de análisis y diseño del Título D de la NSR-10 (2010) están basados en el método del estado límite de resistencia. No obstante, se permite el diseño de estructuras de mampostería por el método de esfuerzos admisibles. Este último método es también llamado método elástico, método de las cargas de servicio o método ASD, por su nombre en inglés (*Allowable Stresses Design*)

El diseño por el método elástico, como su nombre lo indica, parte de la suposición de que los materiales son homogéneos e isótropos y presentan un comportamiento elástico durante la aplicación de las acciones al elemento, lo que permite predecir fácilmente que será lineal la distribución de esfuerzos en la sección compuesta. Para garantizar que ambos materiales se mantendrán en el rango elástico, se restringe el valor máximo permitido para el esfuerzo actuante en cualquier punto de la sección a un valor establecido para cada material, llamado *esfuerzo admisible*. (Lamus Báez y Andrade Pardo, 2020).

El estudio se elaborará con los datos experimentales recopilados por el Laboratorio de Estructuras de la Universidad del Valle en los ensayos hechos a los muros de bloques de plástico reciclado. Para mejorar la precisión de los resultados obtenidos, estos datos experimentales serán ajustados para posteriormente realizar el ajuste de las expresiones de diseño a flexión y cortante. Esta investigación buscará a partir de los métodos de diseño estudiar el comportamiento y predicción de los esfuerzos a flexión y cortante de muros de bloques de plástico reciclado.

7. MARCO DE REFERENCIA

7.1 Antecedentes

En su tesis de maestría, Gutíerrez Junco (2003) presenta el problema y la solución denominados «Mampostería estructural». Este documento consta de cuatro partes. La primera corresponde a la introducción del tema. En la segunda se presentan conceptos generales de mampostería estructural relevantes en la fase de experimentación. La tercera trata el desarrollo analítico del sistema estructural, que establece la solución en ciertas circunstancias de estructuras espaciales mediante un proceso manual que, si bien es aproximado, lleva, en general, a resultados bastante aceptables. La última parte presenta la fase de diseño, que se basa en las dos anteriores: la experimental y la analítica. Consta de ejemplos ilustrados con los métodos por esfuerzos admisibles y por esfuerzos últimos. Finalmente, realiza un diseño completo de una edificación de cinco niveles de manera manual con el método de esfuerzos últimos y se comparan los resultados con los obtenidos mediante el programa de diseño estructural ETABS. Su aporte es fundamental para la siguiente investigación, ya que sentará las bases para llevar a cabo las fases experimental, analítica y de diseño. Sin embargo, su diseño se basa en los requisitos de la NSR-98, por lo que debe ajustarse a lo requerido en la NSR-10. Para entender de manera más detallada el comportamiento de estructuras de mampostería y su diseño, se hacen relevantes los gráficos, tablas, coeficientes y datos de diseño. Estos son aportados por el (Manual de ingeniería de mampostería reforzada: mampostería de arcilla y hormigón, sexta edición, Amrhein (2009). En este se tratan temas como la resistencia de los materiales de muros de mampostería, acero de refuerzo y resistencia a cargas laterales. Adicionalmente, reserva un capítulo para tratar el tema de diseño por esfuerzos admisibles con ayuda de ejemplos.

7.2 Estado del arte

Se estima que el ámbito de la construcción es el responsable de alrededor del 23 % de la contaminación atmosférica, Del Valle Rios et al. (2024). Por este motivo, muchos investigadores se han adherido al compromiso de crear nuevos tipos de bloques

que, sin perder prestaciones mecánicas, comprendan procesos de construcción más ecológicos y sostenibles. A partir de esto, surgen los ladrillos ecológicos, cuya característica esencial se basa en el uso de materiales reciclables. Estos no requieren una gran inversión y se fabrican con rapidez. Además, su ligereza y adaptabilidad dimensional de acuerdo a las necesidades arquitectónicas establecidas López Pareja y Rojas Trejos (2019). Algunos bloques están elaborados con cenizas de carbón, cáñamo y paja, arena comprimida y plásticos reciclados.

En otros lugares del mundo también se ha desarrollado diferentes alternativas para disminuir la contaminación creada por la cantidad de plásticos sin reutilizar. Gaggino (2008) en Bangladesh, investigaron el potencial de los materiales poliméricos de desecho reciclados como sustitutos de los áridos en el hormigón. En el experimento se reciclaron y utilizaron dos tipos diferentes de residuos de polímeros, a saber, residuos de envases a base de poliuretano formaldehído (PUF) y polietileno de alta densidad (HDPE). Rahman et al. (2012) en su publicación trata sobre una investigación llevada a cabo por el CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica) de Argentina. La cual desarrolla bloques híbridos, usando plástico reciclado con mezclas cementicias. ByFusion Global, Inc. es una compañía fundada en los Estados Unidos en 2017, la cual desarrolló un proyecto que crea bloques con el 100 % de plástico reciclado llamado ByBlock. Este es un sistema de mampostería estructural con barras de refuerzo pos-tensadas. Tiene una resistencia a la compresión de 2,81MPa y un módulo de elasticidad de 14,81MPa. Dada su baja resistencia, es ideal para muros acústicos, cobertizos, muros decorativos, entre otros.

En Colombia, si bien el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de materias primas del tipo subproductos es incipiente, empresas como Conceptos Plásticos, Ficidet y Green Solutions, investigaron y desarrollaron ya proyectos sostenibles con plástico reciclado. Brick and Blocks se denomina el sistema de construcción de Conceptos Plásticos Fig. 7.1. Este es un sistema modular tipo Lego, siendo muy eficiente y práctico; con este sistema se han construido alojamientos, escuelas y bodegas, todos estos de un piso de altura. Tiene una resistencia a la compresión de 23MPa y un módulo de elasticidad de 1300MPa.

Green Solutions creó un sistema constructivo llamado Plock con un sistema modular tipo Lego similar al realizado por Conceptos Plásticos, a diferencia de que estos

son de perforación vertical, por ende se pueden usar para mampostería estructural como se puede observar en la Fig. 7.2. Según el fabricante del bloque, con este sistema se pueden construir casas de hasta 2 niveles de altura.



Figura 7.1.: Sistema constructivo desarrollado por Conceptos Plásticos



Figura 7.2.: Sistema constructivo desarrollado por Green Solutions

Sin embargo, estos proyectos carecen de regulaciones y especificaciones en las normas. Al ser elaborados con materiales innovadores, se deben realizar diferentes estudios para poder definir criterios de diseño. Adicionalmente, en la literatura investigada no se encuentra registro de algún estudio que busque predecir y definir criterios de diseño para este tipo de estructuras elaboradas a partir de materiales nuevos.

Vargas García et al. (2015): En su investigación llamada Sistema modular de piezas de mampostería en plástico poliestireno unidas mecánicamente, desarrolla una propuesta para diseñar y fabricar piezas de mampostería hechas con materiales de plástico reciclado, exactamente de los pertenecientes a la familia de los poliestirenos (cucharas, tenedores y platos desechables). Estos bloques realizados son unidos mediante un sistema mecánico de perno ajustado a presión como se ilustra en la Fig. 7.3. Para las unidades de mampostería de plástico reciclado se realizaron pruebas de resistencia a compresión, ensayo a flexión, absorción de agua y ensayo de resistencia al fuego, mostrando poca resistencia a compresión y buen desempeño en las otras pruebas. Para los muretes de mampostería de plástico reciclado se estudió la flexión y deformación en las cuales se evidenció buen comportamiento.

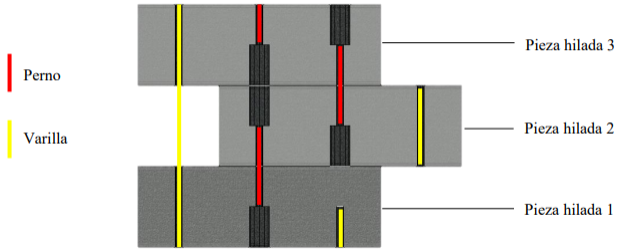


Figura 7.3.: Sistema unión mecánica en un murete Vargas García et al. (2015).

8. MARCO TEÓRICO

8.1 Mampostería

La mampostería es un sistema constructivo que consiste en levantar muros mediante la colocación manual de piezas o bloques que pueden ser de distintos materiales, tamaños o formas, estos a su vez se denominan también mampuestos, estas unidades están trabadas o adheridas entre si con algún material, como el mortero de barro o cemento. Este sistema fue creado por el hombre a fin de satisfacer sus necesidades, principalmente de vivienda.

Su historia se remonta a miles de años atrás, las primeras unidades de albañilería artificial consistió de una masa amorfa de barro secada al sol, vestigios de esta unidad han sido encontrados en las ruinas de Jericó (Medio Oriente), 7350 años a.C. Es interesante destacar que antiguamente las unidades no tenían una forma lógica, llegándose a encontrar unidades de forma cónica en lugares y épocas distintas: en la Mesopotamia (7000 años de antigüedad) y en Huaca Prieta, Perú (5000 años de antigüedad), San Bartolomé Ramos (1994). Registros de piedras cortadas o talladas datan de hace más de 4500 años, un ejemplo notable son las pirámides de Egipto. En Mesopotamia, el Imperio Romano, y otras civilizaciones antiguas, la mampostería se convirtió en una técnica de construcción ampliamente utilizada. Los romanos, en particular, desarrollaron técnicas avanzadas de construcción con piedra, que incluían el uso de mortero para unir las piedras. Durante la Edad Media, la mampostería continuó siendo una técnica importante en la construcción de castillos, fortalezas y catedrales en toda Europa. Estas estructuras eran a menudo construidas con piedras talladas y unidas con mortero de cal. Con el renacimiento y el avance de la arquitectura, la mampostería seguía siendo una técnica de construcción importante. Sin embargo con el surgimiento de nuevos materiales y sistemas de construcción, como el hormigón armado y el acero, que comenzó a tomar fuerza en la construcción de grandes estructuras. Actualmente la mampostería sigue siendo ampliamente usada en la construcción de edificaciones, tanto en su forma tradicional como en combinación

con otros materiales modernos.

8.1.1 Tipos de mampostería

La NSR-10 (2010) define los siguientes tipos de mampostería estructural:

- Mampostería de cavidad reforzada: Es la construcción realizada con dos paredes de piezas de mampostería de caras paralelas reforzadas ó no, separadas por un espacio continuo de concreto reforzado. con funcionamiento compuesto.
- Mampostería reforzada: Es la construcción con base en piezas de mampostería de perforación vertical, unidas por medio de mortero, reforzada internamente con barras y alambres de acero y que cumple los requisitos del capítulo D.7.
- Mampostería parcialmente reforzada: Es la construcción con base en piezas de mampostería de perforación vertical, unidas por medio de mortero, reforzada internamente con barras y alambres de acero y que cumple los requisitos del capítulo D.8.
- Mampostería no reforzada: Es la construcción con base en piezas de mampostería unidas por medio de mortero que no cumple las cuantías mínimas de refuerzo establecidas para la mampostería parcialmente reforzada.
- Mampostería de muros confinados: Es la construcción con base en piezas de mampostería unidas por medio de mortero, reforzada de manera principal con elementos de concreto reforzado construidos alrededor del muro, confinándolo.
- Mampostería de muros diafragma: Se llaman muros diafragma de mampostería a aquellos muros colocados dentro de una estructura de pórticos, los cuales restringen su desplazamiento libre bajo cargas laterales.
- Mampostería reforzada externamente: Es la construcción de mampostería en donde el refuerzo se coloca dentro de una capa de revoque (pañete) fijándolo al muro de mampostería mediante conectores y/o clavos.

8.1.2 Modos de falla

En la mampostería hay ciertos tipos de falla predominantes en las estructuras, estas fallas pueden tener diferentes causas, como lo son: la carga vertical, las cuantías de refuerzo horizontal y vertical, la adherencia entre las piezas y el mortero, los miembros de confinamiento, entre otras. En muros de mampostería comúnmente se presentan las siguientes falla típicas por sismo en el plano:

a. **Corte por Deslizamiento:** se produce cuando ocurre un deslizamiento horizontal debido a la poca adherencia entre el mortero y las piezas de mampostería.

b. **Flexión:** esta se presenta cuando la resistencia a cortante de la mampostería es muy alta y las cargas generan un momento superior al cortante.

c. **Aplastamiento:** este tipo de falla se produce debido a los esfuerzos de flexo-compresión en el talón comprimido.

d. **Cortante:** este tipo de falla es la más común en muros de mampostería. Se presenta cuando los esfuerzos verticales y horizontales superan la resistencia a tensión de la mampostería. Se caracteriza por grietas que pasan por la diagonal a través de las juntas de los bloques de manera escalonada.

e. **Tensión diagonal:** también llamado compresión diagonal, es una falla que se presenta debido a los esfuerzos de tensión perpendiculares a la falla y compresión en el plano de falla.

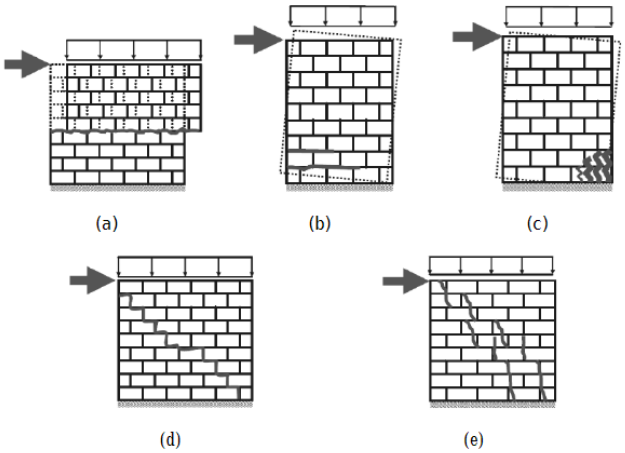


Figura 8.1.: Fallas típicas en muros de mampostería: (a) Deslizamiento; (b) Flexión; (c) Aplastamiento; (d) Cortante; (e) Tensión diagonal. Mistler (2006)

8.2 Diseño por Esfuerzos de Trabajo Admisibles

El método de esfuerzos admisibles ASD (Allowable Stress Design) es una técnica comúnmente utilizada en ingeniería estructural para el diseño de elementos estructurales, incluida la mampostería. Este método se basa en permitir que el material estructural experimente ciertos niveles de esfuerzos sin exceder su capacidad de resistencia.

8.2.1 Esfuerzos Admisibles Descritos en la NSR-10

Este método es descrito en la NSR-10 (2010) en su Apéndice D-1. Se dan a continuación los principios generales, las principales fórmulas y valores de esfuerzos admisibles a tener como referencia, y las combinaciones de carga que especifica la norma en el numeral B.2.3.

Principios Generales

1. Las secciones planas permanecen planas antes, durante y después de la flexión.
2. El esfuerzo y la deformación son proporcionales a la distancia del eje neutro.
3. El módulo de elasticidad es constante en el miembro.
4. La mampostería no soporta esfuerzos de tracción.
5. La luz del elemento es grande comparada con la profundidad (excepto, posiblemente, los muros de cortante).
6. Los elementos de mampostería se combinan para formar un elemento homogéneo e isótropo.
7. Los momentos y fuerzas externos e internos están en equilibrio.
8. El acero se tensa alrededor del centro de gravedad.
9. El miembro es recto y de sección uniforme.

Combinaciones de Carga

Las combinaciones de carga para ser utilizadas con el método de esfuerzos de trabajo son las siguientes:

- D+F
- D+H+F+L+T
- D+H+F+(L_r ó G ó L_e)
- D+H+F+0.75(L+T)+0.75(L_r ó G ó L_e)
- D+H+F+W
- D+H+F+0.7E
- D+H+F+0.75W+0.75L+0.75(L_r ó G ó L_e)
- D+H+F+0.75(0.7E)+0.75L+0.75(L_r ó G ó L_e)
- 0.6D+W+H
- 0.6D+0.7E+H

El diseño debe hacerse para la combinación que produzca el efecto más desfavorable.

Esfuerzo Admisible para Compresión Axial

$$F_a = 0{,}20 * f'_m * R_e \tag{8.1}$$

donde:

$$R_e = 1 - \left(\frac{h'}{42t}\right)^2 \quad \text{Para} \quad h'/t \leq 30$$

$$R_e = \left(\frac{21t}{h'}\right)^2 \quad \text{Para} \quad h'/t > 30$$

Esfuerzo Admisible para Compresión por Flexión

$$F_b = 0{,}33 * f'_m \leq 14MPa \tag{8.2}$$

Esfuerzos combinados - Ecuación fundamental

Cuando se combinen los esfuerzos de compresión por carga axial y por flexión, se debe utilizar un procedimiento apropiado basado en los principios de mecánica de sólidos. En su defecto se pueden verificar los esfuerzos por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1{,}0 \tag{8.3}$$

Esfuerzo Cortante Admisible en Muros de Mampostería con Refuerzo

Esfuerzo cortante solicitado:

$$f_v = \frac{V}{bjd} \tag{8.4}$$

En donde **j** se puede tomar como 0.8 en caso de no realizar un análisis de compatibilidad de deformaciones. Para miembros con secciones en **T** o **I** , se deben reemplazar **b** por **bw**.

Cuando la mampostería toma todo el cortante:

$$\frac{M}{Vd} < 1{,}0 \quad F_v = \left(4 - \frac{M}{Vd}\right)\frac{\sqrt{f'_m}}{40} \leq \left(0{,}6 - 0{,}3\frac{M}{Vd}\right) Mpa \tag{8.5}$$

$$\frac{M}{Vd} \geq 1{,}0 \quad F_v = \frac{\sqrt{f'_m}}{12} \leq 0{,}25 Mpa \tag{8.6}$$

Cuando el refuerzo toma todo el cortante:

$$\frac{M}{Vd} < 1{,}0 \quad F_v = \left(4 - \frac{M}{Vd}\right)\frac{\sqrt{f'_m}}{24} \leq \left(0{,}84 - 0{,}3\frac{M}{Vd}\right) Mpa \tag{8.7}$$

$$\frac{M}{Vd} \geq 1{,}0 \quad F_v = \frac{\sqrt{f'_m}}{8} \leq 0{,}52 Mpa \tag{8.8}$$

La cantidad de refuerzo transversal requerido se debe calcular mediante la siguiente expresión:

$$A_v = \frac{f_v b_w s}{F_s} \tag{8.9}$$

Esfuerzo admisible en el refuerzo

En el diseño de la edificación se usarán barras corrugadas. Para los esfuerzos de tracción, por flexión o cortante, se tomará el siguiente valor para los máximos esfuerzos en el refuerzo F_s:

$$F_s = 0{,}5 f_y \leq 170 MPa$$

8.3 Normatividad

Normas técnicas de diferentes países establecen ecuaciones y requisitos para obtener la resistencia nominal al cortante que proporciona la mampostería. A continuación se presentan estas normas y sus expresiones.

8.3.1 Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)

En el Título de D del presente reglamento se establecen los criterios para el diseño de estructuras en mampostería. El literal D.5.8.4.2 Valor de Vm, define lo siguiente: el cortante nominal resistido por la mampostería, V_m , se calcula utilizando las expresiones dadas en la tabla D.5.8-2, donde M_u es el momento que ocurre simultáneamente con V_u en la sección bajo consideración, y **d** puede tomarse como $\mathbf{0.8}l_w$ en ausencia de un análisis de compatibilidad de deformaciones. A_{mv} está definida en D.5.4.5.2. El cociente $M_u/(V_u d)$ debe tomarse siempre como positivo y no hay necesidad de que sea mayor que la unidad.

$\frac{M_u}{V_u d}$	V_m
$\frac{M_u}{V_u d} \leq 0{,}25$	$V_m = 0{,}30 A_{mv}\sqrt{f'm} + 0{,}25 P_u$
$0{,}25 < \frac{M_u}{V_u d} < 1{,}00$	$V_m = \left[0{,}33 - 0{,}13\left(\frac{M_u}{V_u d}\right)\right] A_{mv}\sqrt{f'm} + 0{,}25 P_u$
$\frac{M_u}{V_u d} \geq 1{,}00$	$V_m = 0{,}20 A_{mv}\sqrt{f'm} + 0{,}25 P_u$

Tabla 8.1.: Valor del cortante nominal resistido por la mampostería, V_m. Fuente NSR-10 (2010)

8.3.2 Norma mínima de diseño y construcción de mampostería de Nicaragua

El Reglamento Nacional de Construcción de Nicaragua RNC-07 (2007) establece una ecuación para la resistencia nominal al cortante proporcionada por la mampostería en función de la resistencia a la compresión diagonal de la mampostería, el área neta de la mampostería y la carga axial.

$$V_m = 0{,}5 v_m A_n + 0{,}3P \leq 1{,}5 v_m A_n \tag{8.10}$$

donde:
V_m : Resistencia al cortante provista por la mampostería N (kg)
A_n : Área neta transversal de la mampostería mm2 (cm2)
P : Carga axial N (kg)
v_m : Resistencia característica a compresión diagonal de la mampostería MPa (kg/cm2)

El valor de v_m no debe exceder los $4kg/cm^2$, a menos que se demuestre mediante ensayos que se pueden alcanzar valores mayores.

8.3.3 Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería de México

Mampostería (2008) En el capítulo seis se definen los requisitos para la mampostería reforzada interiormente.

$$V_{mR} = F_R \left(0{,}5 v_m^* A_T + 0{,}3P\right) \leq 1{,}5 F_R v_m^* A_T \tag{8.11}$$

donde:
V_{mR} : Resistencia al cortante provista por la mampostería N (kg)
A_T : Área neta transversal de la mampostería mm2 (cm2)
P : Carga axial N (kg)
v_m^* : Resistencia de diseño a compresión diagonal MPa (kg/cm2)
F_R : El factor de resistencia será igual a 0.7

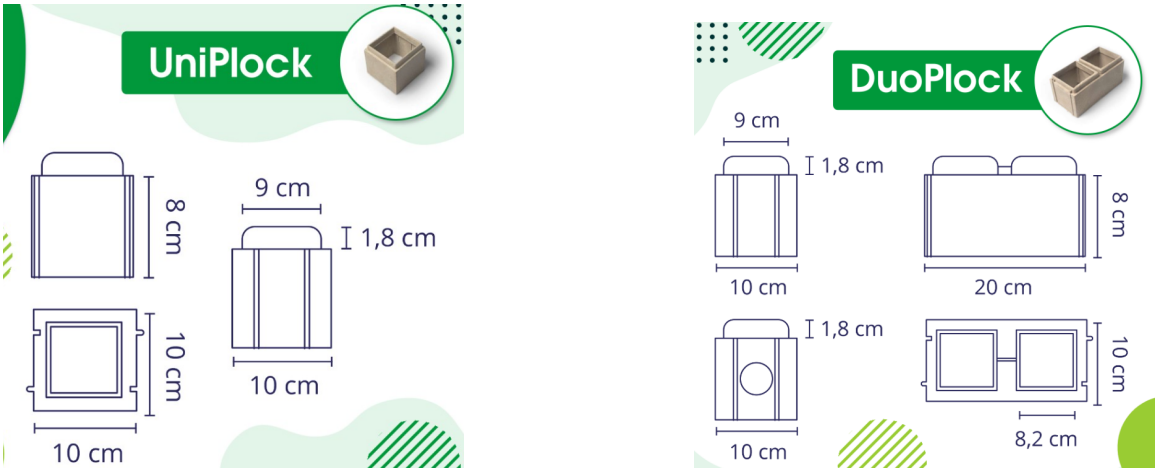
El valor de v_m^* no debe exceder los $6kg/cm^2$, a menos que se demuestre mediante ensayos que se pueden alcanzar valores mayores. Este valor se calcula a partir de la ecuación 8.12

$$v_m^* = \frac{\bar{v_m}}{1 + 2{,}5c_v} \tag{8.12}$$

donde:
$\bar{v_m}$: media de la resistencia a compresión diagonal de muretes, sobre área bruta medida a lo largo de la diagonal paralela a la carga.
c_v : coeficiente de variación de la resistencia a compresión diagonal de muretes, que en ningún caso se tomará inferior a 0.20.

8.4 Bloque de plástico reciclado PLOCK

Plock es un bloque estructural fabricado 100 % con plástico reciclado por la empresa Green Solutions, que forma un sistema constructivo ágil, liviano y resistente. Para evaluar el comportamiento mecánico de los bloques ensayados en el laboratorio se usaron las geometrías denominadas UniPlock y DuoPlock 8.2. A continuación se presentan las principales características de los bloques:



(a) UniPlock (b) DuoPlock

Figura 8.2.: Dimensiones bloques, UniPlock y DuoPlock

- Los bloques son fabricados con una mezcla de plástico reciclado y fibras naturales a partir de un proceso de inyección.

- El peso promedio de los bloques es de 175 g y 350 g para las referencias UniPlock y DuoPlock respectivamente.
- El espesor de las paredes se encuentra entre 4.7 y 5 mm.

Para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales el Laboratorio de Estructuras de la Universidad del Valle realizó una serie de ensayos, los cuales son presentados a continuación con los datos obtenidos. Estos son de gran utilidad para cumplir con los objetivos del presente trabajo de investigación.

8.5 Caracterización del material

8.5.1 Resistencia a tensión

El ensayo de resistencia a tensión se realizó bajo la norma ASTM, D 638 (2014). Este ensayo consiste en la determinación de las propiedades de tracción de plásticos reforzados y no reforzados. Las muestras del ensayo estándar deben tener forma de mancuerna y ser ensayadas en condiciones definidas de tratamiento, temperatura, humedad y velocidad de la máquina de ensayo. El ensayo se realiza sujetando los extremos de la probeta con unas mordazas especializadas para el material a la máquina universal, la cual aplica una carga a tensión a una velocidad constante de 1 mm/s hasta llevar la probeta a la falla. A partir de la curva esfuerzo-deformación se puede obtener el módulo de elasticidad o también llamado módulo de Young usando la ecuación 8.13.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \tag{8.13}$$

donde:
E = Módulo de Young o módulo de elasticidad (MPa)
σ_i = Esfuerzo en el punto i (MPa)
ε_i = deformación unitaria en el punto i

Descripción y análisis de resultados: Para la realización del ensayo en el laboratorio a tensión de los bloques se tomaron muestras longitudinal y verticalmente, esto con el fin de identificar si existe alguna variación en la resistencia del material a

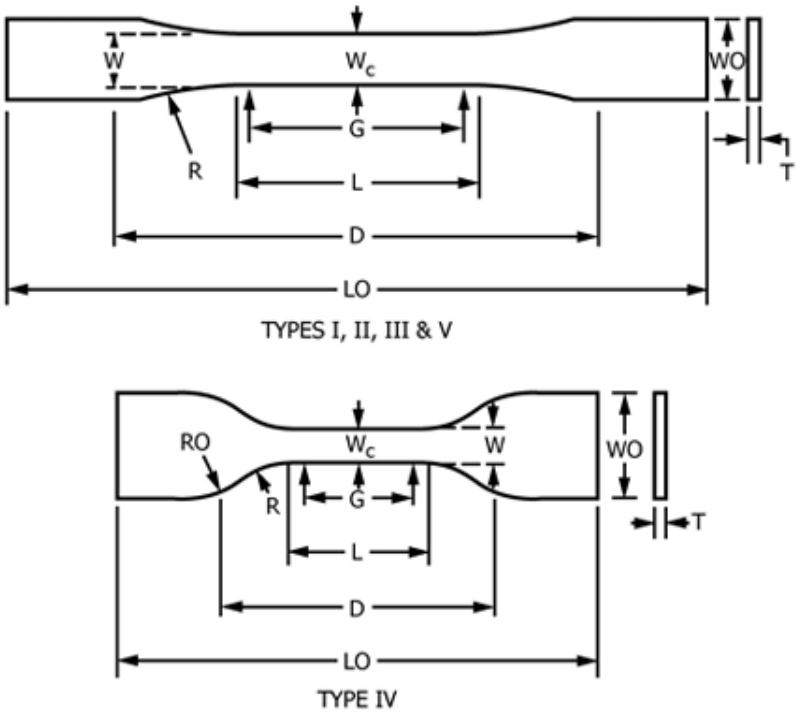
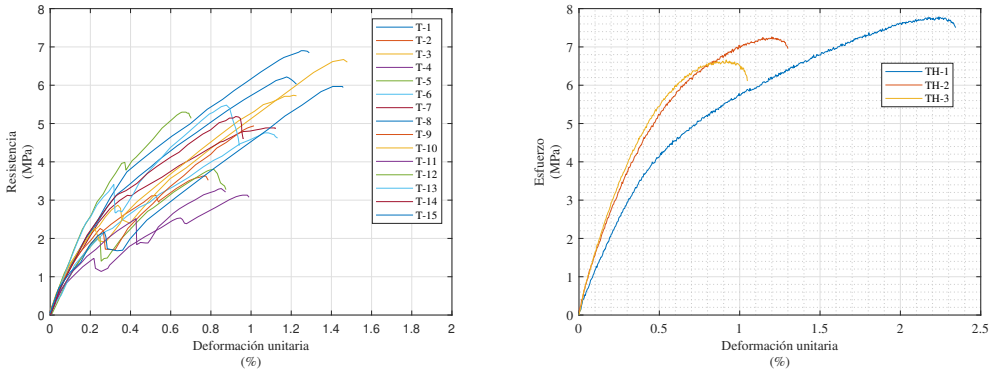


Figura 8.3.: Geometría probetas

tensión debido al proceso de fabricación del bloque. Los resultados obtenidos muestran poca variación entre la dirección del ensayo, se puede apreciar que los bloques tienen una mayor resistencia a tensión vertical que longitudinal. Los resultados se presentan a continuación:

Descripción	Esfuerzo [MPa]	Fuerza [N]	E[MPa]	Deformación máxima [%]
Valor mínimo	3.16	279.7	6.77	0.7
Valor máximo	6.88	519.0	12.72	1,48
Valor promedio	5.05	400.2	9.12	1.06
Desviación estándar	1.16	80.27	1.51	0.22

Tabla 8.2.: Resistencia a tensión en plástico de probetas tipo I según ASTM, D 638 (2014)



(a) (b)

Figura 8.4.: Curva Esfuerzo-Deformación de probetas a tensión: a) probetas longitudinales. b) Probetas verticales

Descripción	Esfuerzo [MPa]	Fuerza N]	E[MPa]	Deformación máxima [%]
Valor mínimo	6.66	124.7	7.7	1.03
Valor máximo	7.78	156.7	12.14	2.31
Valor promedio	7.23	138.9	10.28	1.54
Desviación estándar	0.56	16.3	2.3	0.7

Tabla 8.3.: Resistencia a tensión en plástico de probetas tipo I según ASTM, D 638 (2014) escalada longitudinalmente

8.5.2 Prueba de Creep a flexión

El ensayo de creep a flexión se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM, D 2990 (2009). Este ensayo permite determinar la fluencia por tracción y compresión; además, la rotura por fluencia de plásticos en condiciones ambientales específicas. El ensayo consiste en aplicar una carga estática, aproximadamente el 10 %, 20 % y 30 % de la carga de rotura del material a flexión, sobre las probetas por un largo periodo de tiempo, que suele durar hasta 1000 horas, mientras se registran las deformaciones o alargamiento de la probeta. Esto proporciona una predicción de la resistencia de los materiales bajo cargas a largo plazo y los cambios dimensionales que pueden pro-

ducirse como resultado de dichas cargas.

A continuación se presentan las curvas de tiempo - desplazamiento del material para las cargas del 10 % (figura 8.5a), figura 20 % (8.5b) y 30 % (figura 8.5c) de la carga de rotura del material a flexión. El comportamiento de este material se puede fraccionar en dos partes a partir de observar estas curvas. La primera parte corresponde a la respuesta elástica del material a la carga aplicada. La segunda parte de la curva es una zona de transición representada por un comportamiento relativamente lineal.

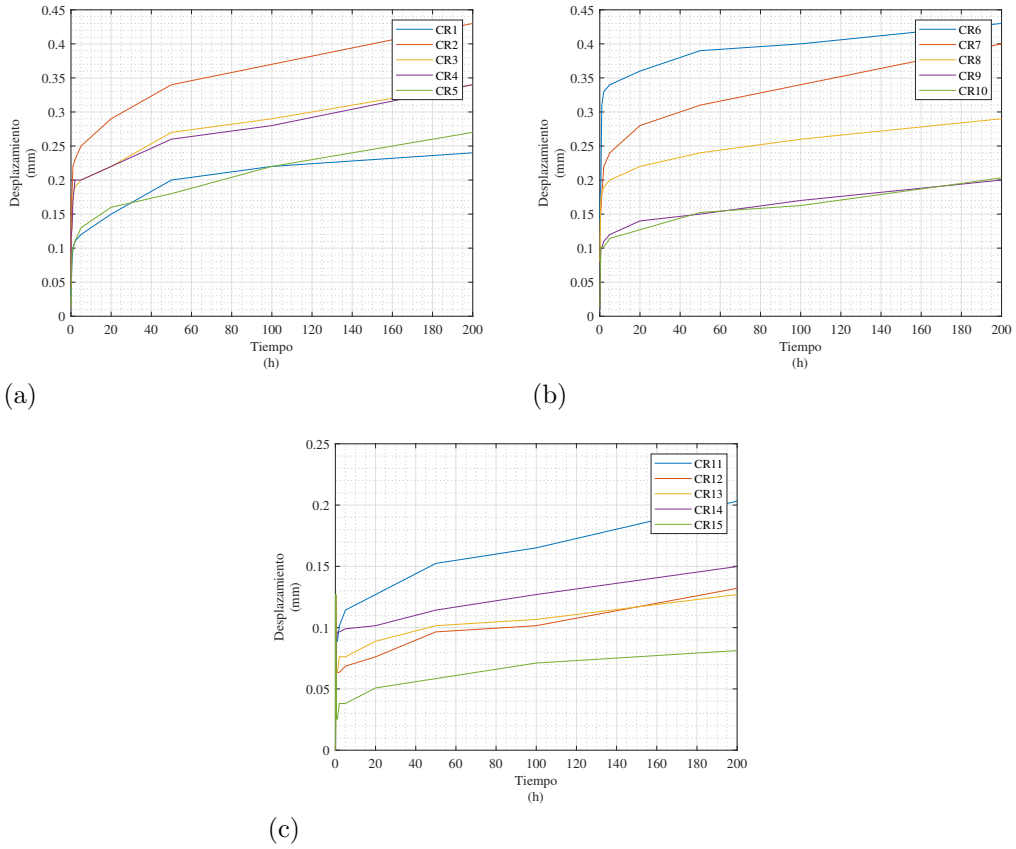


Figura 8.5.: Curva de fluencia lenta a) Carga 1.8 Kg. b) Carga 1.2 Kg. c) Carga 0.6 Kg.

8.6 Caracterización Bloques

Para realizar la caracterización del comportamiento mecánico de los bloques plásticos, someter las unidades de mampostería a ensayos de resistencia a la compresión,

flexión , cortante y adherencia. A continuación se describe cada ensayo con sus respectivas consideraciones.

8.6.1 Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a compresión se realizó según la norma NTC-4017 (2005). Este ensayo consiste en aplicar una carga normal a compresión con velocidad constante (entre 1.5 y 2.0 mm/min) hasta llevar el espécimen a la falla. Con el fin de obtener el módulo de elasticidad de algunos especímenes, se usó un transductor electromecánico de desplazamiento lineal variable (LVDT), los cuales registran la deformación. El montaje realizado se observa en la figura 8.6. Para determinar la resistencia se usa la ecuación 8.14.

$$C = \frac{W}{A} \tag{8.14}$$

donde:
C = resistencia del espécimen a la compresión, en Pa x 10^4
W = carga máxima (de rotura), en N
A = promedio de las áreas brutas de las superficies superior e inferior del espécimen, en m^2

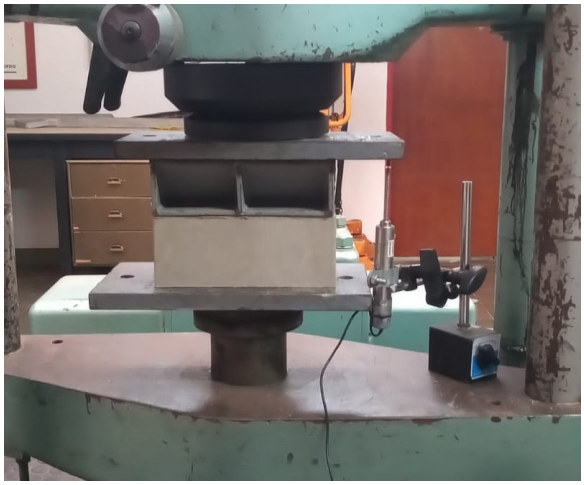


Figura 8.6.: Montaje ensayo a compresión instrumentado

Descripción	Esfuerzo [MPa]	Fuerza [kgf]
Valor mínimo	9.40	3000.0
Valor máximo	13.32	4250.0
Valor promedio	11.63	3736.3
Desviación estándar	1.31	418.51

Tabla 8.4.: Resistencia a compresión en bloques B1

Se realizaron un total de 30 ensayos a bloques, 3 de estos fueron instrumentados con el fin de obtener el módulo de Young o módulo de elasticidad. Usando la fórmula 8.13. Los resultados se observan en la tabla 8.5.

Muestra	**E [MPa]**
C28	789.13
C29	534.41
C30	631.93

Tabla 8.5.: Módulos de elasticidad de bloques B1

8.6.2 Resistencia a Flexión

El ensayo de resistencia a flexión se realizó siguiendo la norma NTC-4017 (2005). Un total de 30 bloques se ensayaron. Este ensayo permite obtener el módulo de rotura del bloque. El montaje consiste en aplicar la carga en el centro geométrico de la unidad de mampostería que se debe apoyar en dos barras cilíndricas de acero sólido a una distancia de 12.5mm desde cada borde del espécimen. Los cálculos se realizaron siguiendo la ecuación 8.15, proporcionada por la norma.

$$MR = 3W(\frac{L}{2} - x)/bd^2 \tag{8.15}$$

donde:
MR = Módulo de rotura, en Pa
W = Carga máxima indicada por la máquina de prueba, en N
L = Distancia entre soportes, en mm
b = ancho neto (distancia de cara a cara) de la muestra en el plano de falla, en mm.
d = profundidad, (distancia desde la cara superior hasta el plano de apoyo) de la muestra en el plano de falla, en mm.
x = distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, medida en la dirección de la línea central de la superficie sometida a tensión, en mm.



Figura 8.7.: Montaje flexión.

8.6.3 Prueba de adherencia

Este ensayo se realiza para evaluar la adherencia entre el mortero de relleno y las paredes internas del bloque plástico. El procedimiento consiste en aplicar una carga gradualmente uniforme sobre el área ocupada por el mortero hasta que se desprenda en su totalidad el mortero del bloque. La Figura 8.8 muestra los componentes principales del montaje del ensayo: un bloque de acero macizo para aplicar una fuerza (1), el espécimen (2) y un marco de platinas en el que se apoyan únicamente las paredes del bloque (3).

Este ensayo se realizó a un total de 4 muestras, el valor promedio obtenido de carga máxima fue de 1250 kgf o 12500 N.El área de contacto de las paredes del

bloque con el cubo de mortero es de 7988.16 mm^2. Con estos datos obtenidos y usando la fórmula 8.17 obtenemos un esfuerzo promedio de 1.57 MPa. Este resultado demuestra que hay una baja adherencia entre las paredes del bloque y el mortero inyectado; adicionalmente, cuando se aplica la carga, se desprende por completo, se separan estos elementos sin llegar a presentarse deformaciones o rotura.

$$A = 4(bXh) \tag{8.16}$$

$$f_s = \frac{F}{A} \tag{8.17}$$

donde:

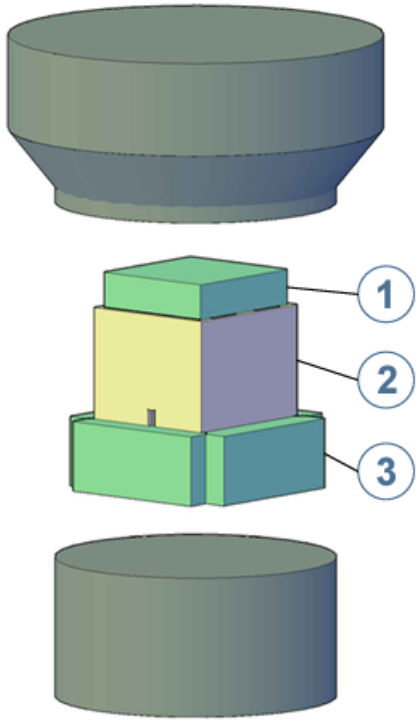
f_s = Esfuerzo de adherencia, MPa

F = Fuerza de adherencia, N

A = Área, mm^2

b = base, mm

h = altura, mm



(a)



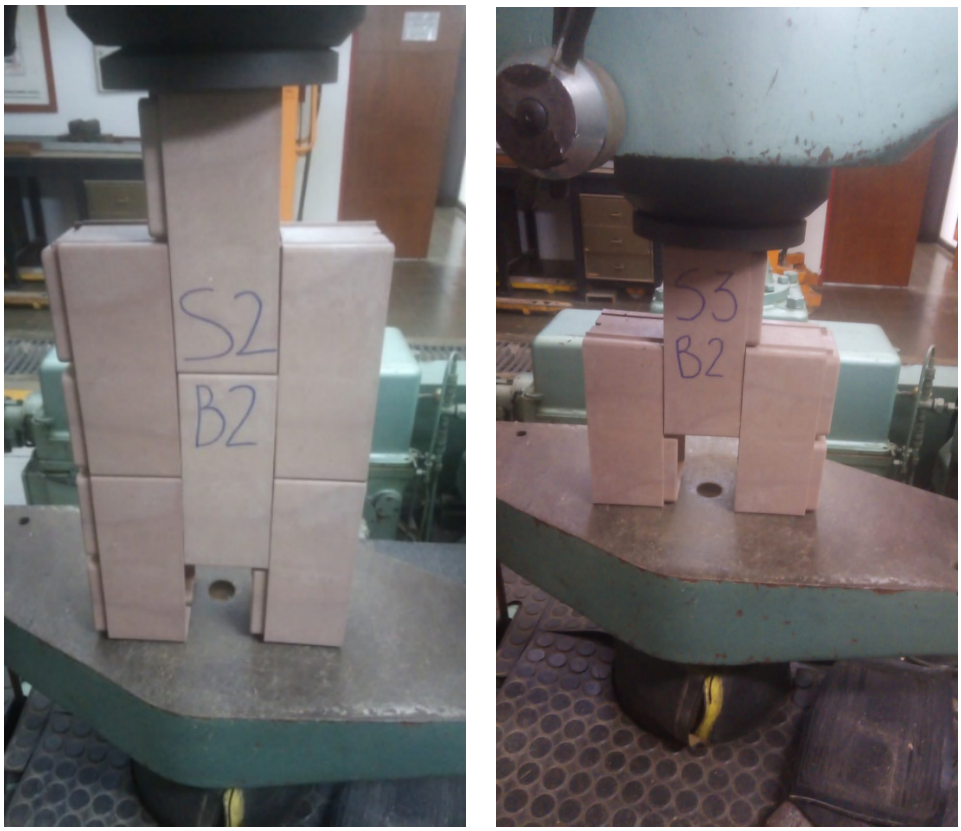
(b)



(c)

Figura 8.8.: a) Componentes del montaje b) Montaje de prueba de adherencia c) probetas a ensayar

8.6.4 Ensayo a cortante



(a) (b)

Figura 8.9.: Configuraciones del ensayo. a) 6 bloques, b) 3 bloques

Los bloques fueron diseñados con pestañas que sobresalen por encima y encajan con otros bloques para formar una unión mecánica, evitando el uso de mortero de pega en bloques. Este ensayo se realiza para determinar la resistencia a cortante de estas uniones. Para evaluar esta resistencia, se diseñó un ensayo con dos cantidades de bloques diferentes, un ensayo de seis unidades (figura 9.6a) y otro con tres unidades de bloques (figura 9.6b).

8.7 Ensayos sobre muretes

8.7.1 Compresión en muretes

Este ensayo se realizó siguiendo la norma NTC-3495 (2003), este comprende los procedimientos para la elaboración y ensayo de muretes de mampostería, y los procedimientos para determinar la resistencia a la compresión de la mampostería, f_{mt}, usada para determinar el cumplimiento del requisito de la resistencia nominal a la compresión de la mampostería especificada, f'_m.

El ensayo consiste en aplicar una carga de compresión a los muretes, para mejorar la distribución de la carga en el área transversal, se usan platinas acompañadas de una capa de neopreno. El espécimen está compuesto de 6 hiladas de bloques plásticos. Se realizaron ensayos a muretes con mortero inyectado y sin mortero inyectado. En los ensayos aplicados en muretes con mortero inyectado en las celdas extremas, la resistencia de compresión del mortero es de 21 MPa y esta celda tiene un refuerzo vertical con varilla #4.

Para determinar experimentalmente el valor de la resistencia especificada a la compresión de la mampostería se deben promediar los resultados de al menos tres ensayos. El valor de cada ensayo se obtiene al dividir la carga última sobre el área de la sección transversal.

$$f'_m = \frac{Carga\acute{U}ltima, kN}{\acute{A}reaMurete, m^2}$$

Se debe calcular la relación a_m/e_m de cada murete, usando la altura y la dimensión transversal menor (espesor) del murete. Se debe determinar el factor de corrección según la Tabla 8.6. Si la relación entre la altura y el espesor de la mampostería no se encuentra entre los valores de la Tabla 8.6, se debe determinar el factor de corrección correspondiente, mediante la interpolación lineal entre los valores dados.

a_m/e_m	**1.30**	**1.50**	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**4.00**	**5.00**
Factor de corrección	0.75	0.86	1.00	1.04	1.07	1.15	1.22

Tabla 8.6.: Factores de corrección altura contra espesor, para la resistencia a la compresión de muretes de mampostería. NTC-3495 (2003)

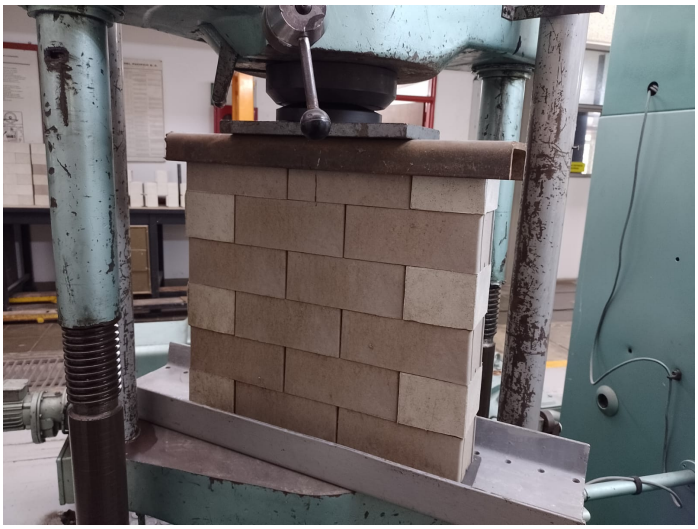


Figura 8.10.: Montaje compresión en murete horizontal

8.7.2 Compresión diagonal en muretes

El ensayo de compresión en muretes diagonales se realizó siguiendo la norma ASTM, E 519 (2002). El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a la tracción diagonal o resistencia al cortante.

Este ensayo consiste en aplicar una carga a compresión en muretes rotados 45°, usando acoples especiales en las esquinas para evitar el aplastamiento de las mismas (véase la figura 8.11). El espécimen está compuesto de 4 hiladas de bloques plásticos. Se realizaron ensayos a muretes sin mortero inyectado y otros con mortero inyectado y refuerzo vertical. Este mortero tiene una resistencia de compresión del mortero de 21 MPa y el refuerzo vertical es una varilla #4.



Figura 8.11.: Montaje compresión diagonal en muretes

La siguiente ecuación define el esfuerzo cortante a partir del ensayo a compresión diagonal de un murete:

$$S_s = \frac{0{,}707 * P}{A_n} \tag{8.18}$$

donde:
S_s = esfuerzo cortante en compresión diagonal
P = fuerza máxima resistida en el ensayo
A_n = área neta

El factor $0{,}707 * P$ es la componente de la fuerza en el plano de falla por cortante.

$$A_n = \frac{w + h}{2} * t * n \tag{8.19}$$

donde:
w = Ancho de la muestra
h = Altura de la muestra
t = Espesor de la muestra
n = Porcentaje del área bruta de la unidad que es sólida, expresado como decimal

En la norma Guatemalteca NTG-41051 (2012) se encuentra una nota aclaratoria respecto al cálculo de n. Estas ecuaciones presentadas son aplicables a unidades sólidas o huecas sin mortero. Cuando las unidades tienen mortero, es necesario realizar un análisis o ensayo adicional para determinar el área neta de la sección transversal al plano de falla de los especímenes y sus esfuerzos cortantes resultantes.

Compresión diagonal en muretes con mortero de relleno

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados a 3 muretes se presentan en la tabla 8.7

Muestra	**An [mm2]**	**Carga máxima [kgf]**	**Ss [MPa]**
MD1	21569,8	1131.2	0,524
MD2	21569,8	1166.5	0,541
MD3	21569,8	989.8	0,459
	PROMEDIO	1095.85	0,508

Tabla 8.7.: Resultados obtenidos del ensayo a compresión diagonal en muretes con mortero inyectado

Las fallas que presentaron estos ensayos fueron diferentes a la falla por cortante.

Compresión diagonal en muretes sin mortero de relleno

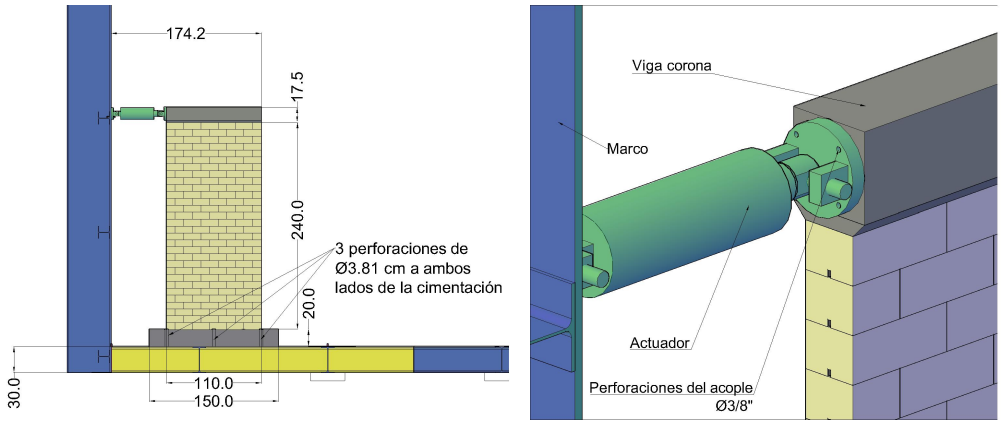
Los resultados obtenidos en los ensayos realizados a 5 muretes se presentan en la tabla 8.8

Muestra	An [mm2]	Carga máxima [kgf]	Ss [MPa]
MD1-S	4975,51	608.02	1,199
MD2-S	4975,51	452.48	0,892
MD3-S	4975,51	452.48	0,892
MD4-S	4975,51	494.90	0,976
MD5-S	4975,51	692.86	1,366
	PROMEDIO	**540.15**	**1,065**

Tabla 8.8.: Resultados obtenidos del ensayo a compresión diagonal en muretes sin mortero inyectado

8.8 Ensayos Muro a escala real

El ensayo en muros a escala real consiste en aplicar un desplazamiento lateral monotónico en la sección transversal de la viga corona del muro hasta llevarlo a su falla usando un actuador con capacidad de 100kN. Se ensayaron 3 especímenes compuestos por una viga de cimentación en concreto reforzado de 21 MPa (1.5m x 0.4m x 0.2m), un muro constituido por bloques de plástico reciclado con celdas reforzadas en sus extremos y separadas cada metro (1.1m x 0.1m x 2.4m) y una viga corona fabricada con concreto de 21MPa (1.1m x 0.15m x 0.15m).



(a) (b)

Figura 8.12.: Montaje muros a escala real.

Muestra	Carga máxima (kgf)
MURO 1	1050
MURO 2	850
MURO 3	920

Tabla 8.9.: Valores para carga máxima resistida por los muros a escala real



(a) (b)

Figura 8.13.: Ensayo del Muro 2 a escala real

9. METODOLOGÍA

Luego de haber recopilado los datos reportados por el laboratorio, se procede a tratarlos y validar los resultados obtenidos para así definir los valores finales de los parámetros a usar en las ecuaciones propuestas.

9.1 Propiedades mecánicas y físicas

9.1.1 Módulo de rotura

Siguiendo la fórmula 8.15 de la NTC-4017 (2005) se obtuvo el Módulo de rotura (Mr), los datos obtenidos del laboratorio se presentan en la tabla 9.1.

Tipo Valor	**Fuerza [kgf]**	**Mr [MPa]**
Mínimo	460,00	1,75
Máximo	820,00	3,13
Promedio	654,64	2,51
Desviación Estándar	87,11	0,32

Tabla 9.1.: Resultados ensayo a flexión

El módulo de rotura es una propiedad importante del bloque ya que define durabilidad cuando la mampostería es sometida a esfuerzos de compresión y flexión, las cuales son comunes en este tipo de estructuras, Afanador García et al. (2012). Si se tiene en cuenta que la resistencia a flexión varía entre el 10 % y el 30 % de la resistencia a la compresión, Takeuchi (2010) y se compara con los resultados obtenidos, se observa que cumple con el objetivo y que el bloque tiene un buen comportamiento ante estos esfuerzos.

9.1.2 Ensayo de resistencia a la compresión instrumentado

En los ensayos de resistencia a la compresión realizados a bloques y muretes se registró el valor de la carga última. Solo 3 ensayos realizados a unidades de bloques fueron instrumentados, los datos están en la tabla 8.5, se obtuvo un módulo de elasticidad del bloque promedio de 651,82MPa. Para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería, es necesario realizar nuevos ensayos instrumentados a muretes, parámetro usado en el diseño a flexión.

Para obtener el módulo de elasticidad de la mampostería, según lo indicado en la norma NSR-10 en el título D.3.7.2, se debe realizar un ensayo de compresión instrumentado a muretes con un mínimo de tres muestras. En caso de no tener datos experimentales, el título D.5.2.1.2 indica dos relaciones para obtener el módulo de elasticidad a partir del esfuerzo a la compresión de la mampostería. Sin embargo, estas relaciones solo se aplican a mampostería de arcilla y concreto, que han sido ampliamente estudiadas.

Para la realización de estos nuevos ensayos fue necesario buscar bloques sobrantes de los ensayos realizados inicialmente, lo cual limitó el número de pruebas a realizar. Debido a esto, solo se aplicó el ensayo a tres muestras de unidades de bloques y tres muretes conformados por tres bloques apilados uno sobre otro.

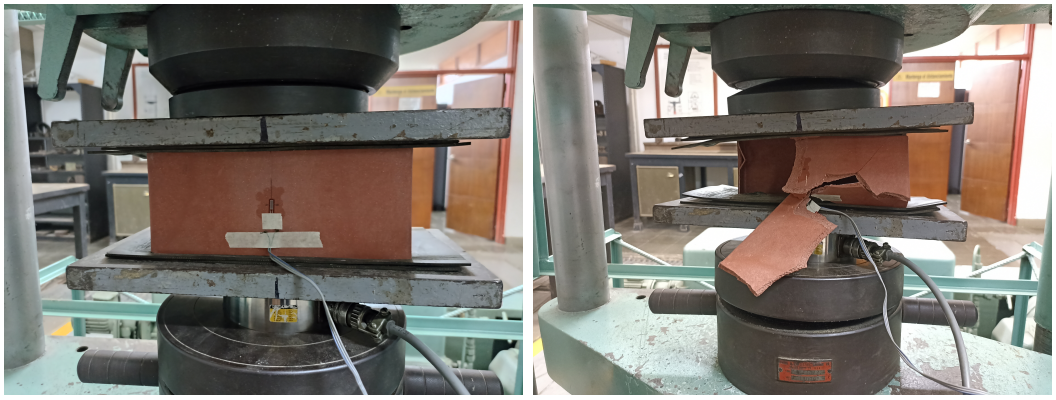
Módulo de elasticidad del bloque

En una verificación detallada de los ensayos presentados en la sección 8.6, se observa que el LVDT está adquiriendo deformaciones entre las placas de acero que distribuyen la carga en el bloque. Entre estas placas se encuentran dos neoprenos, por lo que es posible que los datos adquiridos no tengan alta precisión. Por este motivo, se decide realizar otros ensayos para verificar estos datos. Los dos nuevos ensayos se realizaron con la máquina universal WPM ZD-40. Para la adquisición de datos de deformación, se optó por una galga extensiométrica y una caja de puente Wheatstone.



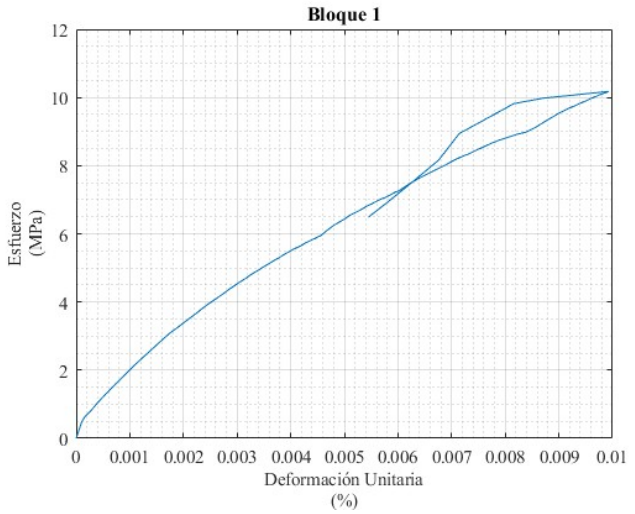
(a) (b)

Figura 9.1.: a) Galga extensiometrica. b) Caja de puente Wheatstone.

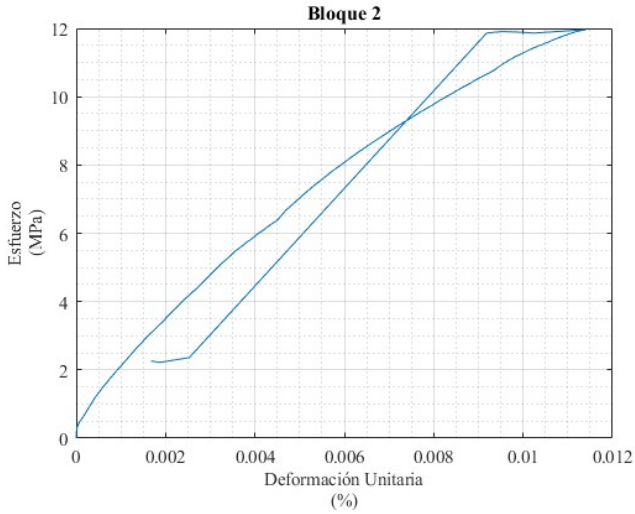


(a) (b)

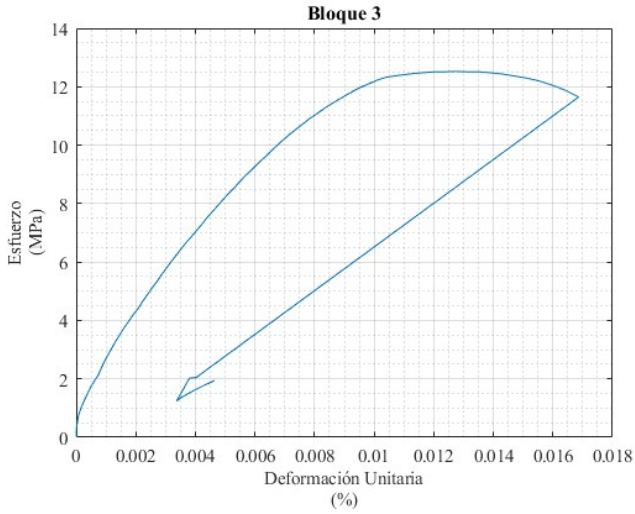
Figura 9.2.: a) Instrumentación bloque. b) falla del bloque.



(a)



(b)



(c)

Figura 9.3.: Gráficas Esfuerzo - Deformación de los bloques

Ensayo	**Carga máxima [kgf]**	**fb [MPa]**	**E [MPa]**
Bloque 1	3312,10	10,18	1533,90
Bloque 2	3893,00	11,96	1526,00
Bloque 3	4075,70	12,53	1931,70
PROMEDIO	**3760,27**	**11,56**	**1663,87**

Tabla 9.2.: Datos obtenidos ensayos de compresión

Fuente	**Carga máxima [kgf]**	**fb [MPa]**	**E[MPa]**
Laboratorio	3736,21	11.63	651,82
Propio	3760.27	11,56	1663.87

Tabla 9.3.: Comparación de módulos de elasticidad obtenidos del ensayo a la compresión instrumentado en bloques

Se puede apreciar en las tablas que los datos para la carga máxima y la resistencia máxima a compresión de los bloques son consistentes con los obtenidos inicialmente en el Laboratorio. Sin embargo, al realizar de manera diferente la adquisición de datos, se evidencia un cambio en el valor del módulo de elasticidad del bloque.

Módulo de elasticidad de la mampostería

Los datos recolectados por el laboratorio con anterioridad fueron tratados para encontrar el valor mínimo, valor máximo, promedio y la desviación estándar.

Compresión en muretes con mortero de relleno

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados a 25 muretes se presentan en la tabla 9.4.

Descripción	**Esfuerzo [MPa]**	**Fuerza [kgf]**
Valor mínimo	7.96	13800
Valor máximo	15.57	27000
Valor promedio	11.11	19270.5
Desviación estándar	2.21	3848.7

Tabla 9.4.: Resistencia a compresión en muretes con refuerzo bloques B1

Compresión en muretes sin mortero de relleno

Los resultados de los ensayos realizados a 6 muretes se presentan en la tabla 9.5

Descripción	**Esfuerzo [MPa]**	**Fuerza [kgf]**
Valor mínimo	6.76	5500.0
Valor máximo	8.54	6950.0
Valor promedio	7.61	6191.7
Desviación estándar	0.65	528.6

Tabla 9.5.: Resistencia a compresión en muretes sin refuerzo

Para el nuevo ensayo, la adquisición de datos se realizó con un transductor de posición lineal de hilo. El cálculo del módulo de elasticidad se realizó con la ecuación 8.13, se tomaron los valores de la recta ubicados en los puntos del 30 % y 70 % del esfuerzo máximo a la compresión, f'_m.

En las gráficas obtenidas se aprecia un comportamiento similar en todos los ensayos. En ellas se observan dos rectas, de las cuales se puede inferir que la primera es consecuencia del acople de los bloques hasta lograr un mejor contacto entre las superficies, por lo que se presenta una mayor deformación sin aplicar mucha carga. En la segunda recta se aprecia ya una mayor resistencia a la carga mientras sigue deformándose el material. Además de tener un comportamiento similar, se contempla

MURETE	**Carga máxima [kgf]**	**E [MPa]**	f'_m **[MPa]**
BD1	2884,0	1377,0	8,87
BD2	2777,0	1442,0	8,54
BD3	3847,0	1316,0	11,83
PROMEDIO	**3169,3**	**1378,3**	**9,75**

Tabla 9.6.: Módulos de elasticidad y resistencia a la compresión de la mampostería



(a) (b)

Figura 9.4.: a) Instrumentación del murete. b) falla del murete.

que los tres ensayos tuvieron una deformación unitaria muy cercana. En la tabla 9.6 se encuentran consignados los valores del módulo de elasticidad de la mampostería y resistencia a la compresión de la mampostería, necesarios para el diseño.

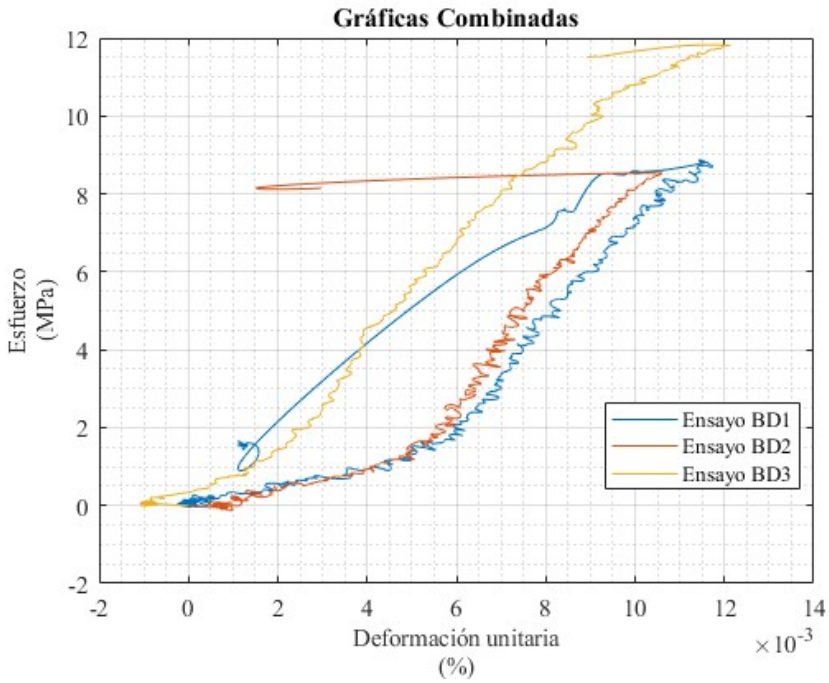


Figura 9.5.: Superposición de las gráficas obtenidas de los 3 ensayos realizados a muretes

9.2 Cortante

9.2.1 Cortante por unidad de celda

En estos ensayos se presentaron dos tipos de fallo: uno en la celda y otro en las pestañas. El primero fue producto de la fuerza de compresión y pandeo en las paredes del bloque; el segundo, de la fuerza cortante. La falla por compresión y pandeo en las paredes se presentó en la configuración de 6 bloques, lo cual indica que la fuerza cortante soportada por esta configuración es mayor que la carga máxima registrada. Por otro lado, en la configuración de 3 bloques se presentó una falla por cortante en las pestañas de los bloques. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Muestra No.(Ref)	No. bloques	Carga máxima [kgf]	Tipo de falla
S1-B1	6	700	Compresión
S2-B1	6	700	Compresión
S3-B1	3	250	Cortante
S1-B2	6	320	Pandeo
S2-B2	6	280	Pandeo
S3-B2	3	300	Cortante

Tabla 9.7.: Fuerza máxima a cortante



(a) (b)

Figura 9.6.: Tipos de falla a) 3 bloques, b) 6 bloques

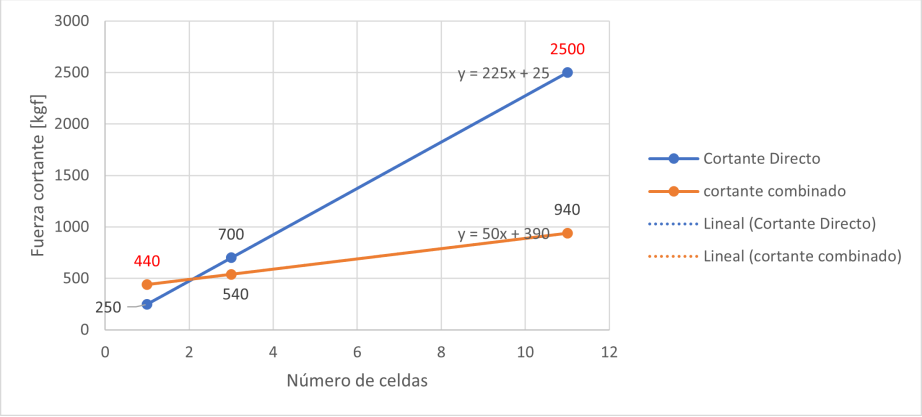


Figura 9.7.: Gráfico del análisis por cantidad de celdas

En el gráfico se presentan dos análisis diferentes que difieren en la forma en que se obtuvo el valor de la cortante máxima. La línea azul representa los datos del ensayo a corte directo (ensayos de 1 y 3 celdas respectivamente). En la línea naranja se encuentran los datos de cortante obtenidos mediante compresión diagonal y carga lateral, denominados en el gráfico como cortante combinado. Estos son ensayos de 3 y 11 celdas respectivamente. Con el fin de realizar una comparación se calcularon los valores señalados en rojo, usando una proyección de la línea de tendencia que forman los otros puntos.

Se aprecia en el gráfico que los datos registrados a corte directo (línea azul) sugieren un incremento más alto conforme aumenta la cantidad de celdas. Por otra parte, en los ensayos representados por la línea naranja, sugieren un incremento en la resistencia más bajo comparado con la línea azul. El comportamiento de la línea naranja se ajusta más a la realidad a la que se enfrentan las estructuras, por lo que se define que los ensayos que mejor simulan estas condiciones son el de compresión diagonal y carga lateral.

A partir de esta observación se procede a realizar la definición de una ecuación que permita determinar la resistencia a cortante de un muro de mampostería. El ensayo de muretes a compresión diagonal proporciona la resistencia a cortante o tracción diagonal del murete (S_s).

9.2.2 Definición de la ecuación

Tomando como base las ecuaciones presentadas para el cálculo de la resistencia a carga lateral de un muro provista por la mampostería, en la sección 8.7.2, la ecuación para establecer un límite máximo de la fuerza de un muro, en donde se relaciona el área transversal del muro y la resistencia de diseño a cortante tomada de los ensayos a compresión diagonal, se estima la máxima cantidad de fuerza cortante que puede resistir el muro ensayado en el laboratorio de estructuras. Aunque en las ecuaciones planteadas por las normas se tiene en cuenta el aporte de P_u (resistencia solicitada de diseño a carga axial), para determinar la resistencia a cortante, en el análisis realizado se desprecia este aporte, ya que la carga axial aplicada por el peso propio de la viga corona de los muros ensayados a escala real es baja comparada con la resistencia a la

compresión de la mampostería.

$$V_m = S_s * A_{mv} \tag{9.1}$$

A partir de esta ecuación, se reemplazan los términos con el valor promedio de $S_s = 1{,}065MPa$ de la tabla 8.8 y el área transversal neta del muro ensayado a carga lateral, $A_{nn} = 17734,88mm^2$, tabla 8.9. Al reemplazar los datos de las tablas, obtenemos un valor para la resistencia nominal a carga lateral de un muro igual a:

$$V_m = 1888,76kgf = 18887,64N$$

De los ensayos realizados de carga lateral a los muros a escala real, se obtuvo un valor promedio de la resistencia cortante máxima de $940kgf$.

De acuerdo a estos datos se propone un coeficiente de corrección o ajuste $\alpha = 0{,}5$, con el fin de ser más acertado en el cálculo.

$$V_m = \alpha * S_s * A_{mv} \tag{9.2}$$

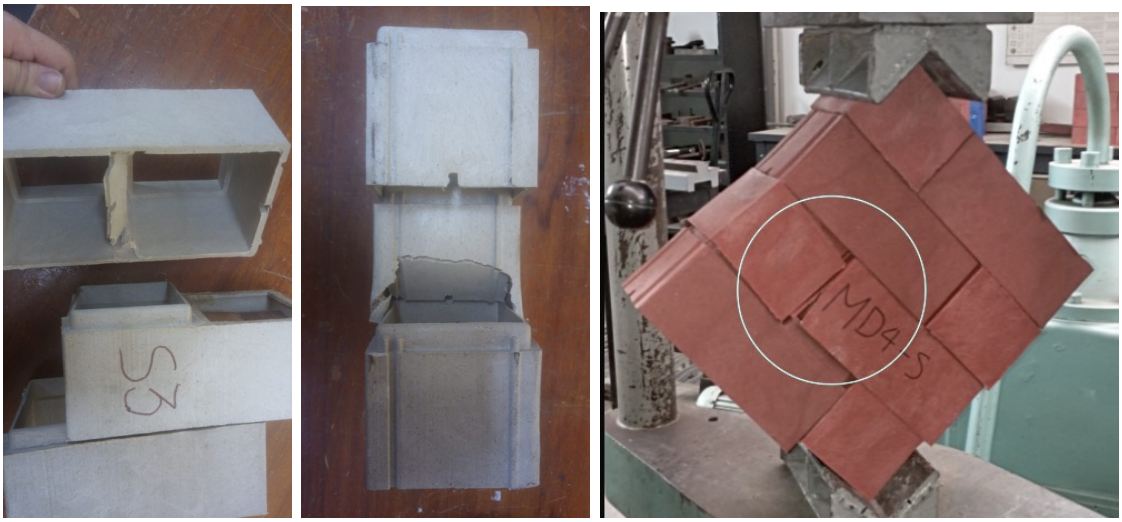
donde:
V_m = Resistencia a cortante de la mampostería en $[N]$
$\alpha = 0.5$
S_s = Resistencia a compresión diagonal de la mampostería en $[MPa]$
A_{mv} = Área neta transversal de la mampostería en $[mm^2]$

Al evaluar la ecuación tenemos:

$$V_m = \alpha * S_s * A_{mv} = 944,38kgf$$

Por lo tanto, se podría deducir que el resultado es aproximadamente igual al valor promedio esperado y que se podría usar la ecuación para predecir la capacidad a cortante de un muro de mampostería. Sin embargo, al analizar el comportamiento en conjunto de las unidades PLOCK, se evidencia que la resistencia a cortante no depende directamente del área de contacto de los bloques, se observa que la resistencia que se opone a la fuerza cortante son las pestañas donde encajan los bloques, como se puede apreciar en la imagen 9.8 de las fallas presentadas en los ensayos realizados

a corte directo, compresión diagonal y carga lateral. Por este motivo, la ecuación 9.2 planteada inicialmente presenta alta variabilidad.



(a) (b) (c)

Figura 9.8.: Falla en las pestañas de los bloques

En la tabla 9.8 se muestran las cargas de falla de los ensayos que fallaron por cortante en las pestañas. A partir de estos, se realiza un gráfico y se obtiene una ecuación con un coeficiente de determinación aceptable.

Ensayo	# de bloques	Carga Máxima [kgf]	Área $[cm^2]$
Corte Directo	0,5	250,00	17,80
	0,5	300,00	17,80
Compresión Diagonal	1,5	608,02	47,86
	1,5	452,48	47,86
	1,5	452,48	47,86
	1,5	494,90	47,86
	1,5	692,86	47,86
Carga Lateral en Muros	5,5	1050,00	177,35
	5,5	850,00	177,35
	5,5	920,00	177,35

Tabla 9.8.: Datos de los ensayos realizados a cortante

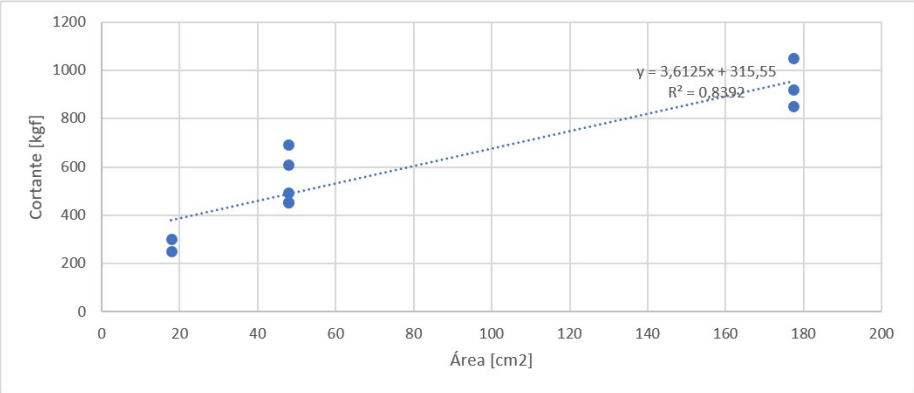


Figura 9.9.: Relación entre ensayos de cortante.

La ecuación obtenida del gráfico en función del área es la siguiente:

$$V_m[kgf] = 3{,}6125 A_{mv}[cm^2] + 315{,}55 \tag{9.3}$$

Para realizar el análisis se usaron los valores promedio de cada ensayo (escritos en negrita en la tabla 9.9) y por medio de interpolación lineal se obtiene un valor teórico para la resistencia a cortante que se obtiene por metro lineal de muro o número de bloques. El análisis se presenta para diferentes longitudes, desde 0,1m hasta los 1,1m, distancia que tiene el muro ensayado a carga lateral.

Longitud Muro [m]	# de bloques	Area muro $[cm^2]$	V_m [kgf]
0,1	0,5	17,80	**250,00**
0,2	1,0	31,91	386,10
0,3	1,5	47,86	**540,00**
0,4	2,0	63,82	589,29
0,5	2,5	79,77	638,57
0,6	3,0	95,73	687,86
0,7	3,5	111,68	737,14
0,8	4,0	127,64	786,43
0,9	4,5	143,59	835,71
1,0	5,0	159,54	885,00
1,1	5,5	177,35	**940,00**

Tabla 9.9.: Valores del cortante resistido por la mampostería por metro lineal o cantidad de bloques

Para comprobar cuál ecuación es más acertada teóricamente, se procede a evaluar las ecuaciones obtenidas, la ecuación 9.1 y la ecuación 9.3. Los resultados se presentan en la tabla 9.10.

V_m [kgf]	Ec.9.1 [kgf]	%error	Ec.9.3 [kgf]	% error
250,00	**94,79**	**62,09**	**379,81**	**51,92**
386,10	169,91	55,99	430,74	11,56
540,00	**254,87**	**52,80**	**488,34**	**9,57**
589,29	339,83	42,33	545,93	7,36
638,57	424,79	33,48	603,53	5,49
687,86	509,74	25,89	661,12	3,89
737,14	594,70	19,32	718,72	2,50
786,43	679,66	13,58	776,31	1,29
835,71	764,62	8,51	833,91	0,22
885,00	849,57	4,00	891,50	0,74
940,00	**944,38**	**0,47**	**955,78**	**1,68**

Tabla 9.10.: Comparación de los valores obtenidos de la carga máxima y % de error en las diferentes ecuaciones correspondientes a la interpolación realizada para cada valor de cortante resistida V_m.

Se puede observar que los valores obtenidos con la ecuación 9.3 presentan un comportamiento más acertado, comparados con los valores obtenidos de los ensayos y los datos interpolados. Sin embargo, presentan cierto error; por lo tanto, se decide cambiar el valor del intercepto en la ecuación 9.3. Así, tenemos la siguiente ecuación:

$$V_m[kgf] = 3{,}6125 A_{mv}[cm^2] + 300 \tag{9.4}$$

Donde se puede apreciar en la tabla 9.11 una mejora en la precisión del cálculo de la resistencia a cortante. El análisis se realizó con un límite de longitud del muro por dos motivos, el primero es dado que en el ensayo realizado al muro en escala real, la longitud del muro es de 1.1m, el segundo es por el límite que estipula la norma NSR-10 (2010) para la separación máxima entre refuerzo vertical es de 1.2m.

V_m [kgf]	Ec.9.4 [kgf]	% error
250,00	**364,26**	**45,70**
386,10	415,19	7,53
540,00	**472,79**	**12,45**
589,29	530,38	10,00
638,57	587,98	7,92
687,86	645,57	6,15
737,14	703,17	4,61
786,43	760,76	3,26
835,71	818,36	2,08
885,00	875,95	1,02
940,00	**940,23**	**0,02**

Tabla 9.11.: Valores de la carga máxima y % de error correspondientes a la interpolación realizada para cada valor de cortante resistida V_m.

9.3 Flexión

Las ecuaciones para capacidad a momento de una sección dependen del refuerzo vertical del muro y la distancia donde se localice este refuerzo. La geometría del bloque y el comportamiento en conjunto de este no influyen en gran parte en el comportamiento a flexión de un muro. Nilson (2016).

9.3.1 Derivación de Fórmulas a Flexión

La base de las fórmulas para flexión en donde un material resiste la tracción y otro la compresión es la relación modular, n. Esta es la relación entre el módulo de elasticidad del acero, E_s, y el módulo de elasticidad de la mampostería, E_m.

$$n = \frac{E_s}{E_m} \tag{9.5}$$

La localización del eje neutro está definida por kd.

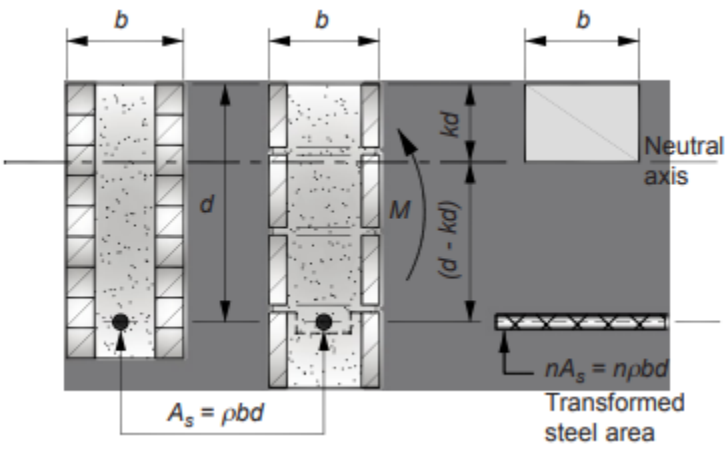


Figura 9.10.: Localización eje neutro para una viga. Amrhein (2009)

Tomando momentos de los esfuerzos aplicados en las áreas desde el eje neutro, tenemos:

$$\begin{aligned}(bkd) * (1/2)(kd) &= (n\rho db) * (d - kd) \\ \frac{1}{2}bd^2k^2 &= n\rho(bd^2 - kbd^2) \\ \frac{1}{2}bd^2k^2 - n\rho bd^2(1 - k) &= 0\end{aligned}$$

Dividimos por bd^2 y multiplicamos por 2.

$$k^2 - 2n\rho(1 - k) = 0$$

Despejando k, tenemos:

$$k = \sqrt{(n\rho)^2 + 2n\rho} - n\rho \tag{9.6}$$

El coeficiente k define la profundidad del área a compresión, kd, y es la localización del eje neutro para la sección.

El coeficiente j define la distancia entre el centroide del área a compresión y el centroide del área del acero a tensión. La distancia jd es usada para calcular el momento resistente interno.

$$j = 1 - k/3 \tag{9.7}$$

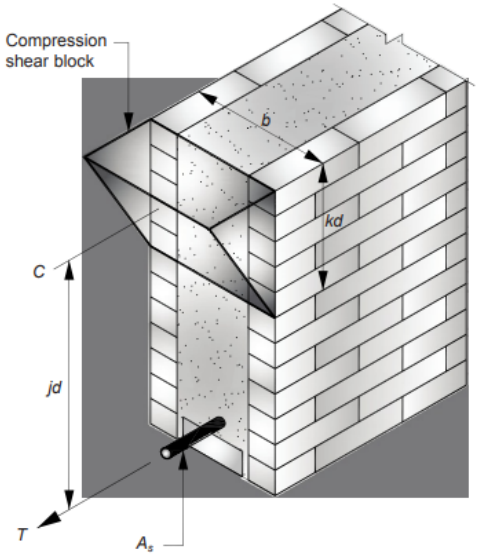


Figura 9.11.: Bloque de esfuerzos a compresión para una viga en flexión. Amrhein (2009)

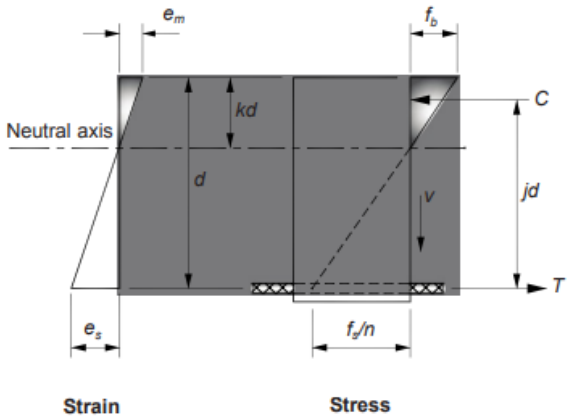


Figura 9.12.: Representación de esfuerzos y deformaciones en una viga. Amrhein (2009)

El coeficiente de flexión, K_f, es una combinación de valores que definen la capacidad de momento a flexión de una sección.

$$K_f = \frac{1}{2} f_b j k \quad \text{basado en la mampostería}$$
$$K_f = f_s \rho j \quad \text{basado en el acero}$$

Capacidad de momento de una sección

La capacidad de momento de una sección basada en la tensión del acero se define como:

$$M_s = \quad \text{Fuerza multiplicada por el brazo del momento}$$

donde:

$$\text{Fuerza en el acero,} \quad T = A_s f_s = \rho b d f_s \tag{9.8}$$

$$\text{Brazo del momento} \quad = jd$$
$$M_s = T j d = A_s f_s j d$$
$$M_s = \rho b d f_s j d$$

$$M_s = f_s \rho j b d^2 \tag{9.9}$$

$$\text{Además, dado que:} \quad K_f = f_s \rho j,$$

$$M_s = K_f b d \tag{9.10}$$

La capacidad de momento de una sección basado en esfuerzo sobre la mampostería se define como:

$$M_m = \quad \text{Fuerza multiplicada por el brazo del momento}$$

donde:

$$\text{Fuerza en la mampostería,} \quad C = \frac{1}{2} f_b (kd) b = \frac{1}{2} f_b k b d \tag{9.11}$$

$$\text{Brazo del momento} \quad = jd$$

$$M_m = C(jd) = \frac{1}{2} f_b k b d j d$$

$$M_m = \frac{1}{2} f_b k j b d^2 \tag{9.12}$$

$$\text{Además, dado que} \quad K_f = \frac{1}{2} f_b k j,$$

$$M_m = K_f b d \tag{9.13}$$

9.4 Análisis de los muros de bloque de plástico reciclado

A partir de los ensayos, se obtuvieron las propiedades de los materiales del bloque y las ecuaciones planteadas para el diseño. A continuación, se comparan los resultados con los datos obtenidos de los ensayos a carga lateral. Para el análisis, se desprecia la carga axial ejercida por la viga corona, ya que no es significativa en comparación con la carga que puede soportar la mampostería.

A continuación se muestran en la figura 9.13 las tres gráficas obtenidas de los ensayos realizados a cada muro. Estas se pueden dividir en dos partes: la primera representa el comportamiento lineal del muro hasta registrar un pico de carga, mientras que en la segunda se produce un descenso abrupto de la carga. Posteriormente, se observa una mayor deformación sin que se produzca un aumento significativo de la resistencia de carga, lo que indica la entrada en la zona inelástica.

Según lo observado en las gráficas, los muros se comportaron de manera similar: el rango de deformación en la zona elástica estuvo entre 35mm y 66mm, y se alcanzó una

resistencia promedio a carga lateral de 0,94 ton. Al no conocer la posible deformación máxima que podían soportar y para evitar un posible colapso, los ensayos de los muros se detuvieron al observarse las fallas esperadas. Sin embargo, se observa que el muro 3 resistió una mayor deformación. Es posible que los muros 1 y 2 también hayan tenido este mismo comportamiento, pero como no se controló el tiempo total de cada ensayo ni se esperó a que se produjera el colapso, la cantidad de datos adquiridos fue diferente.

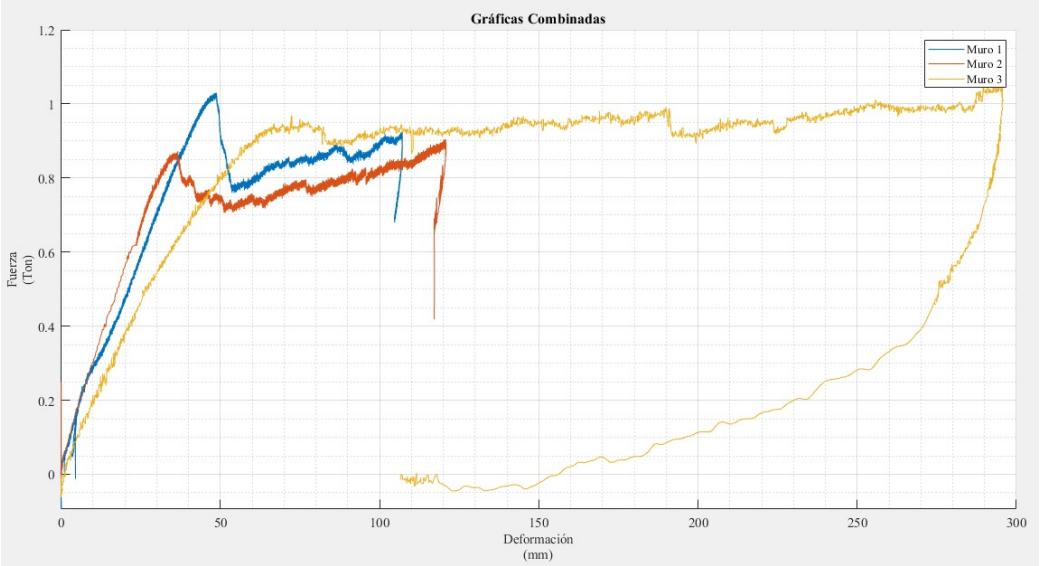


Figura 9.13.: Comportamiento de los muros frente a la carga lateral aplicada

10. DISEÑO DE ESTRUCTURA RESIDENCIAL

Como base para realizar el diseño se tiene un plano del proyecto denominado Casa Midori, aportado por la empresa GREEN SOLUTIONS, cuenta con un área de $96m^2$ construidos de un solo piso. Para el diseño se tuvo como referencia el Apéndice D-1, del Título D de la NSR-10, el cual establece los lineamientos para realizar el diseño de mampostería estructural por el método de los esfuerzos de trabajo admisibles.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El proyecto se encuentra ubicado en la zona 6 de la microzonificación sísmica de Cali, un área con alta amenaza sísmica. Por esta razón, se ha seleccionado el sistema

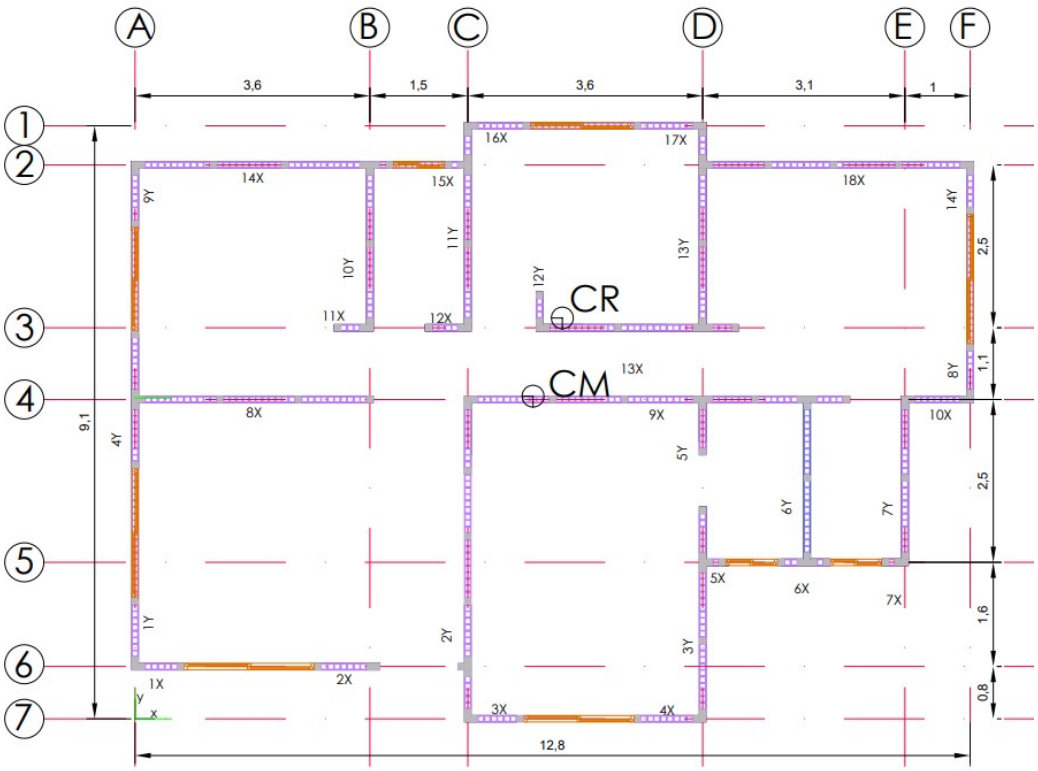


Figura 10.1.: Planta general y numeración de muros

estructural de mampostería parcialmente reforzada de bloque de perforación vertical. Dado que el proyecto pertenece al Grupo I de uso y se trata de una casa de un solo piso, está permitido el uso de este sistema estructural en zonas de amenaza sísmica alta. Es fundamental considerar estas medidas de seguridad estructural para garantizar la resistencia y la estabilidad de la edificación frente a posibles eventos sísmicos. El procedimiento de diseño llevado a cabo se basa en el ejemplo planteado en la tesis de Magíster en Ingeniería Civil del señor Gutíerrez Junco (2003).

10.1 Predimensionamiento

El predimensionamiento se realizó teniendo en cuenta el título D de la NSR-10, el numeral D.7.3.2, que define lo siguiente:

a. El espaciamiento horizontal entre refuerzos verticales no puede ser mayor de 1200 mm.

b. Se debe disponer como mínimo una barra N° 4 (1/2") ó 12M (12mm) al lado de ventanas o aberturas.

c. Se debe disponer como mínimo de una barra N° 4 (1/2") ó 12M (12mm) al lado de ventanas o aberturas interiores mayores de 600 mm horizontal o verticalmente. Este refuerzo debe ser continuo dentro del tramo de muro.

10.1.1 Avalúo de cargas gravitacionales

MASA DE MUROS
Cálculo de la densidad total de los muros:

Cantidad de bloques en $1m^2$	$1/(0{,}20 * 0{,}08) = 62{,}5$
Masa de un bloque	$0{,}35kg$
Masa de los bloques en $1m^2$	$21{,}88kg/m^2$

Suponiendo cada dovela extrema del muro por metro cuadrado rellena con mortero, se obtiene la densidad del muro:

Volumen de una dovela	$0{,}09 * 0{,}092 * 1 = 0{,}008 m^3$
Densidad del concreto	$2400 kg/m^3$
Masa del concreto	$39{,}74 kg/m^2$
Masa total de muro	$61{,}62 kg/m^2$
Densidad del muro por $1m^2$	$\gamma_t = 0{,}616 T/m^3$

Longitud de los muros:

$$\text{en} \quad x = 30{,}8m$$
$$\text{en} \quad y = 27{,}4m$$
$$\text{total} = 58{,}2m$$

Carga de muros:

$$C_{muros} = b * \gamma_t * L_T * h_{pi} = 0{,}1 * 0{,}616 * 58{,}2 * 2{,}4 = 8{,}6T$$

donde:
b = espesor del muro
L_T = longitud de muros
h_{pi} = altura de cada muro

MASA DE ANTEPECHOS

Longitud de antepechos = 6.6 m
Altura de antepechos = 1.6 m

$$C_{antepechos} = b * \gamma_t * L_T * h_{pi} = 0{,}237T$$

MASA DE LOSA

Área de cada piso = 96.74 m^2
Peso por m2 de losa (10 cm de espesor): = 0.10 * 2.4 = 0.24 T/m^2

$$C_{losa} = 0{,}24 * 96{,}74 = 23{,}22T$$

MASA VENTANAS
Tenemos:
Carga muerta ventanas = 0.045 T/m^2
Longitud de ventanas = 2.4 m
Altura ventanas = 0.56 m

$$C_{ventana} = 0{,}045 * 2{,}4 * 0{,}56 = 0{,}069T$$

donde:
Longitud puerta ventanas = 10.9 m
Altura puerta ventanas = 2.24 m

$$C_{ptaventana} = 0{,}045 * 10{,}9 * 2{,}24 = 1{,}168T$$

MASA TOTAL CASA

$$m_x = 33{,}229T$$

10.1.2 Obtención de la amenaza sísmica y valores de A_a y A_v

- Nivel de amenaza sísmica: Alta
- Coeficiente que representa la aceleración de pico efectiva, A_a: 0.25
- Coeficiente que representa la velocidad horizontal de pico efectiva, A_v: 0.25

10.1.3 Movimientos sísmicos de diseño

Para encontrar los parámetros se supone la construcción en la zona 6 de la microzonificación sísmica de Cali. Para obtener un valor aproximado del periodo (T) hay una fórmula básica en función del número de pisos, $T = 0{,}1N$, donde N es el número de pisos. El valor aproximado inicial del periodo es: $T = 0{,}1s$.

Ecuaciones para encontrar S_a:

Para Periodos entre 0 **y** T_0**:**

$$S_a = A_m * \frac{S_a * A_m}{T_0} * T \tag{10.1}$$

Para Periodos entre T_0 **y** T_c**:**

$$S_a = S_m \tag{10.2}$$

Para Periodos entre T_c **y** T_L**:**

$$S_a = \frac{S_m * T_c}{T} \tag{10.3}$$

Para Periodos mayores a T_L**:**

$$S_a = \frac{S_m * T_c * T_L}{T^2} \tag{10.4}$$

- Aceleración máxima del terreno (Am): 0.25 g
- Aceleración máxima espectral (Sm): 0.68 g
- Periodo inicial (T_o): 0.22 s
- Periodo corto (T_c): 1.15 s
- Periodo largo (T_L): 2.5 s

$$\therefore S_a = 0{,}445g$$

10.1.4 Irregularidad estructural

$$R = \phi_a * \phi_p * \phi_r * R_0 \tag{10.5}$$

Usando la Tabla A.3-1, obtenemos el valor de $R_0 = 2{,}0$.

- Irregularidad en altura: $\phi_a = Regular$
- Irregularidad en planta: Tipo 2P, $\phi_p = 0{,}9$
- Redundancia estructural: $\phi_r = Regular$

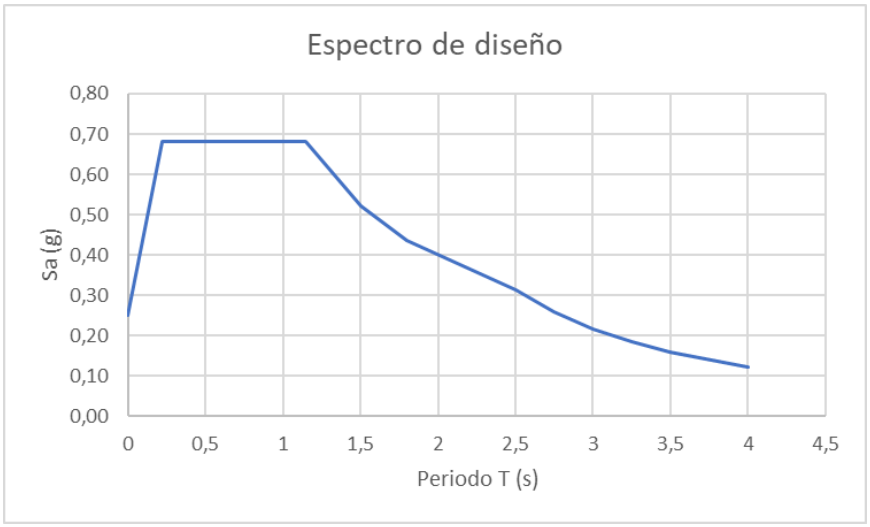


Figura 10.2.: Espectro de diseño de acuerdo a la microzonificación sísmica de Cali, zona 6.

$$\therefore R = 1{,}8$$

10.1.5 Método de la Fuerza horizontal

Periodo fundamental de la estructura aproximado:

$$T_a = C_t * h^{\alpha} \tag{10.6}$$

De la Tabla A.4.2-1 de la NSR-10 se obtienen los valores de C_t y α:

- $C_t = 0{,}049$
- $\alpha = 0{,}75$

$$\therefore T_a = 0{,}094s$$

Cortante sísmico en la base:

$$V_s = S_a * g * M \tag{10.7}$$

$$V_s = 148{,}02kN$$

Fuerza Sísmica:

$$F_x = C_{vx} * V_s$$
$$c_{vx} = \frac{m_x * h_x^k}{\sum_{i=1}^{n}(m_i h_i^k)}$$

donde:

$$C_{vx} = 1$$
$$k = 1$$
$$\therefore F_x = 148{,}02kN$$

El momento será la fuerza sísmica multiplicada por la altura de la casa:

$$M = F_x * h_x$$
$$M = 148{,}02kN * 2{,}4m$$
$$M = 355{,}25kN * m$$

Fuerzas sísmicas reducidas de diseño:

$$E = F_x/R \tag{10.8}$$

Así, con $R = 1{,}8$ finalmente tenemos las fuerzas sísmicas de diseño:

$$Fx = 82{,}23kN$$
$$M = 197{,}36kN * m$$

10.1.6 Parámetros de diseño

- Unidad de mampostería: Bloque de plástico reciclado de perforación vertical.
- Resistencia a la compresión de la mampostería: $f'_m = 9{,}75MPa$.
- Módulo de elasticidad de la mampostería: $E_m = 1378MPa$.
- $G_m = 0{,}4 * E_m$.

- Acero de $f_y = 420MPa$.
- Altura total de la edificación = $2{,}4m$
- Carga viva = $0{,}18T/m^2$

10.2 Diseño Muros

Luego de realizar el análisis, evaluación de cargas y el cálculo de las fuerzas sísmicas, se debe calcular la carga que recibe cada uno de los muros, para ello, es necesario calcular el centro de rigidez y el centro de masa de la edificación.

10.2.1 Cálculo de centro de Rigidez de Muros

Para el análisis estructural se utilizará un modelo de muros estructurales en voladizo empotrados en la base y arriostrados lateralmente por el diafragma de piso y de cubierta.

$$K = \frac{1}{\frac{H^3}{3EI} + \frac{\alpha_s H}{GA}} \tag{10.9}$$

donde:
A = Área resistente al corte = $b_{eff} * L$
I = Inercia de la sección = $b_{eff} * L^3/12$
α_s = Relación del área de corte con el área total = 1.2

Cálculo del espesor efectivo de cada muro

$$b_{eff} = \frac{0{,}1 * L - 0{,}09 * 0{,}092 * \#C.V.}{L} \tag{10.10}$$

donde:
$\#C.V.$ =Número de celdas vacías (no inyectadas)
L = Longitud Muro
x_c, y_c = Coordenadas del centroide del muro

MURO	yc [m]	L [m]	#C.V.	b eff [m]
1X	0,8	0,8	4	0,059
2X	0,8	1,0	6	0,050
3X	0	0,9	5	0,054
4X	0	1,1	7	0,047
5X	2,4	0,3	1	0,072
6X	2,4	0,8	3	0,069
7X	2,4	0,4	1	0,079
8X	4,9	3,6	30	0,031
9X	4,9	5,9	46	0,035
10X	4,9	1,1	7	0,047
11X	6	0,6	3	0,059
12X	6	0,7	3	0,065
13X	6	3,1	24	0,036
14X	8,5	4,0	32	0,034
15X	8,5	0,3	1	0,072
16X	9,1	1,0	6	0,050
17X	9,1	1,1	7	0,047
18X	8,5	4,1	34	0,031

Tabla 10.1.: Cálculo espesor efectivo muros en X

MURO	xc [m]	L [m]	#C.V.	b eff [m]
1Y	0	1,0	7	0,042
2Y	5,1	4,8	35	0,040
3Y	8,7	3,2	22	0,043
4Y	0	2,1	14	0,045
5Y	8,7	0,8	5	0,048
6Y	10,2	2,4	18	0,038
7Y	11,8	2,4	18	0,038
8Y	12,8	0,8	5	0,048
9Y	0	0,9	6	0,045
10Y	3,6	2,4	18	0,038
11Y	5,1	3,0	21	0,042
12Y	5,2	0,5	3	0,050
13Y	8,7	3,0	21	0,042
14Y	12,8	0,7	4	0,053

Tabla 10.2.: Cálculo espesor efectivo muros en Y

MURO	**I** $[m^4]$	**A** $[m^2]$	K_x **[T/m]**	$K_x * yc$
1X	0,003	0,047	69,02	55,21
2X	0,004	0,050	110,95	88,76
3X	0,003	0,049	88,74	0,00
4X	0,005	0,052	135,56	0,00
5X	0,000	0,022	4,82	11,56
6X	0,003	0,055	81,21	194,90
7X	0,000	0,032	12,39	29,73
8X	0,121	0,112	1341,15	6571,62
9X	0,607	0,209	3278,91	16066,66
10X	0,005	0,052	135,56	664,25
11X	0,001	0,035	30,13	180,79
12X	0,002	0,045	51,84	311,03
13X	0,089	0,111	1183,76	7102,54
14X	0,180	0,135	1746,29	14843,50
15X	0,000	0,022	4,82	40,93
16X	0,004	0,050	110,95	1009,67
17X	0,005	0,052	135,56	1233,61
18X	0,180	0,128	1687,84	14346,64
		$\sum Kxi =$	10209,49	62751,39

Tabla 10.3.: Cálculo de la Rigidez de cada muro en la dirección X

MURO	**I** $[m^4]$	**A** $[m^2]$	K_y **[T/m]**	$K_y * xc$
1Y	0,004	0,042	92,70	0,00
2Y	0,365	0,190	2730,16	13923,83
3Y	0,118	0,138	1507,49	13115,15
4Y	0,035	0,094	656,79	0,00
5Y	0,002	0,039	56,83	494,40
6Y	0,044	0,091	746,09	7610,10
7Y	0,044	0,091	746,09	8803,85
8Y	0,002	0,039	56,83	727,40
9Y	0,003	0,040	73,62	0,00
10Y	0,044	0,091	746,09	2685,92
11Y	0,095	0,126	1302,41	6642,28
12Y	0,001	0,025	15,18	78,94
13Y	0,095	0,126	1302,41	11330,95
14Y	0,002	0,037	42,33	541,87
		$\sum Kyi =$	10075,01	65954,68

Tabla 10.4.: Cálculo de la rigidez de los muros en la dirección Y

Centro de Rigidez de los Muros

$$\overline{x}_{c.r.} = \frac{\sum K_{yi} x_{ci}}{\sum K_{yi}} \tag{10.11}$$

(10.12)

$$\overline{y}_{c.r.} = \frac{\sum K_{xi} y_{ci}}{\sum K_{xi}} \tag{10.13}$$

Reemplazando:

$$\overline{x}_{c.r.} = \frac{65964,68}{10075,01}$$

$$\overline{y}_{c.r.} = \frac{62751,39}{10209,49}$$

Así, las coordenadas del centro de rigidez son:

$$\overline{x}_{c.r.} = 6{,}55m$$

$$\overline{y}_{c.r.} = 6{,}15m$$

10.2.2 Centro de Masa Casa

Centro de Masa de los Muros

Las ecuaciones para el cálculo del centro de masas de los muros se presentan a continuación.Para calcular la masa de los muros se tiene en cuenta el número de celdas inyectadas con mortero, con este dato se obtiene un porcentaje de solidez. La masa de cada muro se obtiene al sumar la masa de los bloques y la masa del mortero inyectado.

$$M_j = H_{muro} * L_{muro} * W_{bloque}/m^2 + C.LL. * A_{celda} * H_{muro} * \gamma_{concreto} \qquad (10.14)$$

donde:
$C.LL.$ = Cantidad de celdas rellenas con mortero.
$W_{bloque}/m2 = 0{,}0219T/m^2$
$A_{celda} = 0{,}0083m^2$
$H_{muro} = 2{,}4m$
$\gamma_{concreto} = 2{,}4T/m^3$

$$x = \frac{\sum M_j x_{cj}}{\sum M_j} = 6{,}56m \tag{10.15}$$

$$y = \frac{\sum M_j y_{cj}}{\sum M_j} = 5{,}08m \tag{10.16}$$

Centro de Masa Placa

$$x = \frac{\sum A * x_c}{\sum A} = 5{,}97m \tag{10.17}$$

$$y = \frac{\sum A * y_c}{\sum A} = 4{,}85m \tag{10.18}$$

PARTICION	ANCHO [m]	LARGO [m]	AREA [m^2]	xc [m]	yc [m]	A * xc	A * yc
1	8,8	7,8	68,64	4,35	4,65	298,58	319,18
2	3,1	6,2	19,22	10,30	5,45	197,97	104,75
3	1,0	3,7	3,70	12,35	6,70	45,70	24,79
4	3,7	0,6	2,22	6,90	8,85	15,32	19,65
5	3,7	0,8	2,96	6,90	0,35	20,42	1,04
		$\sum =$	96,74		$\sum =$	577,99	469,40

Tabla 10.5.: Cálculo de Centro de Masa Placa

Centro de Masa Total

ELEMENTO	M [T]	x [m]	y [m]	M * x	M * y
MUROS	10,75	6,56	5,08	70,55	54,65
PLACA	23,22	5,97	4,85	138,72	112,66
$\sum =$	33,97		$\sum =$	209,26	167,30

Tabla 10.6.: Cálculo de centro de Masa Edificación

Así, las coordenadas del centro de masa son:

$$\overline{x}_{C.M.} = 6{,}16m$$

$$\overline{y}_{C.M.} = 4{,}92m$$

10.2.3 Excentricidad

El absoluto de la excentricidad de la casa es:

$$e_x = |\overline{x}_{C.M.} - \overline{x}_{c.r.}| = 0{,}39 \tag{10.19}$$

$$e_y = |\overline{y}_{C.M.} - \overline{y}_{c.r.}| = 1{,}22 \tag{10.20}$$

Excentricidad accidental

Según define la NSR-10 en A.3.6.7.1 debe considerarse una excentricidad accidental que corresponde al 5 % de la dimensión de la edificación en cada dirección.

En sentido X: $e_{ax} = 0{,}05 * 12{,}8 = 0{,}64m$
En sentido Y: $e_{ay} = 0{,}05 * 9{,}1 = 0{,}45m$

Excentricidad de Diseño

La excentricidad de diseño es la suma de la excentricidad y la excentricidad accidental.

$$e_x = 1{,}03m$$
$$e_y = 1{,}68m$$

10.2.4 Cálculo de fuerzas y momentos actuantes en cada muro

Cortante total = *V* directo + *V* torsión

Cortante Directo

$$V_{xj} = \frac{K_{xj}}{\sum K_{xj}} * V_x \tag{10.21}$$

$$V_{yj} = \frac{K_{yj}}{\sum K_{yj}} * V_x \tag{10.22}$$

Cortante por Torsión

$$V_{xj} = \frac{V_x * e_y * K_{xj} * y_j}{\sum (K_{xj} * y_j^2) + \sum (K_{yj} * x_j^2)} \tag{10.23}$$

$$V_{yj} = \frac{V_x * e_x * K_{yj} * x_j}{\sum (K_{xj} * y_j^2) + \sum (K_{yj} * x_j^2)} \tag{10.24}$$

MURO	K_x $[T/m^2]$	**y [m]**	$K_x * y^2$	**V torsion [T]**	**V directo [T]**	**V total [T]**	**Momento [T*m]**
1X	69,02	-2,45	413,71	0,010	0,059	0,069	0,142
2X	110,95	-2,45	665,08	0,016	0,095	0,111	0,228
3X	88,74	-3,25	936,37	0,017	0,076	0,093	0,183
4X	135,56	-3,25	1430,40	0,026	0,116	0,142	0,279
5X	4,82	-0,85	3,47	0,000	0,004	0,004	0,010
6X	81,21	-0,85	58,44	0,004	0,070	0,074	0,167
7X	12,39	-0,85	8,92	0,001	0,011	0,011	0,025
8X	1341,15	1,65	3658,68	0,131	1,150	1,281	2,760
9X	3278,91	1,65	8944,95	0,321	2,812	3,133	6,748
10X	135,56	1,65	369,82	0,013	0,116	0,130	0,279
11X	30,13	2,75	228,14	0,005	0,026	0,031	0,062
12X	51,84	2,75	392,50	0,008	0,044	0,053	0,107
13X	1183,76	2,75	8963,05	0,193	1,015	1,208	2,436
14X	1746,29	5,25	48162,93	0,544	1,497	2,041	3,594
15X	4,82	5,25	132,80	0,002	0,004	0,006	0,010
16X	110,95	5,85	3799,25	0,039	0,095	0,134	0,228
17X	135,56	5,85	4641,92	0,047	0,116	0,163	0,279
18X	1687,84	5,25	46550,74	0,526	1,447	1,973	3,474

Tabla 10.7.: Cortantes y momentos de Muros en X

$$\sum (K_{xj} * y_j^2) = 129361,18$$

$$\sum (K_{yj} * x_j^2) = 118043,65$$

MURO	$K_y\ T/m^2$	x	$K_y * x^2$	V torsion [T]	V directo [T]	V total [T]	Momento [T*m]
1Y	92,70	-5,13	2443,09	0,017	0,081	0,098	0,193
2Y	2730,16	-0,03	3,12	0,003	2,372	2,376	5,694
3Y	1507,49	3,57	19171,77	0,195	1,310	1,505	3,144
4Y	656,79	-5,13	17310,37	0,122	0,571	0,693	1,370
5Y	56,83	3,57	722,72	0,007	0,049	0,057	0,119
6Y	746,09	5,07	19149,29	0,137	0,648	0,786	1,556
7Y	746,09	6,67	33154,72	0,181	0,648	0,829	1,556
8Y	56,83	7,67	3339,79	0,016	0,049	0,065	0,119
9Y	73,62	-5,13	1940,42	0,014	0,064	0,078	0,154
10Y	746,09	-1,53	1755,24	0,042	0,648	0,690	1,556
11Y	1302,41	-0,03	1,49	0,002	1,132	1,133	2,716
12Y	15,18	0,07	0,07	0,000	0,013	0,013	0,032
13Y	1302,41	3,57	16563,62	0,169	1,132	1,300	2,716
14Y	42,33	7,67	2487,94	0,012	0,037	0,049	0,088

Tabla 10.8.: Cortantes y momentos de Muros en Y

Combinaciones de carga

Se evalúan las siguientes combinaciones de carga, tomando la carga más desfavorable para la edificación.

1. D
2. D + L
3. 0.6 D + 0.7 E

MURO	Area aferente [m^2]	Carga Muerta [T]	carga viva [T]	D	D + L	0,6D
1X	1,948	0,857	0,351	0,857	1,207	0,514
2X	4,508	1,984	0,811	1,984	2,795	1,190
3X	1,716	0,755	0,309	0,755	1,064	0,453
4X	1,716	0,755	0,309	0,755	1,064	0,453
5X	0,269	0,118	0,048	0,118	0,167	0,071
6X	0,596	0,262	0,107	0,262	0,369	0,157
7X	0,289	0,127	0,052	0,127	0,179	0,076
8X	9,547	4,201	1,718	4,201	5,919	2,520
9X	8,831	3,886	1,590	3,886	5,475	2,331
10X	1,347	0,593	0,242	0,593	0,835	0,356
11X	1,330	0,585	0,239	0,585	0,824	0,351
12X	1,291	0,568	0,232	0,568	0,801	0,341
13X	5,554	2,444	1,000	2,444	3,444	1,466
14X	3,633	1,598	0,654	1,598	2,252	0,959
15X	0,315	0,139	0,057	0,139	0,195	0,083
16X	1,047	0,461	0,188	0,461	0,649	0,276
17X	1,108	0,487	0,199	0,487	0,687	0,292
18X	4,708	2,072	0,847	2,072	2,919	1,243
1Y	2,090	0,920	0,376	0,920	1,296	0,552
2Y	10,363	4,560	1,865	4,560	6,425	2,736
3Y	5,626	2,476	1,013	2,476	3,488	1,485
4Y	4,068	1,790	0,732	1,790	2,522	1,074
5Y	1,467	0,646	0,264	0,646	0,910	0,387
6Y	2,925	1,287	0,526	1,287	1,813	0,772
7Y	1,555	0,684	0,280	0,684	0,964	0,411
8Y	1,561	0,687	0,281	0,687	0,968	0,412
9Y	1,665	0,733	0,300	0,733	1,032	0,440
10Y	3,728	1,640	0,671	1,640	2,311	0,984
11Y	4,492	1,976	0,809	1,976	2,785	1,186
12Y	0,920	0,405	0,166	0,405	0,570	0,243
13Y	5,106	2,247	0,919	2,247	3,166	1,348
14Y	1,562	0,687	0,281	0,687	0,968	0,412

Tabla 10.9.: Combinaciones de carga

MURO	P [T]	V total [T]	Momento [T*m]
1X	1,207	0,069	0,142
2X	2,795	0,111	0,228
3X	1,064	0,093	0,183
4X	1,064	0,142	0,279
5X	0,167	0,004	0,010
6X	0,369	0,074	0,167
7X	0,179	0,011	0,025
8X	5,919	1,281	2,760
9X	5,475	3,133	6,748
10X	0,835	0,130	0,279
11X	0,824	0,031	0,062
12X	0,801	0,053	0,107
13X	3,444	1,208	2,436
14X	2,252	2,041	3,594
15X	0,195	0,006	0,010
16X	0,649	0,134	0,228
17X	0,687	0,163	0,279
18X	2,919	1,973	3,474
1Y	1,296	0,098	0,193
2Y	6,425	2,376	5,694
3Y	3,488	1,505	3,144
4Y	2,522	0,693	1,370
5Y	0,910	0,057	0,119
6Y	1,813	0,786	1,556
7Y	0,964	0,829	1,556
8Y	0,968	0,065	0,119
9Y	1,032	0,078	0,154
10Y	2,311	0,690	1,556
11Y	2,785	1,133	2,716
12Y	0,570	0,013	0,032
13Y	3,166	1,300	2,716
14Y	0,968	0,049	0,088

Tabla 10.10.: Solicitaciones

10.2.5 Chequeo Derivas

De acuerdo a lo establecido en el literal A.6.4.1.4 de la NSR-10: "No hay límites de deriva en edificaciones de un piso, siempre que los muros y las particiones interiores y exteriores así como los cielorrasos se diseñen para acomodar las derivas del piso".

Sin embargo, se realiza un chequeo superficial con las derivas por efecto traslacional o desplazamiento horizontal, que son la causa de mayores deformaciones. De acuerdo a lo expuesto en la NSR-10 (2010) en el numeral A.6.1.2: "se entiende por deriva el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma

línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos de la edificación".

El desplazamiento horizontal en cada dirección de estudio se calcula como:

$$\delta_{cm,j} = \frac{F_j}{\sum K_j}$$

F_x	$\sum K_x$	$\delta_{cm,x}$ [m]	F_y	$\sum K_y$	$\delta_{cm,y}$ [m]
8,75	10209,49	0,000857	8,75	10075,01	0,000869

Tabla 10.11.: Desplazamiento horizontal debido a la acción del sismo en el centro de masa

El desplazamiento horizontal adicional causado por los efectos torsionales, para el chequeo se calcularon los desplazamientos en los 5 nodos mas alejados de la estructura de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{M}{J}$$

$$\theta = \frac{F_x e_y - F_y e_x}{\sum (K_{xj} * y_j^2) + \sum (K_{yj} * x_j^2)}$$

$$\delta_{t,j} = y_j \theta_i$$

	M [T*m]	J	x[m]	y[m]	θ [rad]	$y\theta$	$x\theta$
NUDO A	5,693	247404,83	6,3	2,4	2,301E-05	5,523E-05	0,00014
NUDO B	5,693	247404,83	-6,6	2,4	2,301E-05	5,523E-05	-0,00015
NUDO C	5,693	247404,83	-6,6	-5,4	2,301E-05	-0,000124	-0,00015
NUDO D	5,693	247404,83	2,2	-6,2	2,301E-05	-0,000143	0,00005
NUDO E	5,693	247404,83	6,3	-1,3	2,301E-05	-2,99E-05	0,00014

Tabla 10.12.: Desplazamiento adicional por efecto torsional

Luego de obtener los valores de los desplazamientos por traslación y torsión, se calcula la deriva máxima:

$$\Delta_x = \delta_{cm,x} + y\theta \tag{10.25}$$

$$\Delta_y = \delta_{cm,y} + x\theta \tag{10.26}$$

$$\Delta_{max} = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} \tag{10.27}$$

	$\delta_{cm,x}$	$\delta_{cm,y}$	$y\theta$	$x\theta$	Δ_x	Δ_y	Δ_{max}
NUDO A	0,00086	0,00087	5,523E-05	0,00014	0,00091	0,00101	0,00136
NUDO B	0,00086	0,00087	5,523E-05	-0,00015	0,00091	0,00072	0,00116
NUDO C	0,00086	0,00087	-0,000124	-0,00015	0,00073	0,00072	0,00102
NUDO D	0,00086	0,00087	-0,000143	0,00005	0,00071	0,00092	0,00116
NUDO E	0,00086	0,00087	-2,99E-05	0,00014	0,00083	0,00101	0,00131

Tabla 10.13.: Desplazamientos máximos en los nodos

La deriva máxima admitida por la NSR-10 (2010) en estructuras de mampostería es del 0.5 % $\Delta_{Max} \leq 0{,}005 h_{pi}$, donde h_{pi} es la altura de piso. Teniendo en cuenta esto, la deriva máxima permisible es:

$$\Delta_{Max} = 0{,}005 * 2{,}4$$

$$\Delta_{Max} = 0{,}012$$

Se observa que las derivas calculadas en la tabla 10.13 son menores a la deriva máxima admitida por la norma. Por lo tanto la estructura es suficientemente rígida

10.2.6 Diseño Muro Estructural

Como referencia se presenta el diseño del muro 8X en la figura 10.3.

10.2.7 Diseño Losa

El diseño de la losa se realizó siguiendo los criterios de la norma NSR-10 (2010), Título C, y los ejemplos ilustrados en el capítulo 12 del libro de Nilson (2016), Diseño de Estructuras de Concreto. De acuerdo a las condiciones de continuidad y número de paneles de la losa, el método empleado para esta edificación fue el método de los

DISEÑO POR FLEXION:		MURO 8X					
P (kN)	**59,19**						
M (kN*m)	**27,60**						
f'm (MPa)	9,75	**Esfuerzos admisibles**		>	**Esfuerzos solicitados**		✔
Em (MPa)	1378	Fa (MPa)	1,950	>	fa (MPa)	0,530	✔
Es (MPa)	200000	Fb (MPa)	3,250	>	fb (MPa)	0,322	✔
n =Es/Em	145,14	Fs (MPa)	170	>	fs (MPa)	37,496	✔
fy (Mpa)	420						
h (mm)	2400						
L (mm)	3600	**CAPACIDAD A MOMENTO ADMISIBLE**					
b eff (mm)	31,00						
As (mm2)	129	Mm	503,03	kN*m			
ρ	0,0012	Ms	62,568	kN*m	Controla!		
k	0,5545						
j	0,8152						
DISEÑO POR CORTANTE:							
V (kN)	**12,81**						
d (mm)	3500	Fv (MPa)	0,264	>	fv (MPa)	0,145	✔
M/(V*d)	0,6154	**No se requiere refuerzo a cortante**					

Figura 10.3.: Hoja de Cálculo Muro 8x

coeficientes. Luego del análisis de las dimensiones de las luces, se optó por una losa aligerada con nervaduras en dos direcciones, espaciadas 60cm de centro a centro, con un espesor total de losa de 25cm.

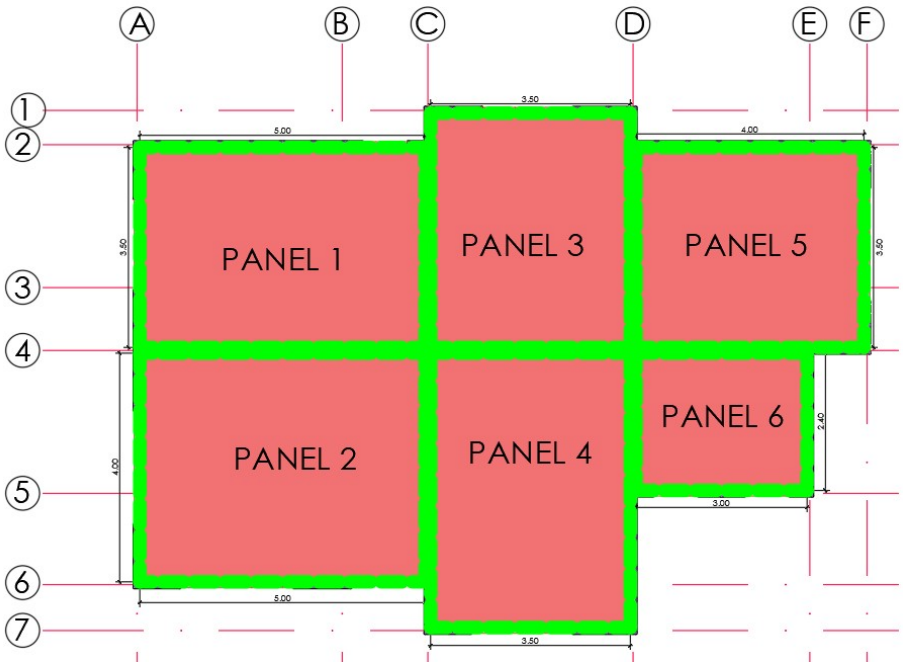


Figura 10.4.: Distribución paneles para diseño

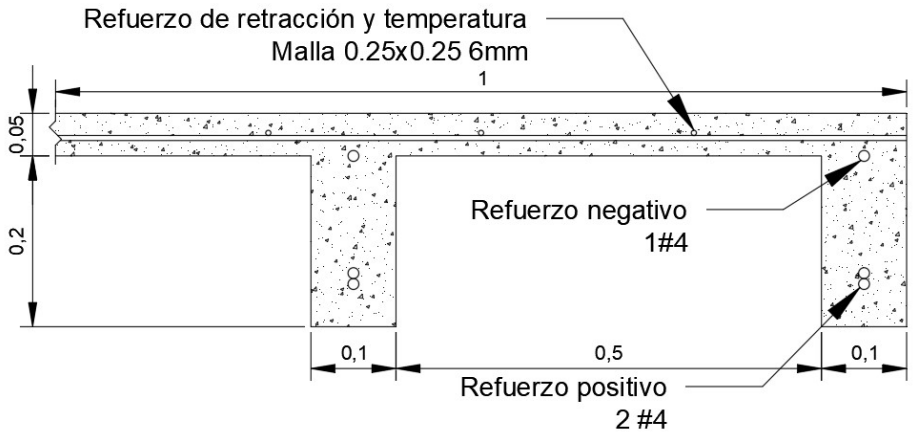


Figura 10.5.: Corte transversal losa con detalle de refuerzo

10.2.8 Diseño dinteles

Las alturas típicas de las ventanas y puertas son de 2.16m. A esta altura, el dintel limita directamente con la losa; por ello se predimensiona el dintel con una altura de 25cm y ancho de 10cm y la carga que soporta es el peso propio del dintel y la carga

muerta y carga viva aportada por el área aferente de la losa.

Se presenta el diseño del dintel de una puerta ventana, el cual tiene una longitud de 2.00m. El dintel se diseña como una viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida. Se calcula la carga por metro lineal. La distancia entre viguetas es de 0.60m, por lo tanto el ancho aferente para cada dintel es de 0.30m.

$W_{dintel} =$	$V_{dintel} * \gamma_{concreto}$
$W_{dintel} =$	$0{,}10m * 0{,}25m * 2400kg/m^3$
W_{dintel}	$60kg/m$
W_{placa}	$CargaMuertaPlaca * Areaaferente$
$W_{placa} =$	$444kg/m^2 * 0{,}30m$
$W_{placa} =$	$133{,}2kg/m$
$W_{viva} =$	$CargaVivaPlaca * Areaaferente$
$W_{viva} =$	$180kg/m^2 * 0{,}30m$
$W_{viva} =$	$54kg/m$
$W_u =$	$1{,}2CM + 1{,}6CV$
$W_u =$	$1{,}2(60 + 133{,}2) + 1{,}6(54)$
$W_u =$	$318{,}24kg/m$
$W_u =$	$W_u * L^2/8$
$W_u =$	$175{,}43kg - m$
$M_u \leq$	ϕM_n
$\phi M_n =$	$\phi\rho f_y bd^2(1 - 0{,}59\rho f_y/f'_c)$
$\phi M_n =$	$17543kg - cm^2$

donde:

$f'_c = 210\ kg/cm^2$

$f_y = 4200\ kg/cm^2$

$\phi = 0.90$

$b = 10\ cm$

$d = 21\ cm$

despejando ρ, se tiene:

$$\rho = 0{,}00107$$
$$A_s = 70mm^2$$
$$\rho_b = 0{,}0217$$
$$\rho_{max} = 0{,}75\rho_b = 0{,}0163$$

Si $\rho \leq \rho_b$, el diseño es subreforzado.

De acuerdo con el literal D.10.6 de la NSR-10 se define el refuerzo longitudinal para anchos inferiores a 110mm, y en los casos en que el entrepiso sea una losa maciza, el refuerzo mínimo debe ser dos barras N°4(1/2") ó 12M(12mm). En ningún caso, el refuerzo longitudinal puede ser menor que el requerido para atender los esfuerzos de diseño. Así, el acero de diseño es:

$$A_s = 258mm^2$$
$$\rho = 0{,}0123 \leq \rho_b \quad OK.$$

Verificación a cortante

El cortante proporcionado por la viga de amarre se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_u \leq \phi V_n$$
$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_c = 0{,}17\lambda\sqrt{f'_c}b_w d$$
$$V_c = 1635{,}98kg$$
$$\phi V_c = 0{,}75 * 1635{,}98kg = 1226{,}98kg$$
$$V_u = W_u * L/2 = 334{,}15kg$$

La resistencia a cortante aportada por el concreto soporta la cortante solicitada, por lo que no es necesario un refuerzo transversal.

11. CONCLUSIONES

Este trabajo de grado evaluó el comportamiento mecánico de bloques, muretes y muros a escala real de mampostería estructural fabricados con bloques de plástico industrial reciclado. Los parámetros evaluados incluyeron la resistencia a la compresión, flexión, compresión axial en muretes, compresión diagonal, resistencia a cortante y, finalmente, ensayos a escala real frente a cargas laterales. El trabajo también incluyó la formulación de expresiones de diseño y, posteriormente, el diseño de una vivienda localizada en una zona sísmica alta, utilizando el sistema estructural basado en muros de mampostería y de acuerdo a los resultados obtenidos del desempeño mecánico del material. Los resultados permitieron alcanzar el diseño a satisfacción de la estructura garantizando los esfuerzos en el material en el rango elástico.

Los ensayos realizados a las unidades de bloques arrojaron resistencias promedio a la compresión pura de 11.6 MPa para la primera versión (analizada en este estudio). Actualmente se están ensayando nuevas versiones del bloque que han mejorado sus características mecánicas, llegando a resistencias promedio de 18 MPa, pero que están fuera del alcance de este trabajo de grado. La resistencia a la adherencia entre el plástico y el mortero significó esfuerzos promedio del orden 1.6 MPa, indicando una condición crítica de diseño que debe ser tenida en cuenta.

Dada la geometría del bloque, la resistencia a cortante está provista por las pestañas de transición que permiten que los bloques encajen uno sobre otro. Esta condición crítica del bloque se evaluó a través de ensayos de transmisión de cortante. En la configuración de tres bloques donde solo hay una celda en contacto, se obtuvo una resistencia promedio de 275 kgf, presentando una falla por cortante en las pestañas. En la configuración de seis bloques donde hay tres celdas en contacto, se obtuvo una resistencia mayor pero no se produjo una falla por cortante sino una falla de pandeo o compresión en la celda que recibe la carga. Este ensayo permitió determinar el valor mínimo de resistencia que soportan las uniones entre bloques y que al aumentar el

número de bloques unidos, también aumenta la resistencia a cortante.

La norma NSR-10 (2010) recomienda en el literal D.8.1.4 que la resistencia a la compresión de la mampostería f'_m para mampostería estructural parcialmente reforzada no puede ser inferior a 8 MPa. En los ensayos realizados se obtuvo un valor mayor para este parámetro, por lo que se concluye que esta mampostería es apta para este sistema constructivo. Se recomienda realizar nuevos ensayos de este tipo en las nuevas versiones, con mortero inyectado y sin refuerzo.

Según la NTC-4925 (2001), el ensayo para determinar la resistencia a la tracción diagonal (cortante) en muretes de mampostería permite encontrar el esfuerzo cortante provisto por la mampostería. Aunque en la norma NSR-10 (2010) este parámetro no es necesario para calcular la cortante nominal resistida por la mampostería, en otras normas como las de Nicaragua y México sí es necesario. Sin embargo, en este estudio se realizó un análisis para obtener la cortante nominal relacionando este parámetro con el área resistente a cortante, los resultados obtenidos eran aceptables, pero generaban incertidumbre al variar el área. Por otro lado, este ensayo permitió encontrar la cortante resistida por un determinado número de bloques, lo cual ayudó al análisis de la cortante en función de la cantidad de bloques. Este último análisis generó menor incertidumbre en el cálculo de la cortante nominal resistida por la mampostería al variar el número de bloques o el área. Por lo tanto, se concluye que, de las ecuaciones planteadas para determinar la resistencia a cortante y de los ensayos analizados, esta depende más significativamente del número de bloques o del área de contacto, y la ecuación 9.4 se ajusta más a los datos recopilados experimentalmente, como se muestra en los resultados obtenidos.

El análisis numérico desarrollado y ajustado con los datos experimentales permite presentar ecuaciones del comportamiento en el rango lineal. Para un análisis más detallado, que involucre diseño último o diseño por desempeño, se requiere mayor información experimental que determine un mejor conocimiento del material.

Del diseño estructural y del ensayo de muros a escala real se infiere un buen comportamiento frente a cargas laterales. Sería conveniente realizar estudios en los que se incluyera un refuerzo horizontal que contribuya a la resistencia a cortante, así como

investigar la influencia de la carga vertical del muro en la capacidad a cortante.

Bibliografía

ACI-Committee-318. (2014). *Reglamento de Requisitos para el Concreto Estructural (ACI 318S-14)* (Vol. 22). Farmington Hills:2014.

Afanador García, N., Guerrero Gómez, G., y Monroy Sepúlveda, R. (2012). Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mampostería. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, *22*(1), 43–58.

Alcocer, S. M. (1997). Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión. En *Memorias del xi congreso nacional de ingeniería sísmica* (Vol. 1, pp. 164–191).

Amrhein, J. E. (2009). *Reinforced masonry engineering handbook: clay and concrete masonry* (6.ª ed.). CRC Press.

ASTM, D 2990. (2009). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM Int.

ASTM, D 638. (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM Int.

ASTM, E 519. (2002). *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*. ASTM Int.

Del Valle Rios, P., Espinoza Ordás, J. A., Estrada Zendejas, L. A., y González Bustos, P. (2024). Comparación de bloques para construcción con mayor relación de sustentabilidad en residencia social.

Gaggino, R. (2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción. *Revista Invi*, *23*(63).

Gutíerrez Junco, O. J. (2003). *Mampostería estructural* (Tesis de Master no publicada). Universidad de los Andes.

Lamus Báez, F. A., y Andrade Pardo, S. (2020). *Flexión en vigas de concreto reforzado: método elástico (asd)*. Universidad de la Salle.

López Pareja, J. D., y Rojas Trejos, D. (2019). *Ladrillo ecopeto*. Universidad Católica de Manizales.

Mampostería, C. (2008). Guía para el análisis de estructuras de mampostería. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE)*.

Mistler, M. (2006). *Deformation-based seismic measure concept for masonry constructions* (Tesis Doctoral no publicada). Doctoral thesis, University of Aachen, Germany.

Nilson, A. (2016). *Design of concrete structures* (Vol. 15th Edition). Mc Graw Hill.

NSR-10. (2010). *Norma Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

NTC-3495. (2003). Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*.

NTC-4017. (2005). Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*.

NTC-4925. (2001). Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción diagonal (cortante) en muretes de mampostería. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*.

NTG-41051. (2012). Método de ensayo. determinación de la tracción diagonal (corte) en ensamblajes de mampostería. *Comisión Guatemalteca de Normas*.

Pertuz, A. M. (2010). Construcción y medio ambiente. *Módulo Arquitectura Cuc*, *9*, 105–114.

Rahman, M. M., Islam, M. A., Ahmed, M., y Salam, M. A. (2012). Recycled polymer materials as aggregates for concrete and blocks. *Journal of Chemical Engineering*, *27*, 53–57.

RNC-07. (2007). *Norma Mínima de Diseño y Construcción de Mampostería*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Rodríguez Miranda, O. A. (2015). *Análisis y conceptos básicos para el diseño de mampostería estructural según la norma de sismo resistencia nsr-10*. Universidad Santo Tomás.

San Bartolomé Ramos, Á. F. (1994). Construcciones de albañilería: comportamiento sísmico y diseño estructural.

Takeuchi, C. P. (2010). *Comportamiento en la mampostería estructural*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogota.

Vargas García, J. C., y cols. (2015). *Sistema modular de piezas de mampostería en plástico poliestireno unidas mecánicamente*. Universidad La Gran Colombia.

Zaman, A. U., y Lehmann, S. (2011). *Challenges and opportunities in transforming a city into a "zero waste city"* (Vol. 2) (n.º 4). Molecular Diversity Preservation International (MDPI).