



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“ESTUDIO PRELIMINAR SOBRE LA TRANSFERENCIA DE
FUERZAS LATERALES EN MUROS NO
ESTRUCTURALES DE CCA”**

TESIS

PRESENTADO POR:

I.C. EDUARDO EFREN CRUZ ESCAREÑO

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ESTRUCTURAS

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2020

Aunque este trabajo hubiera servido para el Examen de Grado y fuera aprobado por el Sínodo, sólo el autor es responsable de las Doctrinas emitidas en él.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada y a la Universidad Autónoma de Yucatán, por su apoyo para la realización de este proyecto de tesis.

RESUMEN

Los muros no estructurales son ampliamente utilizados en la construcción de diversas edificaciones. Estos muros no proporcionan rigidez ni resistencia a la estructura ante cargas laterales. Pueden construirse de mampostería no reforzada, reforzada interiormente o confinados. Los muros no estructurales de mampostería de CCA se encuentran desligados perimetralmente mediante juntas de espuma de poliuretano de 2 cm de espesor. En los últimos años se han empezado a construir muros no estructurales con piezas de concreto celular de autoclave (CCA).

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM) (GCM 2017) y en el Código de Requerimientos y Especificaciones para la Construcción de Estructuras de Mampostería (ACI 530) (MSJC 2011) no se especifican el uso de algún material de relleno (juntas flexibles) para las holguras entre los marcos estructurales y los muros no estructurales. En general, se asume que no hay transferencia de fuerzas a los muro no estructurales. Sin embargo, se ha observado que conforme aumentan las distorsiones en los marcos estructurales existe interacción entre los marcos estructurales y los muros no estructurales. Lo anterior induce que exista contribución de los muros no estructurales a la rigidez y resistencia de la estructura. Adicionalmente, existe transferencia de fuerzas en el plano al muro no estructural (Tsantilis y Triantafillou 2018).

El objetivo de este trabajo fue determinar las fuerzas de transferencia entre marcos y muros no estructurales de CCA a través de la espuma de poliuretano. Las variables de estudio fueron la planta productora de CCA, la marca de mortero de pared delgada, la marca de espuma de poliuretano y el tipo de marco estructural. Para lo anterior, se determinaron las propiedades del CCA y de la espuma de poliuretano. Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad de los esfuerzos y fuerzas transferidas entre marcos estructuras y muros no estructurales de mampostería de CCA a través de la espuma de poliuretano.

Con base en los resultados experimentales obtenidos, se identificaron dos principales tipos de esfuerzos transferidos en el plano del muro no estructural. Los primeros están asociados con la compresión de la espuma de poliuretano en la junta vertical. Los segundos esfuerzos están asociados al cortante por adherencia de la junta de espuma de poliuretano en la junta horizontal superior. Se observó que los esfuerzos cortantes se transfieren hasta un desplazamiento de 1.60 mm y 4.80 mm, para marcos de concreto y acero, respectivamente. Posteriormente, solo se tienen la contribución de los esfuerzos de compresión.

Con base en el análisis de sensibilidad, se encontró que, por lo general, la falla por adherencia de la espuma de poliuretano se presenta a distorsiones menores que la de limitación de daños ante sismos frecuentes (0.20 %). Es decir, después de sismos frecuentes se podrían observar grietas horizontales entre la trabe del marco estructural y el muro. Por otra parte, la resistencia por cortante se alcanza a distorsiones menores que la condición de prevención contra el colapso (1.50 % para marcos de baja ductilidad), por lo que, después de sismos severos se podrían observar grietas diagonales en el muro no estructural.

ABSTRACT

Non-structural walls are widely used for construction of buildings. This type of walls does not contribute to the stiffness and strength of the structural system. Non-structural walls consist of a structural frame and a masonry panel; this panel can be unreinforced, reinforced, or confined masonry walls. A gap of 2 cm is given between the AAC non-structural walls and the structural frame. This gap is filled with polyurethane foam later (flexible joint). The use of autoclaved aerated concrete (AAC) has been spread in Mexico in recent years.

The Complementary Technical Standards for Design and Construction of Masonry Structures (NTCM) (GCM 2017) and the Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530) (MSJC 2011) do not provide requirements for any material used to fill the gap between the structural frame and the non-structural wall. In general, it is assumed that in-plane forces are not transferred to the non-structural masonry walls. However, it has been observed that as lateral displacements of the frame increases, compressive stress are developed in the flexible joint. This compressive stress between the structural frames and the non-structural walls are neglected. Therefore, the non-structural wall contributes to the stiffness and shear strength of the structural system. In addition, in-plane forces are transferred to the non-structural wall (Tsantilis y Triantafillou 2018).

The objective of this work was to determine the forces transferred through the polyurethane foam between the structural frame and AAC non-structural masonry walls. The variables studied were the AAC manufacturer, the thin bed mortar brand, the polyurethane foam brand, and the type of structural frame (reinforced concrete and steel). For that, properties of the AAC and the polyurethane foam were determined. Additionally, a sensitivity analysis of the stresses and forces transferred through the polyurethane foam between the structural frame and AAC non-structural was carried out.

Based on the experimental results obtained it was concluded that, two main in-plane loads are transferred to the non-structural wall. The first one is associated with the

compressive stress on the polyurethane foam at the vertical joint. The second one is associated with the adhesive bond shear stress on the polyurethane foam joint at the top horizontal joint. The shear stresses are transferred to the wall up to a displacement of 1.60 mm and 4.80 mm, for concrete frame and steel frame, respectively. After that, only the contribution of compressive stresses should be included.

Based on the sensitivity analysis it was observed that the failure related to adhesive bond strength of the polyurethane foam would be observed for drift ratios smaller than that specified for limitation of damage in frequent earthquakes (0.20 %). After frequent earthquakes, horizontal cracks could be observed between the top beam of the structural frame and the non-structural wall. Drift ratios associated with shear failure of the masonry panel were determined for different wall aspect ratios. In general, the shear strength could be observed for a smaller distortion than that specified for collapse prevention condition (1.50 % for low ductility frames). That is, after severe earthquakes, diagonal cracks could be observed in the non-structural walls.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Alcance de la tesis	4
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA	5
2.1 Daños observados en muros no estructurales	5
2.2 Reglamentación sobre muros no estructurales	8
2.3 Principales detalles de muros no estructurales	10
2.4 Resistencia a cortante de muros de CCA	14
2.5 Conclusiones de la revisión de la literatura	15
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	17
3.1 Selección de las variables de estudio	17
3.2 Obtención de las propiedades del CCA	19
3.3 Obtención de las propiedades de la espuma de poliuretano.....	25
3.4 Análisis de sensibilidad	32
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	35
4.1 Propiedades del CCA.....	35
4.2 Propiedades de la espuma de poliuretano	42
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49
5.1 Propiedades del CCA.....	49
5.2 Propiedades de la espuma de poliuretano	59
5.3 Análisis de sensibilidad	68

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	77
CAPÍTULO 7: REFERENCIAS	80
APÉNDICE A DISEÑO DEL EXPERIMENTO ESPECÍMENES CON JUNTA DE MORTERO DE PARED DELGADA.....	84
APÉNDICE B DISEÑO DEL EXPERIMENTO ESPECÍMENES CON ESPUMA DE POLIURETANO87	
APÉNDICE C FALLAS DE CUBOS DE CCA (<i>fCCA</i>)	92
APÉNDICE D FALLAS DE BLOQUES (<i>ftCCA</i>).....	93
APÉNDICE E FALLAS DE BLOQUES (<i>frCCA</i>)	95
APÉNDICE F FALLAS DE PRISMAS (<i>ECCA</i>)	97
APÉNDICE G FALLAS DE BLOQUES CON JUNTA (<i>ftCCA – adh</i>).....	98
APÉNDICE H FALLAS DE BLOQUES CON JUNTA (<i>frCCA – adh</i>)	100
APÉNDICE I FALLAS DE JUNTAS (<i>fcd – adh</i>)	102
APÉNDICE J FALLAS DE JUNTAS (<i>ffr – adh</i>)	105
APÉNDICE K ERROR EN LA <i>fcd – e</i>	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Holguras entre muros no estructurales y columnas y vigas (GCM 2017)...	9
Figura 2.2 Esquema de propuesta de muros no estructurales (Tasligedik y Pampanin, 2014)	11
Figura 2.3 Detalle típico de muro no estructural de mampostería CCA.	14
Figura 3.1 Bloques B1 y B2 de CCA.	18
Figura 3.2 Espumas de poliuretano estudiadas.	18
Figura 3.3 Marcos estudiados.	19
Figura 3.4 Procedimiento especificado en la norma ASTM C1693.	20
Figura 3.5 Ensaye a compresión de cubos de CCA.....	21
Figura 3.6 Ensaye a tensión por compresión de bloques de CCA.	21
Figura 3.7 Ensaye a tensión por flexión de bloques de CCA.	22
Figura 3.8 Determinación del módulo de elasticidad de prismas de CCA.....	23
Figura 3.9 Ensaye a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada.	24
Figura 3.10 Ensaye a tensión por flexión con junta de mortero.....	24
Figura 3.11 Ensaye a compresión de cubos de mortero de pared delgada.	25
Figura 3.12 Esquema de los especímenes de espuma de poliuretano.	26
Figura 3.13 Junta de espuma de poliuretano.	26
Figura 3.14 Ensaye a compresión de la espuma de poliuretano.....	27
Figura 3.15 Marcos de concreto y bloque con dos juntas de espuma.....	27
Figura 3.16 Esquema del sistema de carga.	28
Figura 3.17 Ubicación de potenciómetros.	29
Figura 3.18 Ensaye a cortante directo de espuma con marco de concreto.....	29
Figura 3.19 Marcos de acero y bloque con dos juntas de espuma.	30
Figura 3.20 Ensaye a cortante directo de espuma con marco de acero.	30
Figura 3.21 Marcos de concreto y bloque con una junta de espuma.	31
Figura 3.22 Esquema general del sistema de carga.	32
Figura 3.23 Sistema de carga ensayos de tensión por flexión marcos de concreto..	32
Figura 3.24 Tipos de esfuerzos laterales transferidos.....	33
Figura 4.1 Curvas esfuerzo-deformación unitaria de los prismas de CCA.	38

Figura 4.2 Fallas típica de espécimen ($ft_{CCA} - adh$).....	40
Figura 4.3 Falla típica de espécimen ($fr_{CCA} - adh$).....	42
Figura 4.4 Esfuerzo compresión – desplazamiento de los especímenes.....	43
Figura 4.5 Esfuerzo cortante – desplazamiento marcos de concreto.....	46
Figura 4.6 Esfuerzo cortante – desplazamiento marcos de acero.....	46
Figura 4.7 Fallas típicas de especímenes sujetos a esfuerzos cortantes.....	47
Figura 4.8 Momento – desplazamiento vertical marco de concreto.	48
Figura 5.1 Factor de corrección vs relación del área superficial con el volumen.....	51
Figura 5.2 Contenido de humedad vs resistencia a tensión por compresión.	53
Figura 5.3 Contenido de humedad vs resistencia a tensión por flexión.	54
Figura 5.4 Dirección de crecimiento de bloques B1.	57
Figura 5.5 Esfuerzo a compresión vs desplazamiento de la espuma de poliuretano.	59
Figura 5.6 Curva promedio y ajuste lineal de la espuma de poliuretano a compresión.	60
Figura 5.7 Minimización del error global de las ecuaciones para la compresión de la espuma de poliuretano.	61
Figura 5.8 Curva promedio para las espumas de poliuretano en marcos de concreto.	63
Figura 5.9 Curvas promedio para las espumas de poliuretano en marcos de acero.	64
Figura 5.10 Ajuste en marcos de concreto.....	66
Figura 5.11 Ajuste en marcos de acero.....	66
Figura 7.1 Esquema de espécimen con junta de mortero de pared delgada.	84
Figura 7.2 Proceso de construcción de especímenes para adherencia de CCA con mortero de pared delgada.	85
Figura 7.3 Diseño del experimento para la obtención de las propiedades del CCA con junta de mortero de pared delgada.	86
Figura 7.4 Marco con dos juntas de espuma para ensaye de cortante directo.	87
Figura 7.5 Marco con una junta de espuma para ensaye a flexión.	88
Figura 7.6 Limpieza de marcos de concreto y bloques de CCA.....	88
Figura 7.7 Colocación del poliuretano en marco de concreto.	89

Figura 7.8. Diseño del experimento para la obtención de las propiedades de la espuma de poliuretano con CCA y marcos.	89
Figura 7.9 Geometría de los marcos de concreto.	90
Figura 7.10 Geometría de los marcos de acero.	90
Figura 7.11 Elaboración marco de concreto.	91
Figura 7.12 Marcos de concreto y acero.	91
Figura 7.13 Fallas de cubos de CCA sujetos a compresión.	92
Figura 7.14 Fallas de bloques B1 sujetos a tensión por compresión.	94
Figura 7.15 Fallas de bloques B1 sujetos a tensión por flexión.	96
Figura 7.16 Fallas de prismas de CCA.	97
Figura 7.17 Fallas de especímenes consistentes de dos medios bloques B1 unidos por una junta adhesivo sujetos a tensión por compresión.	99
Figura 7.18 Fallas de especímenes consistentes de dos medios bloques B1 unidos por una junta adhesivo sujetos a tensión por flexión.	101
Figura 7.19 Fallas en los especímenes ($f_{cd} - adh$).	104
Figura 7.20 Fallas de especímenes ($f_{fr} - adh$).	105
Figura 7.21 MC-E1.	106
Figura 7.22 MC-E2.	106
Figura 7.23 MA-E1.	107
Figura 7.24 MA-E2.	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 ρ_{CCA} de cubos, prismas, bloques B1 y B2 para la planta 1.	35
Tabla 4.2 H y f_{CCA} para la planta 1.....	36
Tabla 4.3 H y f_{tCCA} para los bloques.....	36
Tabla 4.4 H y f_{rCCA} para los bloques.....	37
Tabla 4.5 H y E_{CCA} para la planta 1.....	38
Tabla 4.6 H y $f_{tCCA} - adh$	39
Tabla 4.7 H y $f_{rCCA} - adh$	41
Tabla 4.8 $f_j - pd$ para M1, M2 y M3.....	42
Tabla 4.9 f_{cesp} a un desplazamiento de 12 mm.	43
Tabla 4.10 $f_{cd} - adh$ de los especímenes.	45
Tabla 4.11 $f_{fr} - adh$ de los especímenes.....	48
Tabla 5.1 Propiedades del CCA experimentales.....	49
Tabla 5.2 Comparación de las propiedades del CCA.....	50
Tabla 5.2 ρ_{CCA} para distintos tipos de especímenes para la planta 1.	50
Tabla 5.3 f_{CCA} para cubos con distintos H de la planta 1.	52
Tabla 5.8 E_{CCA} para prismas con distintos H de la planta 1.....	55
Tabla 5.9 variación de la $f_{tCCA} - adh$ con el tipo de falla.	56
Tabla 5.10 $f_{tCCA} - adh$ de los especímenes.	57
Tabla 5.11 $f_{rCCA} - adh$ de los especímenes.....	59
Tabla 5.12 Esfuerzos de compresión experimentales y analíticos.....	62
Tabla 5.13 Comparación de las $f_{cd} - adh$ para los especímenes.....	68
Tabla 5.14 Esfuerzos en la espuma en marcos de concreto (MC).....	69
Tabla 5.15 Esfuerzos en la espuma en marcos de acero (MA).....	71
Tabla 5.16 Cargas actuantes en el muro.	73
Tabla 5.17 Distorsiones asociadas a la falla por cortante de muros no estructurales de CCA-4.....	75

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Los muros no estructurales son ampliamente utilizados en la construcción de diversas edificaciones. Su principal función es proporcionar una división entre áreas o un revestimiento externo. Dichos muros no proporcionan rigidez ni resistencia a la estructura ante cargas laterales. Los muros no estructurales pueden ser de mampostería no reforzada, reforzada interiormente o confinados. Cuando se construyen de mampostería, por lo general, se emplean piezas de arcilla o concreto. En los últimos años se han empezado a construir con piezas de concreto celular de autoclave (CCA). El CCA es un material ligero compuesto de cemento Portland, cal, arena, yeso, agua y aluminio en polvo. Este último funciona como agente expansivo. El CCA se produce en diferentes clases, con resistencias a compresión axial que varían entre 20 kg/cm^2 y 60 kg/cm^2 , y densidades nominales entre 400 kg/m^3 y 700 kg/m^3 (ASTM 2011).

Los muros no estructurales de mampostería de CCA son construidos a base de bloques sólidos unidos con una capa de mortero de pared delgada con espesor máximo de 3 mm. Por lo general, no requiere refuerzo interior ni elementos confinantes. Los muros no estructurales de mampostería de CCA se encuentran desligados perimetralmente mediante espuma de poliuretano de 2 cm de espesor. Dicha espuma permite absorber las deformaciones de la estructura principal. De ser necesario los muros se anclan mecánicamente a los elementos estructurales superiores por medio de láminas conectoras.

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM) (GCM 2017) y en el Código de Requerimientos y Especificaciones para la Construcción de Estructuras de Mampostería (ACI 530) (MSJC 2011) se establece que los muros no estructurales deben ser diseñados de tal manera que la holgura entre el muro y marcos estructurales permitan las deformaciones inelásticas de la estructura durante un evento sísmico. Adicionalmente

deben ser diseñados ante cargas fuera del plano. Es importante hacer notar que en las normas anteriores no se especifican el uso de algún material de relleno para las holguras entre los marcos estructurales y los muros no estructurales.

Por otro lado, se ha observado que durante eventos sísmicos los muros considerados como no estructurales de algunas estructuras presentaron fallas asociadas al comportamiento en el plano (Martínez y Martínez 2010; Saatcioglu et al. 2013) y fuera del plano (Martínez y Martínez 2010; Saatcioglu et al. 2013; Pujol y Rodríguez 2019). El primer caso, el daño se caracterizó por la formación de grietas diagonales. Esto se debió a que los muros no estructurales no se aislaron adecuadamente de los marcos estructurales. El segundo caso se caracterizó por colapso parcial o total de los muros. Esto se debió a la flexión fuera del plano del muro o a la falla del anclaje del muro al marco. La falla de los elementos no estructurales afecta directamente la funcionalidad del edificio y genera importantes pérdidas económicas (Villaverde 1997), además de que implica un riesgo para la vida humana dentro o fuera de los edificios (Gillengerten 2001).

Cuando se emplea algún material de relleno (junta flexible) para las holguras, en general, se realiza con un material de rigidez poco significativa. Principalmente con el uso de juntas flexibles a base de polímeros. En el diseño estructural, se asume que no hay transferencia de fuerzas a los muros no estructurales. Sin embargo, se ha observado que conforme aumentan las distorsiones en los marcos estructurales, las juntas flexibles son altamente comprimidas. Dicha compresión genera interacción entre los marcos estructurales y los muros no estructurales. Lo anterior induce que exista contribución de los muros no estructurales a la rigidez y resistencia de la estructura. Adicionalmente, existe transferencia de fuerzas en el plano al muro no estructural (Tsantilis y Triantafillou 2018).

Para considerar la transferencia de cargas entre el marco estructural y el muro no estructural de mampostería de CCA a través de la junta se requiere conocer las propiedades de los componentes de los muros no estructurales de CCA. Entre ellas de las espumas de poliuretano. Para determinar las fuerzas que se transfieren a los muros no estructurales se requiere determinar la relación esfuerzo a compresión –

desplazamiento de la espuma de poliuretano, la relación esfuerzo cortante – desplazamiento entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA y la relación esfuerzo cortante – desplazamiento entre el acero, la espuma de poliuretano y el CCA. En este trabajo se evaluaron las fuerzas transferidas a los muros no estructurales de CCA por medio de la espuma de poliuretano. Se consideraron dos tipos de espuma de poliuretano y dos tipos de marcos estructurales (concreto y acero).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar las fuerzas de transferencia entre marcos y muros no estructurales de CCA a través de la espuma de poliuretano.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades del CCA.
- Determinar la relación esfuerzo a compresión – desplazamiento de la espuma de poliuretano.
- Determinar la relación esfuerzo cortante – desplazamiento entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA.
- Determinar la relación esfuerzo cortante – desplazamiento entre el acero, la espuma de poliuretano y el CCA.

1.3 Alcance de la tesis

En el presente trabajo se determinaron las propiedades del CCA y de la espuma de poliuretano empleado en la construcción de muros no estructurales de mampostería de CCA. Se analizaron las fuerzas transferidas a los muros no estructurales de CCA por medio de la espuma de poliuretano. Se consideraron dos tipos de espuma de poliuretano aplicados en dos tipos de marcos estructurales (concreto y acero).

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA

Se realizó la revisión de literatura con la finalidad de conocer (1) daños observados en muros no estructurales durante eventos sísmicos, (2) la reglamentación sobre muros no estructurales, (3) los principales tipos y detalles de muros no estructurales y (4) la resistencia a cortante de muros de mampostería de CCA.

2.1 Daños observados en muros no estructurales

Escobar (2004) estudió el comportamiento de muros divisorios dentro de una estructura a base de concreto reforzado, a escala 1:5. Las dimensiones en planta de la estructura fueron de 94 cm x 94 cm. La altura total fue de 50 cm. La estructura consistió con cuatro columnas de 6 cm x 6 cm. Las columnas fueron ligadas entre sí con vigas de 6 cm x 6 cm en la parte superior e inferior, formando cuatro marcos. Dentro de los marcos se construyeron muros divisorios con tabiques multiperforados de arcilla de 6.4 cm x 2.3 cm x 4.3 cm. La construcción de los muros se dividió en dos etapas. Se consideraron 5 distintos tipos de muros divisorios. En la etapa uno se construyeron dos tipos de muros. El muro uno y dos se construyeron con mortero hidráulico 1:3 dentro del marco de concreto reforzado. En el primer caso, las holguras entre el muro y el marco se rellenaron con mortero hidráulico 1:3. En el segundo caso, se colocaron 4 conectores en la parte superior del muro. Las holguras entre el muro y el marco se rellenaron con poliestireno expandido. En la etapa dos se construyeron tres tipos de muros. El muro tres se construyó intercalando mortero hidráulico 1:3 para una hilada y adhesivo Sika Ceram SL para la siguiente hilada. Las holguras entre el muro y el marco se rellenaron con mortero hidráulico 1:3. El muro cuatro se construyó con Sika Ceram SL. Las holguras entre el muro y el marco se rellenaron con Sika Ceram SL. El muro cinco fue un muro confinado con dos castillos externos y uno intermedio. Las dimensiones de la sección transversal de los castillos fueron de 4 cm x 2.3 cm. El acero longitudinal de los castillo se ancló a las trabes superior e inferior. Se colocó acero de refuerzo horizontal a cada cuatro hiladas. Las holguras entre el muro y el marco se rellenaron con poliestireno expandido. Los muros se ensayaron en una mesa vibradora. La estructura se orientó a 45° con respecto a la dirección de la

excitación. En el muro uno se presentó una grieta diagonal en el plano. La falla estuvo asociada al colapso fuera del plano del muro. En el muro dos y tres se presentaron grietas paralela a las juntas horizontales a la altura media del muro. La falla de los muros estuvo asociada a la flexión fuera del plano. En el muro cuatro se presentó una grieta paralela horizontal en la base del muro. La falla estuvo asociada al colapso fuera del plano. En el muro cinco se observó la falla asociada al corte en el extremo inferior de los castillos. Se realizaron modelos de elementos finitos para cada muro. El autor concluyó que la mejor alternativa para el empleo de muros no estructurales es la realizada con Sika Ceram SL.

Okazaki et al. (2007) determinaron el comportamiento de un edificio de acero estructural de tres niveles sujeto a cargas cíclicas reversibles. La estructura de acero estaba conformada por dos marcos principales de tres niveles cada uno. Las altura total fue de 850 cm y las alturas libres de cada entrepiso fueron 350 cm, 350 cm y 150 cm para los niveles 1, 2 y 3, respectivamente. Cada marco principal estaba conformado de dos claros libres de 600 cm. Los marcos principales fueron ligados entre sí a la altura de cada entrepiso con trabes de 825 cm de longitud. La estructura se recubrió en el sentido del marco principal con paneles de CCA. Los paneles fueron de 60 cm x 350 cm x 10 cm anclados a la estructura principal por medio placas metálicas. La estructura se ensayó sujeta a cargas cíclicas reversibles aplicadas en los extremos superiores en dirección de los paneles. En los paneles se presentaron grietas y desprendimiento del CCA en la parte inferior de los paneles debido a la tensión del anclaje. Los autores concluyeron que los paneles no contribuyen a la resistencia y rigidez del edificio.

Martínez y Martínez (2010) evaluaron el daño en edificios de Mexicali B. C. debido al sismo del 4 de abril de 2010. Los edificios evaluados fueron escuelas, edificios públicos, industrias, comercios y viviendas. Evaluaron el daño generado en elementos estructurales y no estructurales. Los principales elementos estructurales que presentaron daño fueron columnas de concreto reforzado. Los principales elementos no estructurales que presentaron daño fueron muros de MNR. Las principales fallas fueron en el plano y fuera del plano. En el primer caso se observaron grietas

diagonales. Esto se debió a que los muros no estructurales no fueron aislados adecuadamente de los marcos. En el segundo caso se observó el colapso fuera del plano de los muros no estructurales. Esto se debió a que los muros no se anclaron adecuadamente a los marcos.

Saatcioglu et al. (2013) evaluaron el comportamiento de estructuras de acero y sus elementos no estructurantes durante el sismo Maule en Chile el 27 de febrero de 2010. Los elementos no estructurales incluidos fueron falsos plafones, muros divisorios, detalles arquitectónicos e instalaciones. Las estructuras de acero se comportaron de manera adecuada. En los muros de mampostería se presentaron fallas en el plano y fuera del plano. En el primer caso se observaron grietas diagonales. Esto se debió a que las holguras consideradas fueron menores a los desplazamientos laterales presentados durante el sismo. En el segundo caso se observó el colapso parcial o total de los muros no estructurales. Los autores concluyeron que el mayor daño se presentó en construcciones con elementos estructurales de poca rigidez y pobre control de distorsiones. La falla fuera del plano en muros de mampostería se observó incluso en estructuras con un buen comportamiento estructural. El sismo de Maule demostró la vulnerabilidad de los elementos de mampostería no reforzada y la importancia del control de distorsiones.

Pujol y Rodríguez (2019) evaluaron el desempeño de muros divisorios y fachadas durante el terremoto del 19 de septiembre de 2017 en la ciudad de México. Los edificios estudiados fueron estructuras a base de marcos de concreto reforzado con muros divisorios de tabiques o bloques de concreto instalados después de la construcción de los marcos. En los muros se presentaron fallas en el plano. Las fallas se debieron a que los desplazamientos laterales generados en la estructura no fueron considerados para el diseño de muros divisorios. Los autores recomendaron que las distorsiones máximas de entrepiso de un edificio con muros divisorios no excedan 0.8%. Valores mayores podrían ocasionar en muros divisorios severos daños cuya reparación podría ser excesivamente costosa.

2.2 Reglamentación sobre muros no estructurales

En las NTCM se definen a los muros no estructurales como: “Los que se construyen entre las vigas y columnas de un marco estructural y que no proporcionan rigidez y resistencia ante cargas laterales ya que se construyen, intencionalmente, separados del marco, así como muros divisorios, pretilas, bardas etc., de los cuales no depende la seguridad de la estructura. Pueden ser de mampostería confinada, reforzada interiormente, o de otros materiales ligeros y cuya contribución a la resistencia y rigidez laterales sea poco significativa” (GCM 2017).

En las NTCM se especifican para muros no estructurales lo siguiente:

- a) El muro no estructural no estará en contacto con la estructura cuando se alcancen las máximas distorsiones de entrepiso.
- b) El espesor de la mampostería no será menor que 10 cm.
- c) Se diseñará ante cargas laterales en el sentido perpendicular a su plano.

Los muros no estructurales se deberán diseñar de modo que la holgura lateral, δh , entre un muro no estructural y un elemento estructural, columna o muro, no sea menor que el desplazamiento lateral inelástico del entrepiso más 1 cm. La holgura vertical no será menor que la deflexión a largo plazo calculada al centro del claro de la trabe más 0.5 cm. En la Figura 2.1 se presenta un esquema general de muros no estructurales. Los muros no estructurales son aislados de los marcos y para evitar la inestabilidad se recomienda el uso de soportes laterales fijadas en el sistema de piso.

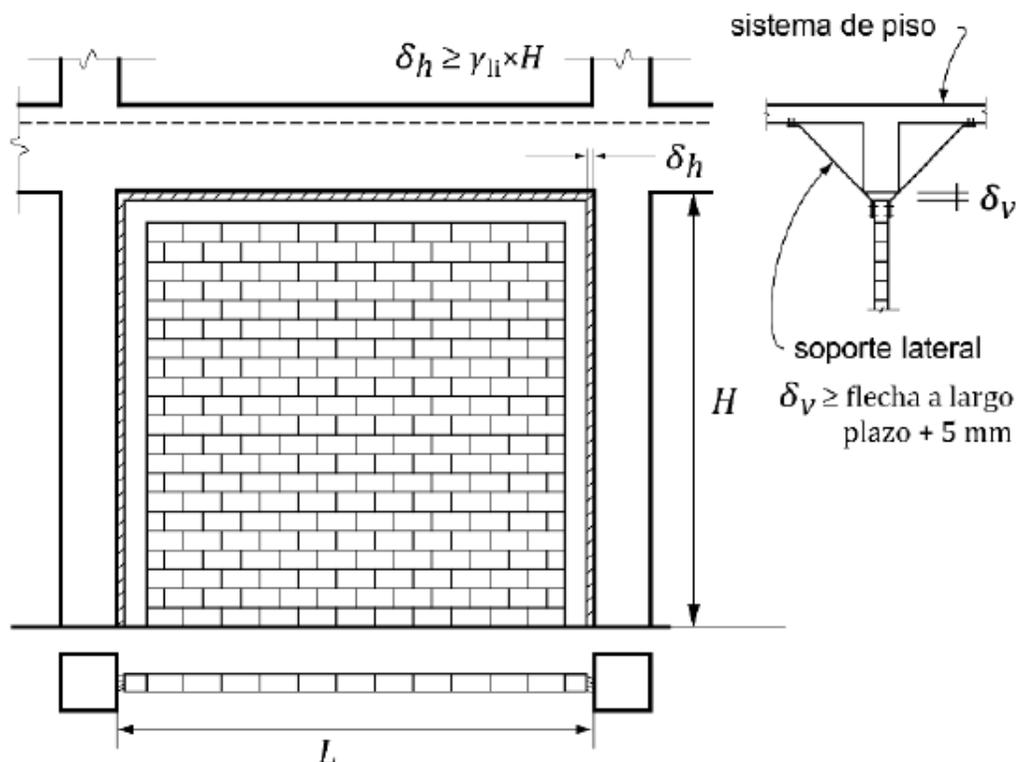


Figura 2.1 Holguras entre muros no estructurales y columnas y vigas (GCM 2017).

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCS) (GCM 2017) se establece que las distorsiones de entrepiso deben ser revisadas para dos condiciones de diseño. El primero para el cumplimiento del estado límite de seguridad contra colapso, donde las distorsiones límite (γ_{max}) dependen del sistema estructural empleado que contribuye a la resistencia sísmica. El segundo para el cumplimiento de limitación de daños ante sismos frecuentes, la distorsión (γ) no excederá 0.20 %, salvo que todos los elementos no estructurales sean capaces de soportar deformaciones apreciables o estén separados de la estructura principal de manera que no sufran daños por sus deformaciones. En tal caso, el límite en cuestión será 0.40 %.

En el Código de Requerimientos y Especificaciones para la Construcción de Estructuras de Mampostería (ACI 530) se especifica que los muros no estructurales se deberán diseñar para evitar la transferencia de cargas en el plano a los marcos por medio de juntas alrededor del muro. Las juntas deben de permitir las deformaciones inelásticas de la estructura en eventos sísmicos y deben estar libre de mortero,

escombros y otros materiales rígidos (MSJC 2011). De igual manera, los muros no estructurales se deberán diseñar ante cargas fuera del plano. Los muros no estructurales se podrán idealizar en una o dos direcciones. Además, es necesario garantizar una conexión mecánica con los marcos. Los conectores se colocarán solo en la dirección de diseño y no deberán transferir fuerzas en el plano.

2.3 Principales detalles de muros no estructurales

Tasligedik y Pampanin (2014) desarrollaron una solución para reducir el nivel de daño en muros dentro de marcos estructurales. La solución consistió en dividir el panel de muro en secciones individuales utilizando un sistema metálico. El sistema metálico consiste en perfiles ligeros que permitan a los muros individuales comportarse como un elemento en voladizo. Las holguras deben rellenarse con un sellador constructivo que integre los paneles en voladizo individual en un panel de relleno deformable (Figura 2.2). Ensayaron un muro de relleno en un marco estructural de concreto reforzado sujeto a cargas cíclicas reversibles. El marco de concreto reforzado fue de 380 cm x 300 cm (longitud x altura). El panel del muro se dividió en tres partes por medio de perfiles tipo canal y espuma de poliuretano. Las holguras entre cada panel individual y con el marco estructural fueron rellenas con espuma de poliuretano de 1 cm de espesor. Observaron una primera grieta horizontal en el mortero en la esquina superior derecha a una distorsión de 0.75 %. El comportamiento del sistema fue similar al comportamiento del marco estructural sin relleno hasta una distorsión de 1.5%. A dicha distorsión se observaron grietas horizontales en el mortero en las esquinas inferiores. Después de dicha distorsión el muro de relleno comenzó a interactuar con el marco estructural. Se observaron grietas significativas a una distorsión de 2.5%. Los autores concluyen que la solución desarrollada es efectiva hasta un límite de distorsión de 1.5%.

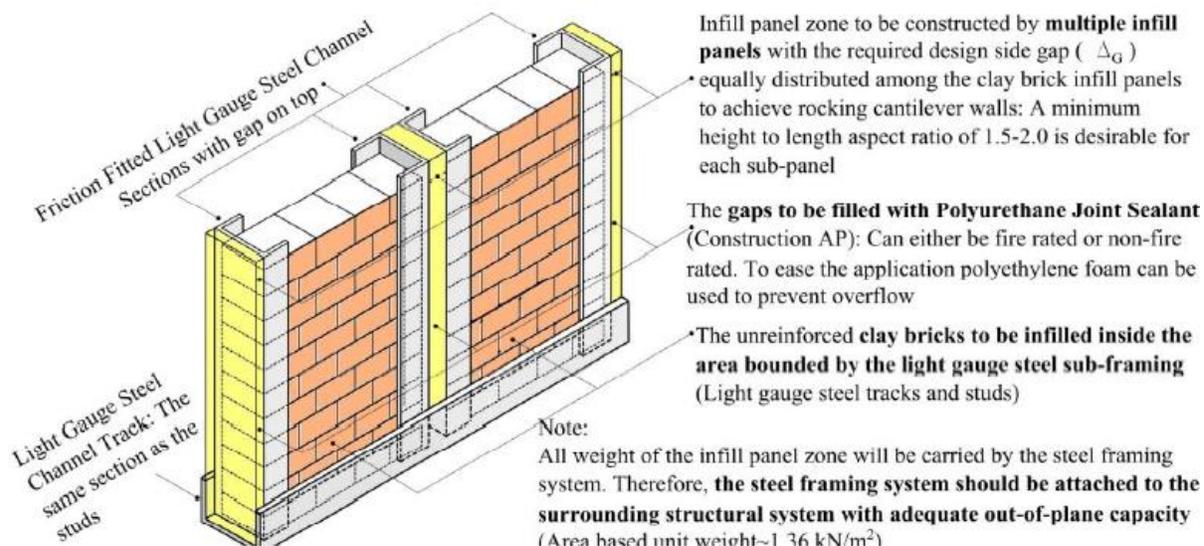


Figura 2.2 Esquema de propuesta de muros no estructurales (Tasligedik y Pampanin, 2014)

Preti et al. (2016) proporcionan recomendaciones para el diseño de marcos estructurales con muros de mampostería dentro de ellos. Consideran la colocación de juntas deslizantes de madera en las holguras entre el marco y la mampostería para reducir la interacción. De esta forma garantiza la estabilidad fuera del plano y minimiza el daño debido a cargas en el plano. Ensayaron tres muros de relleno de 293 cm x 246 cm (longitud x altura) dentro de un marco de acero sujetos a cargas cíclicas reversibles. La variable de estudio fue la configuración de las juntas deslizantes. Los muros se construyeron de mampostería de bloques huecos de arcilla unidas con mortero hidráulico. En el primer muro se colocaron cinco juntas horizontales y dos juntas verticales. En el segundo muro se colocó la configuración de juntas del primer muro y se le adicionó una abertura con dos elementos verticales de madera. En el tercer muro se colocaron cinco juntas verticales y dos juntas horizontales. Se observó una menor resistencia y rigidez comparada con un marco estructural con un muro en contacto directo. Las juntas aseguran una respuesta dúctil al marco estructural. Se alcanzaron distorsiones de 2.5% sin daños importantes. Los autores concluyen con una formulación analítica para evaluar el cortante máximo en las columnas del marco generado por la interacción.

Kwiecién et al. (2017) proponen emplear juntas de poliuretano flexible (polímero PM) entre el marco de concreto reforzado y muros de mampostería. Determinaron la resistencia a tensión, resistencia a compresión y resistencia a cortante de las juntas de polímero PM. Con los resultados obtenidos realizaron un modelo de elementos finitos. Donde analizaron el comportamiento de un marco de concreto reforzado con un muro de mampostería por dentro sujeto a cargas en el plano y fuera del plano. Se empleó una junta de polímero PM de 2 cm de espesor. Al aplicar cargas en el plano observaron una clara compresión y tensión del polímero PM. Al aplicar cargas fuera del plano observaron que la junta de polímero PM se comporta como una articulación flexible. Los autores concluyen que el polímero PM tiene una alta capacidad de deformación. Sin embargo, es capaz de transferir cargas significativas durante excitaciones en el plano y fuera del plano. El polímero PM funciona como una articulación que podría funcionar bien en caso de cargas dinámicas, como los sismos.

Tsantilis y Triantafillou (2018) proponen una alternativa de aislamiento para muros de mampostería dentro de marcos estructurales. La cual consiste en colocar una junta de polietileno entre el muro y el marco. Ensayaron un total de ocho especímenes a escala 1:3 sujetos a cargas cíclicas reversibles. Los especímenes consistieron en un marco estructural de concreto o acero con un muro de relleno de mampostería de arcilla hueca. Las variables de estudio fueron el tipo de marco estructural, la configuración de las juntas de polietileno y la altura de los muros de relleno. Observaron que las juntas propuestas eliminan la interacción del marco con el muro de relleno y evitan daños para distorsiones pequeñas, es decir, para sismos moderados. Sin embargo, a medida que las distorsiones aumentan cerca de las distorsiones límite de colapso la junta de polietileno se comprime completamente. Esto genera que aumente la resistencia y rigidez de marco. Presentan un modelo analítico para determinar el comportamiento en el plano de marcos con muros de mampostería aislados con junta de polietileno. Los autores concluyen es necesario realizar mayor investigación para comprender las interacciones entre marcos y muros cuando se utilizan materiales celulares como juntas de aislamiento.

Marinkovic y Butenweng (2018) proponen un sistema para desacoplar los marcos y los muros de mampostería. Empleando una junta de caucho alrededor del muro. El

sistema propuesto es denominado INODIS. Ensayaron el sistema INODIS sujetos a cargas en el plano y fuera del plano. Primero de manera aislada y posteriormente con las cargas simultáneamente. Se emplearon marcos de concreto reforzado y muros de mampostería de bloques de arcilla. Se observó un comportamiento similar a la de un marco de concreto reforzado especialmente dentro de las distorsiones recomendadas en el Eurocódigo 8. Sin embargo, se obtuvo una resistencia lateral mayor. Esto se debió a que el muro, a pesar del aislamiento, contribuye en la resistencia y rigidez lateral. Las primeras grietas se presentaron con una distorsión de 1.8%. Se alcanzó una distorsión máxima de 3.25%. Los autores concluyen que en comparación con muros tradicionales el sistema propuesto presenta una resistencia sísmica adecuada, reducción de los esfuerzos en los muros de relleno, previene una interacción desfavorable entre marcos y muros, el muro se puede considerar como un componente no estructural. Además, reduce las acciones sísmicas mediante la disipación de energía.

Akyildiz et al. (2019) propusieron usar juntas flexibles de poliuretano entre marcos estructurales y muros de relleno. Efectuaron análisis numéricos no lineales en tres tipos de marcos con muros de relleno sujetos a cargas en el plano y fuera del plano. Se consideraron modelos con juntas rígidas, juntas flexibles en tres bordes y juntas flexibles en cuatro bordes. Las juntas flexibles de poliuretano fueron de 1 cm, 2 cm y 3 cm de espesor. Observaron que la implementación de juntas flexibles propicia una mayor ductilidad. Cuando la junta flexible fue de 2 cm de espesor se obtuvo una reducción significativa de esfuerzos alrededor del muro. Los esfuerzos se reducen de 3 y 5 veces, para cargas fuera del plano y cargas en el plano, respectivamente. Los autores concluyen que la implementación de juntas flexibles puede disminuir o prevenir el daño causado en muros de mampostería dentro de marcos de concreto reforzado. Indicaron que se requieren estudios numéricos más detallados y pruebas de laboratorio.

Los muros no estructurales de mampostería de CCA son construidos a base de bloques sólidos unidos con una capa de mortero de pared delgada con espesor máximo de 0.3 cm. Por lo general, no requiere refuerzo interior ni elementos

$$V_{nCCA} = 0.95 l t \sqrt{f_{CCA}} \sqrt{1 + \frac{P}{2.4 \sqrt{f_{CCA}} l t}} \quad 2.1$$

Por otro lado, Fernández (2019) propuso la ecuación 2.2 para determinar la resistencia a cortante de muros confinados de CCA. En esta ecuación se considera el efecto de la relación de aspecto. Donde h es la altura del muro en cm, l es la longitud del muro en cm, t es el espesor del muro en cm, f_{CCA} es la resistencia a compresión del CCA en kg/cm^2 , f_{tCCA} es la resistencia a compresión del CCA en kg/cm^2 y P es la carga axial en kg.

$$V_{nCCA} = \left(0.78 - 0.09 \left(\frac{h}{l} \right) - 1.36 \left(\frac{P}{f_{CCA} l t} \right) \right) f_{tCCA} l t \sqrt{1 + \frac{P}{f_{tCCA} l t}} \quad 2.2$$

2.5 Conclusiones de la revisión de la literatura

Con base en la revisión de la literatura se concluye que durante eventos sísmicos los muros no estructurales de algunas estructuras presentaron fallas asociadas al comportamiento en el plano y fuera del plano. El primer caso se caracterizó por la formación de grietas diagonales. Esto se debió a que los muros no estructurales no fueron aislados adecuadamente de los marcos estructurales. El segundo caso se caracterizó por colapso parcial o total de muro. Esto se debió a la flexión fuera del plano del muro o falla del anclaje del muro al marco.

Los muros no estructurales son aquellos que no aportan resistencia y rigidez lateral a los marcos estructurales. Para garantizar su nula contribución deben aislarse de los marcos estructurales. Los muros no estructurales pueden ser construidos de mampostería no reforzada, confinada, reforzada interiormente, o de otros materiales ligeros y cuya contribución a la resistencia y rigidez laterales sea poco significativa. En las NTCM y el ACI 530 se establece que los muros no estructurales deben ser diseñados de tal manera que la holgura entre el muro y marcos estructurales permita las deformaciones inelásticas de la estructura durante un evento sísmico. Adicionalmente deben ser diseñados ante cargas fuera del plano. Las cargas fuera del plano pueden ser generadas por sismo o viento.

Se encontraron varios estudios donde se proponen soluciones para los muros que son construidos dentro de un marco estructural. Las cuales consisten en el uso de juntas deslizantes o la aplicación de juntas flexibles a base de polímero. Esto con la finalidad de garantizar que los muros no aporten resistencia y rigidez lateral. Así mismo, minimizar los daños durante eventos sísmicos y evitar la inestabilidad fuera del plano. Las propuestas presentadas garantizan un comportamiento similar a los marcos sin muros especialmente a distorsiones pequeñas, es decir, para sismos moderados. A distorsiones mayores las juntas son altamente comprimidas que generan interacción entre los marcos estructural y los muros. Generando transferencias de cargas significativas, aumentando la rigidez y resistencia lateral. En comparación a marcos con muros en contacto directo se obtiene un sistema estructural más dúctil, recomendable en zonas sísmicas.

Los muros no estructurales de mampostería de CCA están compuestos, en su mayoría, de bloques unidos con mortero, sin refuerzos interiores o confinamientos. Se encuentran desligados de trabes y columnas. La holgura entre el muro no estructural y el marco estructural es rellena con espuma de poliuretano. De ser necesario, los muros son anclados mecánicamente por medio de laminillas conectoras. En los códigos de diseño vigentes no se encuentran recomendaciones para el uso de la espuma de poliuretano por lo que es necesario realizar estudios al respecto.

Por otro lado, se encontró que la resistencia a cortante de muros de mampostería está asociada con la formación de una grieta diagonal. Se encontraron dos ecuaciones para determinar dicha resistencia. La primera empleada para muros de mampostería no reforzada. La segunda empleada para muros de mampostería confinada.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En este capítulo se describen las actividades realizadas en la metodología: (1) selección de las variables de estudio, (2) obtención de las propiedades del CCA (3) obtención de las propiedades de la espuma de poliuretano y (4) análisis de sensibilidad.

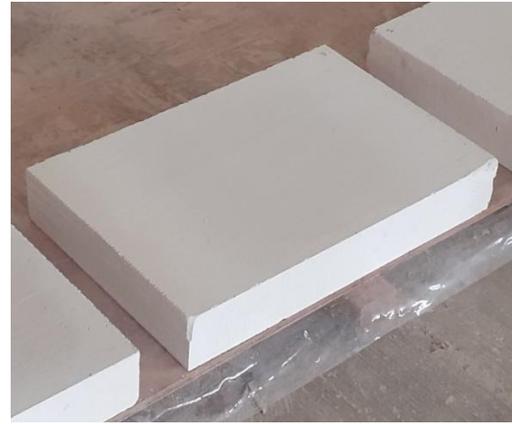
3.1 Selección de las variables de estudio

Los muros no estructurales de CCA se construyen con piezas solidas de 10 cm x 40 cm x 60 cm dentro de marcos estructurales de concreto reforzado o acero. Las piezas se unen con mortero de pared delgada con espesores de junta entre 0.1 cm y 0.3 cm. La holgura entre el marco estructural y el muro no estructural es rellena con espuma de poliuretano. Para evaluar dichas variables se consideraron:

- Piezas de CCA clase 4 de dos plantas productoras (Figura 3.1)
- Tres marcas de mortero de pared delgada; los proporcionados por cada planta productora (M1 y M2) y uno adicional de uso común en la construcción (M3).
- Dos marcas de espuma de poliuretano (Figura 3.2). El espesor de la junta fue de 2 cm.
- Marcos de concreto reforzado y marcos de acero estructural (Figura 3.3).



a) Bloque B1 de CCA (15 cm x 20 cm x 60 cm).



b) Bloque B2 de CCA (10 cm x 40 cm x 60 cm).

Figura 3.1 Bloques B1 y B2 de CCA.



a) E1.



b) E2.

Figura 3.2 Espumas de poliuretano estudiadas.



a) Marcos de concreto.



b) Marcos de acero.

Figura 3.3 Marcos estudiados.

3.2 Obtención de las propiedades del CCA

Para el CCA se determinó: la densidad aparente (ρ_{CCA}), el contenido de humedad (H), la resistencia a compresión (f_{CCA}), la resistencia a tensión por compresión (f_{tCCA}), la resistencia a tensión por flexión (f_{rCCA}), el módulo de elasticidad (E_{CCA}), la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada ($f_{tCCA-adh}$), la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada ($f_{rCCA-adh}$) y la resistencia a compresión del mortero de pared delgada (f_{j-pd}).

La densidad aparente (ρ_{CCA}) y el contenido de humedad (H) se determinaron con base en la norma ASTM C1693 (Figura 3.4). Para la planta 1, se emplearon tres cubos de 10 cm, tres prismas de 10 cm x 10 cm x 20 cm, tres bloques de 15 cm x 20 cm x 60 cm (B1) y tres bloques de 10 cm x 40 cm x 60 cm (B2).



a) Peso de cubo.



b) Peso de prisma.



c) Peso de bloque.



d) Cubos para secada.



e) Prismas y bloques para secado.

Figura 3.4 Procedimiento especificado en la norma ASTM C1693.

La resistencia a compresión del CCA (f_{CCA}) se determinó con base en la norma ASTM C1693. Se ensayaron cubos de 10 cm. Para la planta 1 se ensayaron doce cubos. Seis cubos se ensayaron con 6% de contenido de humedad, tres cubos con 10% de contenido de humedad y tres cubos con 14% de contenido de humedad. El ensaye de los cubos se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. Las cargas se validaron mediante una celda de carga conectada a un sistema de adquisición de datos independiente. La capacidad de la celda fue de 22.70 ton. En la Figura 3.5 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los cubos.

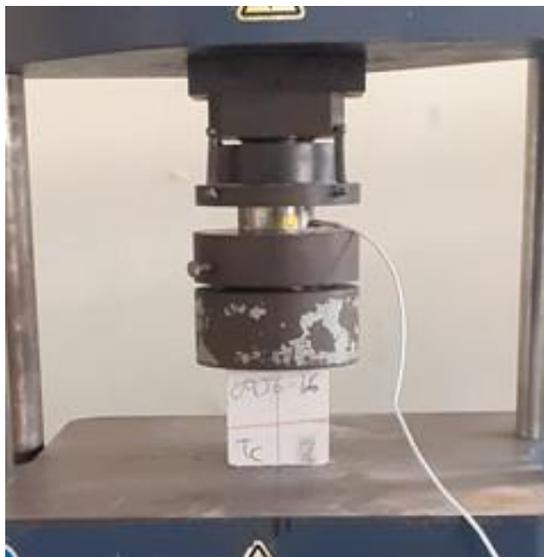


Figura 3.5 Ensaye a compresión de cubos de CCA.

La resistencia a tensión por compresión del CCA (f_{tCCA}) se determinó con base en la norma ASTM C1006. Se ensayaron bloques de 15 cm x 20 cm x 60 cm (B1). Para la planta 1 se ensayaron doce bloques y para la planta 2 se ensayaron seis bloques. El ensaye de los bloques se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. En Figura 3.6 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los bloques.



Figura 3.6 Ensaye a tensión por compresión de bloques de CCA.

La resistencia a tensión por flexión del CCA (f_{rCCA}) se determinó con base en la norma ASTM C78. Dicha norma es usada para concreto hidráulico, pero debido a la carencia de normatividad para CCA se utilizó de manera supletoria. Se ensayaron bloques de 15 cm x 20 cm x 60 cm (B1). Para la planta 1 se ensayaron doce bloques y para la planta 2 se ensayaron seis bloques. El ensaye de los bloques se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. En la Figura 3.7 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los bloques.



Figura 3.7 Ensaye a tensión por flexión de bloques de CCA.

El módulo de elasticidad (E_{CCA}) se determinó con base en la norma ASTM C1693. Se ensayaron prismas de 10 cm x 10 cm x 20 cm. Para la planta 1 se ensayaron doce prismas. Seis prismas se ensayaron con 6% de contenido de humedad, tres prismas con 10% de contenido de humedad y tres prismas con 14% de contenido de humedad. El ensaye de los prismas se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. Las cargas se validaron mediante una celda de carga con una capacidad de 22.70 ton. Los desplazamientos verticales de los prismas se midieron con cuatro potenciómetros lineales de 1.2 cm de capacidad. La celda y los potenciómetros se conectaron a un sistema de adquisición de datos independiente. En la Figura 3.8 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los prismas.



Figura 3.8 Determinación del módulo de elasticidad de prismas de CCA.

La resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada ($f_{tCCA-adh}$) se determinó con base en la norma ASTM C1006. Dicha norma es usada para piezas sin junta de mortero, pero debido a la carencia de normatividad para CCA con junta de mortero de pared delgada se utilizó de manera supletoria. Se ensayaron 18 especímenes consistentes en dos medios bloques de 15 cm x 20 cm x 60 cm (B1) unidos con mortero de pared delgada por las caras externas. La construcción de los especímenes y el diseño del experimento se presentan en el APÉNDICE A. El ensaye de los especímenes se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. En la Figura 3.9 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los bloques.



Figura 3.9 Ensayo a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada.

La resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada ($f_{rCCA-adh}$) se determinó con base en la norma ASTM C78. Dicha norma es usada para concreto hidráulico, pero debido a la carencia de normatividad para CCA con junta de mortero de pared delgada se utilizó de manera supletoria. Se ensayaron 18 especímenes consistentes en dos medios bloques de 15 cm x 20 cm x 60 cm (B1) unidos con mortero de pared delgada por las caras externas. La construcción de los especímenes y el diseño del experimento se presentan en el APÉNDICE A. El ensaye de los especímenes se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. En la Figura 3.10 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los bloques.



Figura 3.10 Ensayo a tensión por flexión con junta de mortero.

La resistencia a compresión del mortero de pared delgada (f_{j-pd}) se determinó con base en la norma NMX-C-061-ONNCCE-2001. Dicha norma es usada para morteros hidráulicos, pero debido a la carencia de normatividad para mortero de pared delgada se utilizó de manera supletoria. Se ensayaron cuatro cubos de 5 cm por lado para cada tipo de mortero de pared delgada (M1, M2 y M3). El mezclado se realizó siguiendo las instrucciones establecidas en las respectivas fichas técnicas. El ensaye de los cubos se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. En la Figura 3.11 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los cubos.



Figura 3.11 Ensaye a compresión de cubos de mortero de pared delgada.

3.3 Obtención de las propiedades de la espuma de poliuretano

Se determinaron la relación esfuerzo a compresión (f_{c-e}) – desplazamiento (Δ) de la espuma de poliuretano, la relación esfuerzo cortante (f_{cd-e}) – desplazamiento (Δ) entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA, la relación esfuerzo cortante (f_{cd-e}) – desplazamiento (Δ) entre el acero, la espuma de poliuretano y el CCA y la relación momento (f_{t-e}) – desplazamiento (Δ) entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA.

La relación esfuerzo a compresión (f_{c-e}) – desplazamiento (Δ) de la espuma de poliuretano se determinó con especímenes de 10 cm x 10 cm x 2 cm (Figura 3.12). Se ensayaron seis especímenes para cada tipo de espuma de poliuretano. Los especímenes se construyeron rellenando las juntas que se generan entre un marco de concreto y un bloque B2 (Figura 3.13). La junta de espuma de poliuretano se realizó siguiendo las instrucciones establecidas en las fichas técnicas.

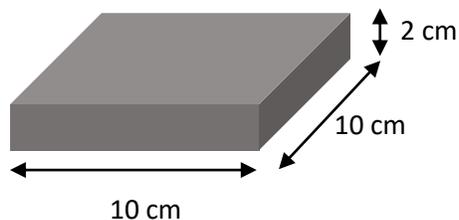


Figura 3.12 Esquema de los especímenes de espuma de poliuretano.



Figura 3.13 Junta de espuma de poliuretano.

El ensaye de los especímenes se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. Las cargas se validaron mediante una celda de carga con una capacidad de 4.53 ton. Los desplazamientos verticales de los especímenes se midieron con dos potenciómetros lineales de 2.5 cm de capacidad. La celda y los potenciómetros se conectaron a un sistema de adquisición de datos independiente. En la Figura 3.14 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los especímenes.



Figura 3.14 Ensaye a compresión de la espuma de poliuretano.

La relación esfuerzo cortante (f_{cd-e}) – desplazamiento (Δ) entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA se determinó con especímenes consistentes en un bloque B2 dentro de un marco de concreto reforzada con dos juntas de espuma de poliuretano de 45 cm x 10 cm x 2 cm (longitud, altura, espesor). Se ensayaron cuatro especímenes para cada tipo de espuma de poliuretano (Figura 3.15). El proceso constructivo de los especímenes se presenta en el APÉNDICE B.



Figura 3.15 Marcos de concreto y bloque con dos juntas de espuma.

El ensaye de los especímenes se realizó utilizando un marco de carga y un actuador hidráulico con una capacidad de 32.5 ton. Las cargas se midieron con una celda de carga con capacidad de 4.5 ton. Los desplazamientos relativos entre el bloque y el marco se midieron utilizando cuatro potenciómetros lineales con capacidad de 1.2 cm. En la Figura 3.16 y en la Figura 3.17 se presenta el sistema de carga y la ubicación de cada potenciómetro, respectivamente. La celda de carga y los potenciómetros lineales se conectaron a un sistema de adquisición de datos. En la Figura 3.18 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los especímenes.

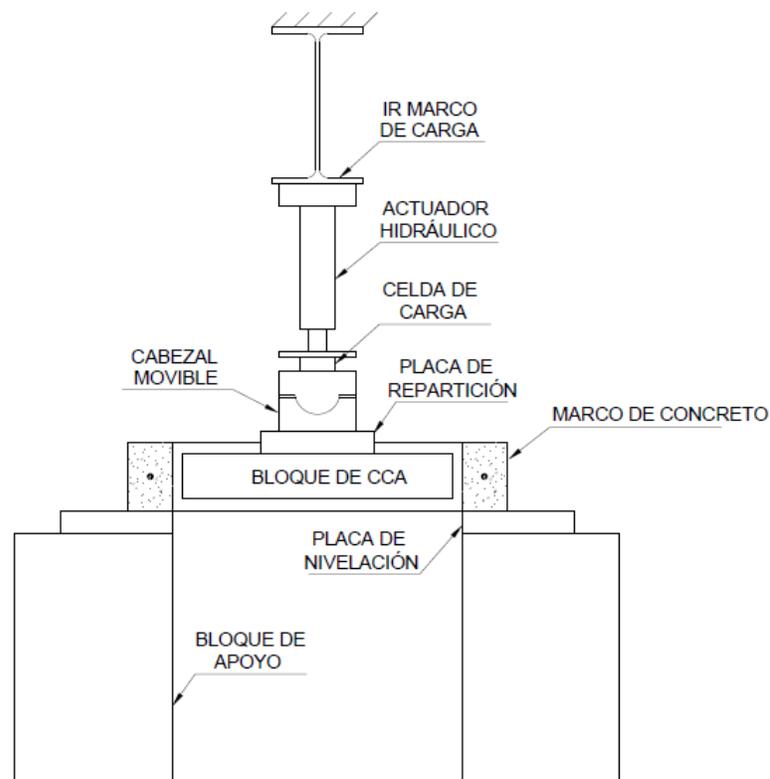


Figura 3.16 Esquema del sistema de carga.

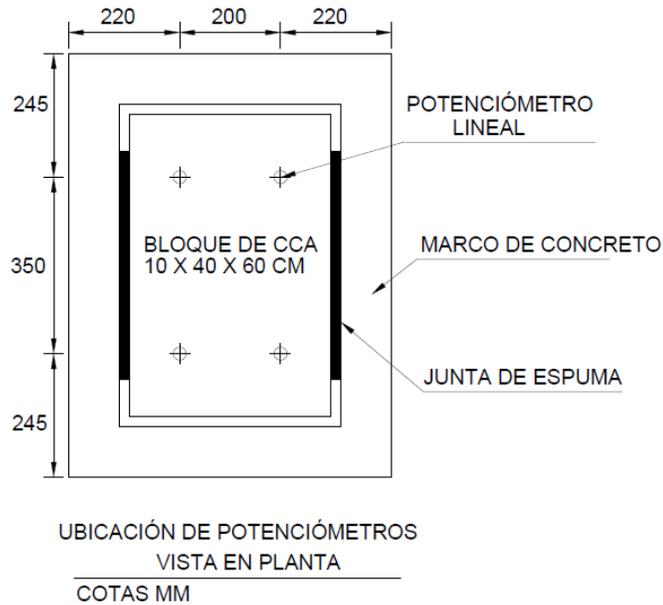


Figura 3.17 Ubicación de potenciómetros.

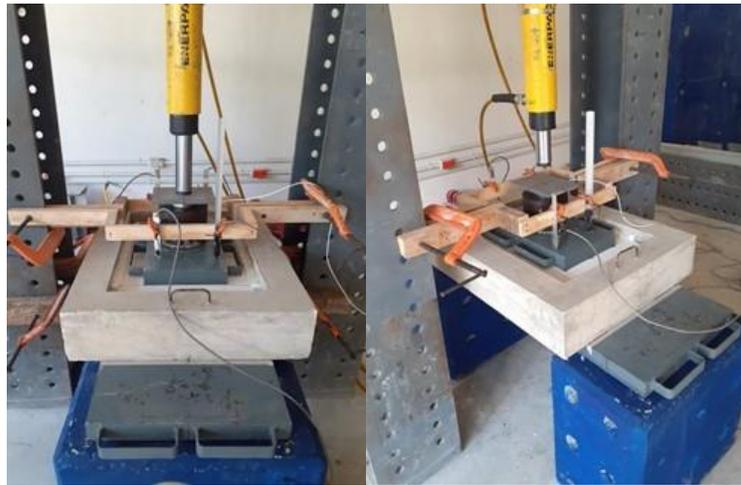


Figura 3.18 Ensayo a cortante directo de espuma con marco de concreto.

La relación esfuerzo cortante (f_{cd-e}) – desplazamiento (Δ) entre el acero, la espuma de poliuretano y el CCA se determinó con especímenes consistentes en un bloque B2 dentro de un marco de acero estructural con dos juntas de espuma de poliuretano de 45 cm x 10 cm x 2 cm (longitud, altura, espesor). Se ensayaron cuatro especímenes para cada tipo de espuma de poliuretano (Figura 3.19). El proceso constructivo de los especímenes se presenta en el APÉNDICE B.



Figura 3.19 Marcos de acero y bloque con dos juntas de espuma.

El ensaye de los especímenes se realizó de manera similar al empleado en la relación esfuerzo cortante (f_{cd-e}) – desplazamiento (Δ) entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA. Se sustituyó la placa de repartición y el cabezal móvil por una polín de 4" para un mejor control en los desplazamientos iniciales (Figura 3.20).

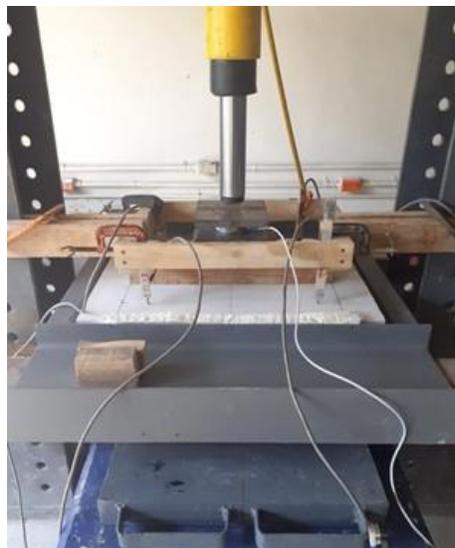


Figura 3.20 Ensaye a cortante directo de espuma con marco de acero.

La relación momento (f_{t-e}) – desplazamiento (Δ) entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA se determinó con especímenes consistentes en un bloque B2 dentro de un marco de concreto reforzados con una junta de espuma de poliuretano

de 45 cm x 10 cm x 2 cm (longitud, altura, espesor). Se ensayaron cuatro especímenes para la espuma de poliuretano 1 (Figura 3.21). El proceso constructivo de los especímenes se presenta en el APÉNDICE B.



Figura 3.21 Marcos de concreto y bloque con una junta de espuma.

Debido a la baja capacidad a tensión de la espuma. El ensaye de los especímenes se realizó con tres cilindros de plástico, los cuales se llenaron manualmente con agua. La dimensiones de los cilindros fueron 15 cm x 30 cm (diámetro x altura). La distancia del centroide de la base del cilindro al borde del marco fue de 29.5cm. En la Figura 3.23 se presenta el esquema empleado en el ensaye. El llenado de los cilindros se realizó con una probeta graduada con un litro de capacidad. Los incrementos fueron de un litro, se asume que un litro de agua es equivalente a un kilogramo. Los desplazamientos relativos entre el bloque y el marco se midieron a 5 cm del borde libre utilizando un flexómetro. Las medidas de los desplazamientos se realizaron después de la aplicación de cada litro de agua. En la Figura 3.23 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de los especímenes.

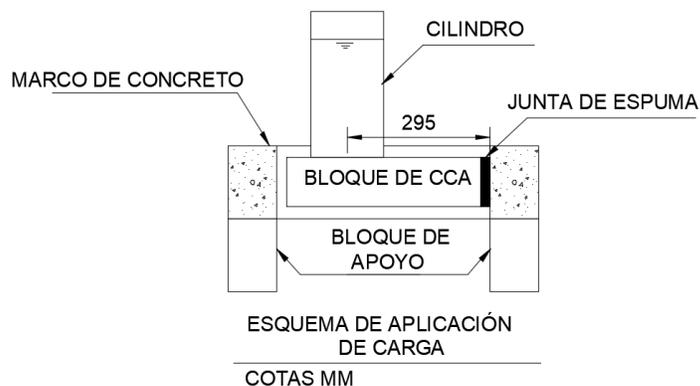


Figura 3.22 Esquema general del sistema de carga.



Figura 3.23 Sistema de carga ensayos de tensión por flexión marcos de concreto.

3.4 Análisis de sensibilidad

Con los resultados obtenidos de la relación esfuerzo a compresión (f_{c-e}) – desplazamiento (Δ) de la espuma de poliuretano, la relación esfuerzo cortante (f_{cd-e}) – desplazamiento (Δ) entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA y la relación esfuerzo (f_{cd-e}) – desplazamiento (Δ) entre el acero, la espuma de poliuretano y el CCA se realizó un análisis de los esfuerzos transferidos en el plano a muros no estructurales de CCA y posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad de las fuerzas de transferencia para diferentes muros no estructurales.

Primero se definieron los esfuerzos que se generan en el muro debido al desplazamiento del marco estructural. En la Figura 3.24 se presenta un esquema de

los tipos de esfuerzos transferidos al muro no estructural. Considerando que el marco estructural se desplaza lateralmente (Δ) se identifican tres tipos de esfuerzos.

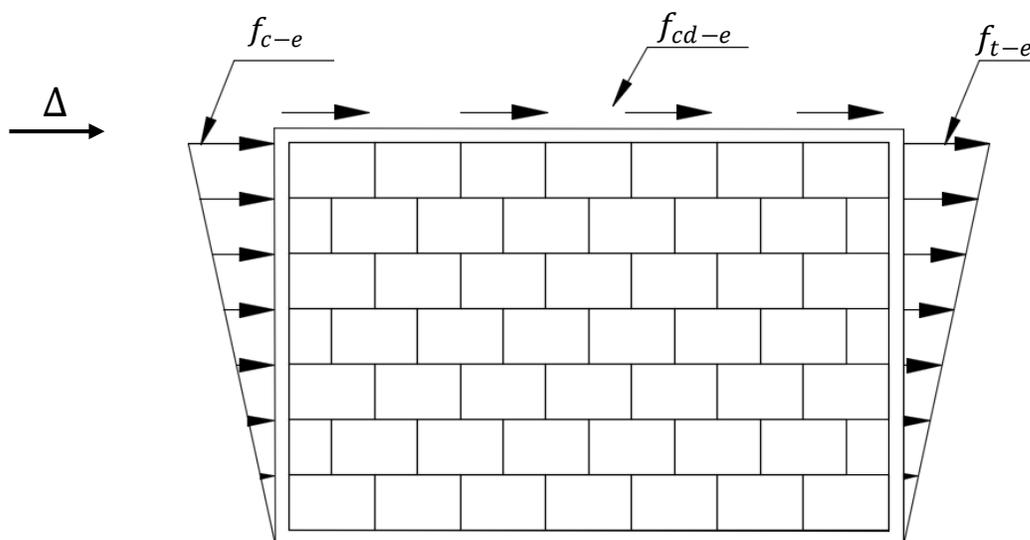


Figura 3.24 Tipos de esfuerzos laterales transferidos.

Los primeros están asociados con la compresión de la espuma de poliuretano (f_{c-e}) en la junta vertical. Los desplazamientos en la junta vertical son máximos en la parte superior y nulos en la parte inferior. Se consideró una distribución de desplazamientos lineal en la altura del marco. Por lo tanto, los esfuerzos se distribuyeron de acuerdo con la relación esfuerzo a compresión – desplazamiento de la espuma de poliuretano obtenida experimentalmente. Los segundos esfuerzos están asociados al cortante de la junta de espuma de poliuretano (f_{cd-e}) en la junta horizontal superior. Los desplazamientos generados en la junta horizontal superior son los mismos en toda la longitud del muro. Por lo tanto, los esfuerzos son constantes en toda la longitud y se determinaron con la relación esfuerzo cortante – desplazamiento entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA o con la relación esfuerzo cortante – desplazamiento entre el acero, la espuma de poliuretano y el CCA. Los terceros esfuerzos son debidos a la tensión por adherencia de la espuma de poliuretano (f_{t-e}) en la junta vertical opuesta a la junta que se encuentra en compresión. Para este trabajo, los esfuerzos

debido a la tensión por adherencia de la espuma de poliuretano fueron considerados nulos.

La superposición de los esfuerzos podría generar una falla en el muro no estructural. Por tal motivo, se determinaron las fuerzas transferidas en el plano a los muros no estructurales para distintos niveles de desplazamiento. Se consideró un muro no estructural de CCA clase 4 de 400 cm de altura, 600 cm de longitud y 10 cm de espesor. El muro no estructural se encuentra dentro de un marco de concreto reforzado con una junta de espuma de poliuretano de 2 cm. Adicionalmente se determinó la distorsión asociada con la resistencia a cortante de muros de mampostería de CCA. La resistencia a cortante se determinó con las ecuaciones 2.1 y 2.2. Finalmente, de manera similar, se realizó el análisis de sensibilidad para determinar la distorsión asociada con la resistencia a cortante de muros de mampostería de CCA con diferentes longitudes y alturas. Se consideraron muros de mampostería de CCA clase 4 de 10 cm de espesor con junta de espuma de poliuretano de 2 cm de espesor, longitudes de 300 cm a 500 cm y alturas de 200 cm a 600 cm.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales descritas en la metodología.

4.1 Propiedades del CCA

En la Tabla 4.1 se presenta la densidad aparente (ρ_{CCA}) obtenida para los cubos, los prismas, los bloques B1 y los bloques B2 para la planta 1. Se observa que el valor promedio de la densidad aparente de los cubos, prismas, bloques B1 y bloques B2, fueron de 498.33 kg/m³, 537.94 kg/m³, 594.85 kg/m³ y 593.20 kg/m³, respectivamente. CV es el coeficiente de variación correspondiente.

Tabla 4.1 Densidad aparente de cubos, prismas, bloques B1 y B2 para la planta 1.

Cubo	ρ_{CCA} (kg/m ³)	Prisma	ρ_{CCA} (kg/m ³)	Bloque B1	ρ_{CCA} (kg/m ³)	Bloque B2	ρ_{CCA} (kg/m ³)
P1-TC	490.20	P1-TC	530.03	P1-01	588.2	P1-01	593.47
P1-MC	497.60	P1-MC	534.07	P1-02	586.75	P1-02	596.91
P1-BC	507.20	P1-BC	549.73	P1-03	609.61	P1-03	589.22
Promedio	498.33	Promedio	537.94	Promedio	594.85	Promedio	593.20
CV	1.71%	CV	1.93%	CV	2.15%	CV	0.65%

En la Tabla 4.2 se presentan el contenido de humedad (H) de los cubos y la resistencia a compresión del CCA (f_{CCA}) para la planta 1. Se observa que la resistencia a compresión del CCA, con contenidos de humedad aproximadas del 6%, 10% y 14%, fueron de 50.74 kg/cm², 49.27 kg/cm² y 47.44 kg/cm², respectivamente. Las fallas de los cubos se presentan en el APÉNDICE C.

Tabla 4.2 Resistencia a compresión del CCA para la planta 1.

Cubo	H (%)	f_{CCA} (kg/cm ²)	Cubo	H (%)	f_{CCA} (kg/cm ²)	Cubo	H (%)	f_{CCA} (kg/cm ²)
L1-TC-16	6.20	47.48	L2-TC-15	9.78	44.11	L2-TC-16	13.84	45.23
L1-MC-16	5.58	54.69	L2-MC-15	9.93	51.44	L2-MC-16	13.89	48.85
L1-BC-16	6.87	55.87	L2-BC-15	10.52	52.26	L2-BC-16	14.02	48.23
L4-TC-03	6.02	42.22	-	-	-	-	-	-
L4-MC-03	6.10	51.47	-	-	-	-	-	-
L4-BC-03	6.50	52.70	-	-	-	-	-	-
Promedio	6.21	50.74	Promedio	10.08	49.27	Promedio	13.92	47.44
CV (%)	7.04	10.03	CV (%)	3.91	9.11	CV (%)	0.67	4.09

En la Tabla 4.3 se presentan el contenido de humedad (H) de los bloques y la resistencia a tensión por compresión del CCA (f_{tCCA}) para la planta 1 y planta 2. Para la planta 1 el contenido de humedad se determinó con base en la densidad aparente de los bloques B1. Se observa que la resistencia a tensión por compresión promedio para la planta 1 y 2 fueron de 4.31 kg/cm² y 4.42 kg/cm², respectivamente. Las fallas de los bloques se presentan en el APÉNDICE D.

Tabla 4.3 Resistencia a tensión por compresión para los bloques.

Planta 1			Planta 2	
bloque	H (%)	f_{tCCA} (kg/cm ²)	bloque	f_{tCCA} (kg/cm ²)
L1-ft-7	13.74	4.26	L1-ft-1	4.26
L1-ft-8	14.53	4.23	L1-ft-2	4.50
L1-ft-9	10.94	4.37	L1-ft-3	4.49
L1-ft-10	12.95	4.39	L1-ft-4	4.37
L1-ft-11	14.02	4.23	L1-ft-5	4.70
L1-ft-12	10.31	4.16	L1-ft-6	4.22
L2-ft-7	12.64	4.38	-	-
L2-ft-8	10.56	4.69	-	-
L2-ft-9	10.76	4.21	-	-
L2-ft-10	12.95	4.26	-	-
L2-ft-11	10.25	4.55	-	-
L2-ft-12	12.45	3.99	-	-
Promedio	12.17	4.31	Promedio	4.42
CV	12.68%	4.23%	CV	4.04%

En la Tabla 4.4 se presentan el contenido de humedad (H) de los bloques y la resistencia a tensión por compresión (f_{rCCA}) para la planta 1 y planta 2. Para la planta 1 el contenido de humedad se determinó con base en la densidad aparente de los bloques B1. Se observa que la resistencia a tensión por compresión promedio para la planta 1 y 2 fueron de 8.23 kg/cm² y 8.53 kg/cm², respectivamente. Las fallas de los bloques se presentan en el APÉNDICE E.

Tabla 4.4 Resistencia a tensión por flexión para los bloques.

Planta 1			Planta 2	
bloque	H (%)	f_{rCCA} (kg/cm ²)	bloque	f_{rCCA} (kg/cm ²)
L1-fr-7	13.84	8.41	L1-fr-1	8.67
L1-fr-8	14.28	7.06	L1-fr-2	8.81
L1-fr-9	13.45	7.84	L1-fr-3	7.87
L1-fr-10	11.44	8.45	L1-fr-4	8.14
L1-fr-11	13.45	8.57	L1-fr-5	9.83
L1-fr-12	10.50	8.81	L1-fr-6	7.86
L2-fr-7	12.32	8.27	-	-
L2-fr-8	12.51	8.43	-	-
L2-fr-9	12.23	7.86	-	-
L2-fr-10	11.79	8.73	-	-
L2-fr-11	10.47	8.94	-	-
L2-fr-12	13.08	7.37	-	-
Promedio	12.45	8.23	Promedio	8.53
CV	9.97%	7.10%	CV	8.78%

En la Tabla 4.5 se presentan el contenido de humedad (H) de los prismas y el módulo de elasticidad (E_{CCA}) para la planta 1. El contenido de humedad se determinó con base en la densidad aparente de los prismas. Para la planta 1 se observa que el módulo de elasticidad, con contenidos de humedad aproximadas del 6%, 10% y 14%, fueron de 18,878 kg/cm², 19,019 kg/cm² y 19,426 kg/cm², respectivamente. Las curvas esfuerzo – deformación unitaria de los prismas del CCA ensayados se presentan en la Figura 4.1. Las fallas de los prismas se presentan en el APÉNDICE F.

Tabla 4.5 Módulo de elasticidad para la planta 1.

Prisma	H (%)	E_{CCA} (kg/cm ²)	Prisma	H (%)	E_{CCA} (kg/cm ²)	Prisma	H (%)	E_{CCA} (kg/cm ²)
L2-TC-04	6.41	18413	L2-TC-03	10.35	15859	L3-TC-03	13.94	19846
L1-MC-16	6.21	18513	L1-BC-16	10.53	21759	L3-BC-03	14.24	18448
L1-MC-15	6.65	17908	L1-TC-15	9.53	19440	L1-TC-16	13.09	19985
L1-BC-15	6.05	17419	-	-	-	-	-	-
L3-TC-04	6.52	19206	-	-	-	-	-	-
L3-BC-04	6.67	21807	-	-	-	-	-	-
Promedio	6.42	18878	Promedio	10.14	19019	Promedio	13.76	19426
CV	3.86%	8.24%	CV	5.26%	15.63%	CV	4.34%	4.37%

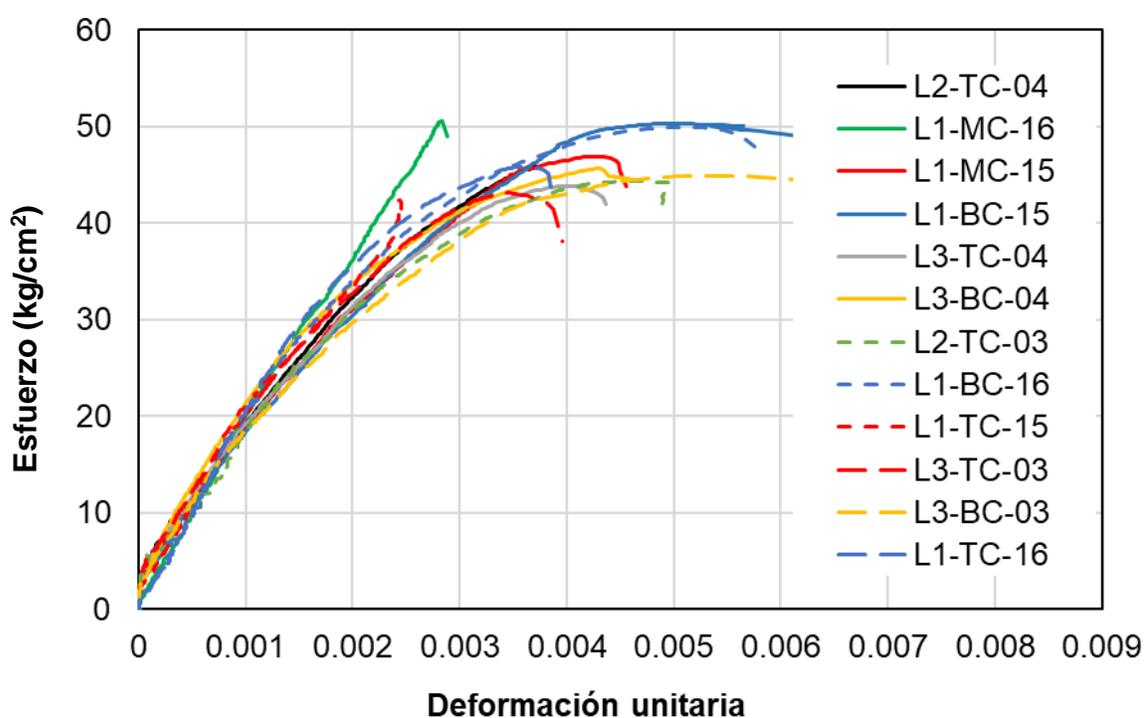


Figura 4.1 Curvas esfuerzo-deformación unitaria de los prismas de CCA.

En la Tabla 4.6 se presentan el contenido de humedad (H) de los bloques, la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada ($f_{tCCA-adh}$) y el tipo de falla observado. El contenido de humedad se determinó con base en la densidad aparente de los bloques B1. Se observa que la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada promedio fue de 3.30 kg/cm², 2.68 kg/cm² y 3.73 kg/cm² para las distintas combinaciones de mortero de pared delgada y

bloque. Las fallas observadas en los especímenes fueron de tres tipos: fractura del bloque (bloque), adherencia del mortero de pared delgada con el bloque (junta) y combinación de la falla en el bloque con la junta (combinada). En la Figura 4.2 se presentan los tres tipos de falla observados. Las fallas de los especímenes se presentan en el APÉNDICE G.

Tabla 4.6 Resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada.

M1 y bloques de la planta 1			
Especímen	H (%)	$f_{tCCA-adh}$ (kg/cm²)	Falla
M1-P1-ft-1	13.57	3.22	Combinado
M1-P1-ft-2	11.50	3.28	Junta
M1-P1-ft-3	14.50	3.34	Bloque
M1-P1-ft-4	10.45	3.33	Bloque
M1-P1-ft-5	14.40	3.22	Junta
M1-P1-ft-6	14.69	3.39	Bloque
Promedio	13.19	3.30	
CV	13.55%	2.11%	
M2 y bloques de la planta 2			
Especímen	H (%)	$f_{tCCA-adh}$ (kg/cm²)	Falla
M2-P2-ft-1	-	3.07	Combinado
M2-P2-ft-2	-	2.05	Junta
M2-P2-ft-3	-	2.79	Junta
M2-P2-ft-4	-	2.74	Bloque
M2-P2-ft-5	-	2.70	Bloque
M2-P2-ft-6	-	2.71	Combinado
Promedio	-	2.68	
CV	-	12.55%	
M3 y bloques de la planta 1			
Especímen	H (%)	$f_{tCCA-adh}$ (kg/cm²)	Falla
M3-P1-ft-1	14.83	3.60	Bloque
M3-P1-ft-2	10.25	3.69	Junta
M3-P1-ft-3	13.39	3.72	Bloque
M3-P1-ft-4	14.88	4.15	Bloque
M3-P1-ft-5	12.82	3.71	Combinado
M3-P1-ft-6	14.96	3.49	Bloque
Promedio	13.52	3.73	
CV	13.57%	6.06%	



a) Bloque

b) Junta



c) Combinada

Figura 4.2 Fallas típica de espécimen ($f_{tCCA-adh}$).

En la Tabla 4.7 se presentan el contenido de humedad (H) de los bloques, la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada ($f_{rCCA-adh}$) y el tipo de falla observado. El contenido de humedad se determinó con base en la densidad aparente de los bloques B1. En la Tabla 4.7 se observa que la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada promedio fue de 6.76 kg/cm², 4.73 kg/cm² y 6.86 kg/cm² para las distintas combinaciones de mortero de pared delgada y bloque. La falla se caracterizó por una grieta vertical en los medios bloques cercana a la junta de mortero de pared delgada (bloque). En la Figura 4.3 se presenta

la falla típica de los especímenes. Las fallas de los especímenes se presentan en el APÉNDICE H.

Tabla 4.7 Resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada.

M1 y bloques de la planta 1			
Especímen	H (%)	$f_{rCCA-adh}$ (kg/cm²)	Falla
M1-P1-fr-1	13.27	8.37	Bloque
M1-P1-fr-2	14.91	5.87	Bloque
M1-P1-fr-3	12.82	6.79	Bloque
M1-P1-fr-4	12.89	8.31	Bloque
M1-P1-fr-5	14.86	6.83	Bloque
M1-P1-fr-6	14.39	4.38	Bloque
Promedio	13.86	6.76	
CV	7.02%	22.38%	
M2 y bloques de la planta 2			
Especímen	H (%)	$f_{rCCA-adh}$ (kg/cm²)	Falla
M2-P2-fr-1	-	7.26	Bloque
M2-P2-fr-2	-	4.63	Bloque
M2-P2-fr-3	-	4.17	Bloque
M2-P2-fr-4	-	3.29	Bloque
M2-P2-fr-5	-	3.98	Bloque
M2-P2-fr-6	-	5.04	Bloque
Promedio	-	4.73	
CV	-	29.13%	
M3 y bloques de la planta 1			
Especímen	H (%)	$f_{rCCA-adh}$ (kg/cm²)	Falla
M3-P1-fr-1	11.07	7.76	Bloque
M3-P1-fr-2	9.31	4.33	Bloque
M3-P1-fr-3	13.14	8.37	Bloque
M3-P1-fr-4	13.80	5.86	Bloque
M3-P1-fr-5	14.40	6.69	Bloque
M3-P1-fr-6	10.50	8.12	Bloque
Promedio	12.04	6.86	
CV	16.90%	22.68%	



Figura 4.3 Falla típica de espécimen ($f_{rCCA-adh}$).

En la Tabla 4.8 se presentan la resistencia a compresión del mortero de pared delgada (f_{j-pd}) empleados. Se observa que la resistencia a compresión del mortero de pared delgada promedio para el M1, M2 y M3, fueron de 115.25 kg/cm², 120.07 kg/cm² y 120.77 kg/cm², respectivamente.

Tabla 4.8 Resistencia a compresión del mortero de pared delgada para M1, M2 y M3.

M1		M2		M3	
Cubo	f_{j-pd} (kg/cm ²)	Cubo	f_{j-pd} (kg/cm ²)	Cubo	f_{j-pd} (kg/cm ²)
M1-1	120.32	M2-1	112.87	M3-1	123.67
M1-2	112.38	M2-2	127.70	M3-2	117.23
M1-3	123.08	M2-3	124.75	M3-3	127.12
M1-4	105.23	M2-4	114.94	M3-4	115.06
Promedio	115.25	Promedio	120.07	Promedio	120.77
CV	7.01%	CV	6.05%	CV	4.63%

4.2 Propiedades de la espuma de poliuretano

En la Tabla 4.9 se presenta la resistencia a compresión de la espuma de poliuretano (f_{cesp}) asociado a un desplazamiento de 12 mm. Dicho desplazamiento se define como el límite del comportamiento lineal de la espuma de poliuretano. Las relaciones esfuerzo a compresión – desplazamiento se presentan en la Figura 4.4. En la Tabla 4.9 se observa que la resistencia a compresión de la espuma de poliuretano promedio para la E1 y E2, fueron de 1.59 kg/cm² y 2.11 kg/cm², respectivamente.

Tabla 4.9 Resistencia a compresión de la espuma de poliuretano (f_{cesp}) a un desplazamiento de 12 mm.

Espécimen	f_{cesp} (kg/cm ²)	Espécimen	f_{cesp} (kg/cm ²)
E1-1	1.37	E2-1	2.42
E1-2	1.65	E2-2	1.78
E1-3	1.57	E2-3	1.83
E1-4	1.39	E2-4	2.39
E1-5	2.10	E2-5	2.29
E1-6	1.45	E2-6	1.93
Promedio	1.59	Promedio	2.11
CV	16.25%	CV	13.93%

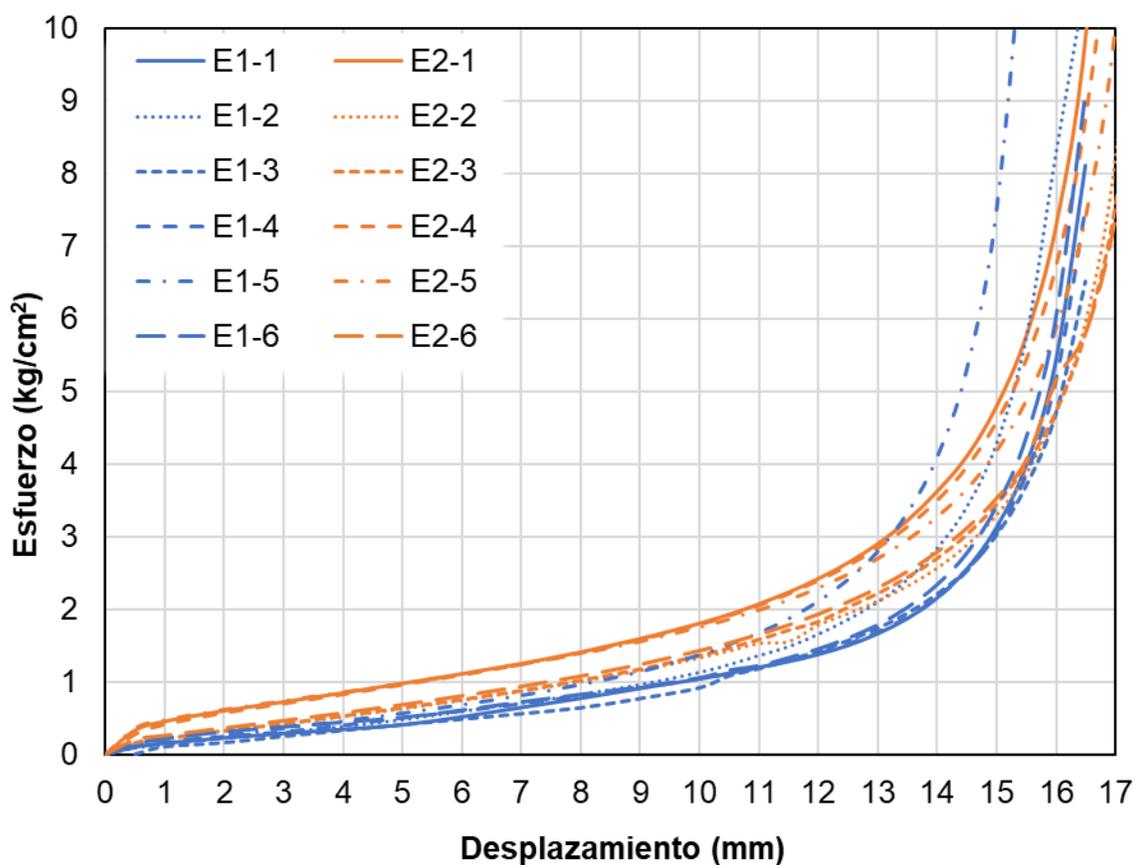


Figura 4.4 Esfuerzo compresión – desplazamiento de los especímenes.

En la Tabla 4.10 se presenta la resistencia a cortante de la espuma de poliuretano (f_{cd-adh}), el desplazamiento asociado y el tipo de falla presentado en cada junta de espuma de poliuretano. Las relaciones esfuerzo cortante – desplazamiento entre el concreto, espuma de poliuretano y CCA se presentan en la Figura 4.5 y las relaciones

esfuerzo cortante – desplazamiento entre el acero, espuma de poliuretano y CCA se presentan en la Figura 4.6. La resistencia a cortante de la espuma de poliuretano se define como el esfuerzo máximo. En la Tabla 4.10 se observa que la resistencia a cortante de la espuma de poliuretano promedio fue de 0.34 kg/cm², 0.69 kg/cm², 0.26 kg/cm² y 0.68 kg/cm², para la espuma 1 (E1) en marco de concreto (MC), espuma 2 (E2) en MC, E1 en marco de acero (MA) y E2 en MA, respectivamente. Las fallas típicas de los especímenes fueron de tres tipos: adherencia de la espuma con el marco (adherencia MC o MA), adherencia de la espuma con el bloque B2 (adherencia CCA) y cortante de la espuma (cortante). Se consideró falla por adherencia cuando en el marco o en el bloque B2 quedaron sin espuma de poliuretano. Se considero falla por cortante cuando la espuma se quedó adherida al marco y al bloque B2. Se determinó la falla para cada junta de espuma de poliuretano. Por lo que para un mismo espécimen se pueden presentar dos tipos distintos de falla. En la Figura 4.7 se presentan las fallas típicas de los especímenes ensayados. Las fallas de los especímenes se presentan en el APÉNDICE I.

Tabla 4.10 Resistencia a cortante de la espuma de poliuretano de los especímenes.

MC – E1			
Espécimen	f_{cd-adh} (kg/cm²)	Desplazamiento (mm)	Tipo de falla
MC-E1-1	0.37	5.20	Cortante
MC-E1-2	0.43	6.64	Cortante/Adherencia CCA
MC-E1-3	0.21	2.65	Cortante
MC-E1-4	0.25	3.08	Cortante
Promedio	0.34	4.39	
CV	32.57%	42.51%	
MC – E2			
Espécimen	f_{cd-adh} (kg/cm²)	Desplazamiento (mm)	Tipo de falla
MC-E2-1	0.76	1.67	Cortante
MC-E2-2	0.65	1.25	Cortante
MC-E2-3	0.70	1.52	Cortante
MC-E2-4	0.65	1.72	Cortante
Promedio	0.69	1.54	
CV	7.72%	13.83%	
MA – E1			
Espécimen	f_{cd-adh} (kg/cm²)	Desplazamiento (mm)	Tipo de falla
MA-E1-1	0.19	3.75	Adherencia MA
MA-E1-2	0.29	6.25	Adherencia CCA/Adherencia MA
MA-E1-3	0.31	4.56	Adherencia MA/Adherencia CCA
MA-E1-4	0.25	4.82	Adherencia MA
Promedio	0.26	4.85	
CV	19.79%	21.50%	
MA – E2			
Espécimen	f_{cd-adh} (kg/cm²)	Desplazamiento (mm)	Tipo de falla
MA-E2-1	0.56	5.39	Cortante/Adherencia MA
MA-E2-2	0.78	5.13	Adherencia MA/Cortante
MA-E2-3	0.70	5.62	Adherencia MA
MA-E2-4	0.68	3.40	Adherencia MA/Cortante
Promedio	0.68	5.08	
CV	13.17%	23.61	

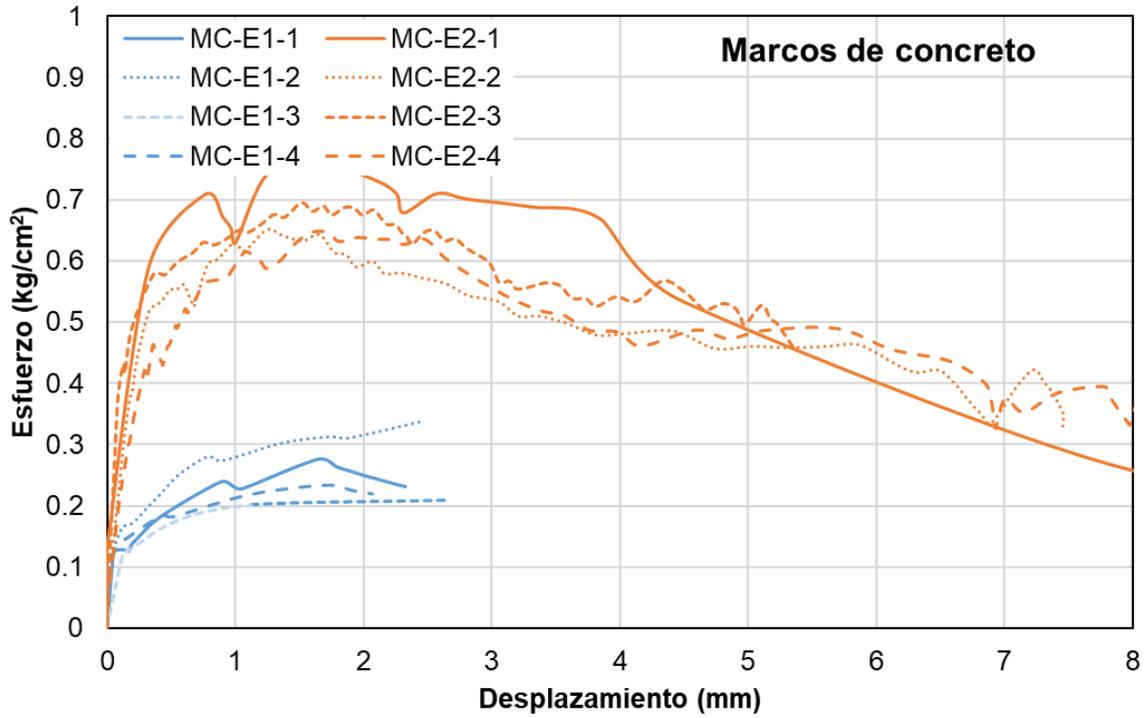


Figura 4.5 Esfuerzo cortante – desplazamiento marcos de concreto.

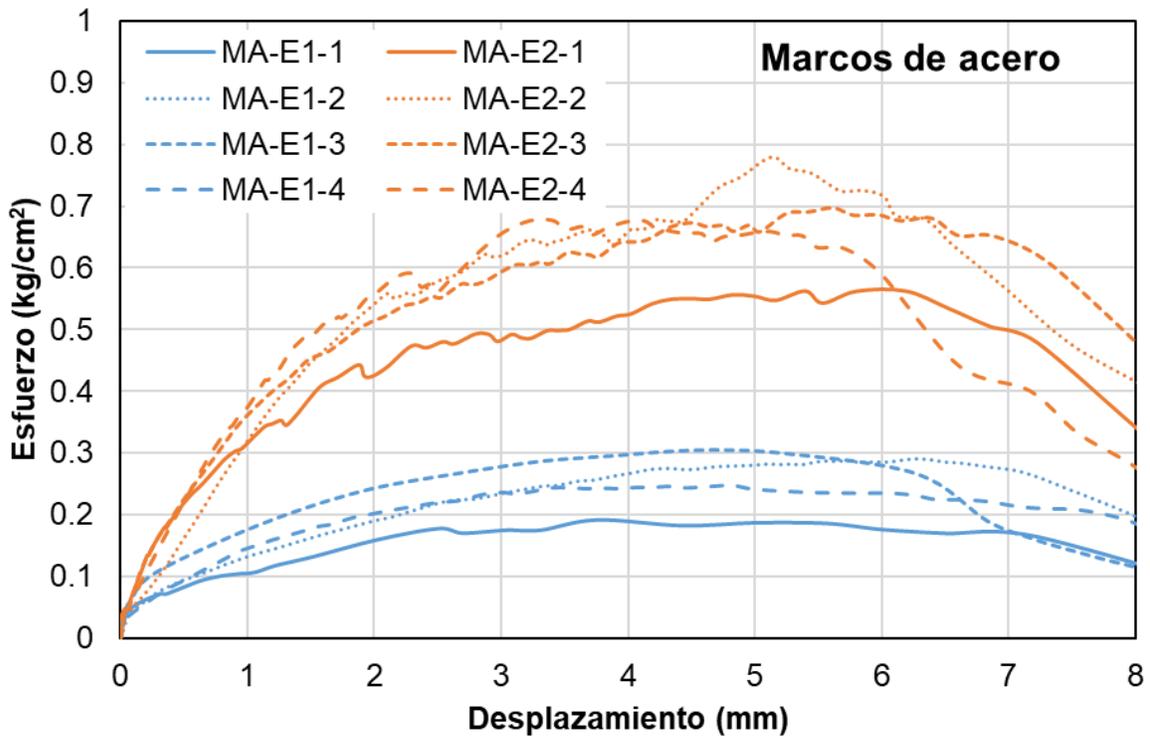


Figura 4.6 Esfuerzo cortante – desplazamiento marcos de acero.



a) MC-E1



b) MC-E2



a) MA-E1



b) MA-E2

Figura 4.7 Fallas típicas de especímenes sujetos a esfuerzos cortantes.

En la Tabla 4.11 se presentan la resistencia a tensión por flexión de la espuma de poliuretano (f_{fr-adh}), el desplazamiento y el ángulo de rotación asociado. Se observa que la resistencia a tensión por flexión de la espuma de poliuretano fue de 0.71 kg/cm^2 . Dicha resistencia se asoció a un desplazamiento de 2.8 cm y a un ángulo de rotación del bloque B2 de 4.57 grados . Las curvas momento – desplazamiento entre el marco de concreto, espuma de poliuretano y CCA se presentan en la Figura 4.8. Las fallas de los especímenes se presentan en el APÉNDICE J.

Tabla 4.11 Resistencia a tensión por flexión de la espuma de poliuretano.

Espécimen	f_{fr-adh} (kg/cm ²)	Desplazamiento (cm)	Ángulo de rotación (grados)
MC-E1-1	0.65	2.30	3.76
MC-E1-2	0.72	3.20	5.22
MC-E1-3	0.74	2.70	4.41
MC-E1-4	0.71	3.00	4.90
Promedio	0.71	2.80	4.57
CV	5.39%	13.98%	13.93%

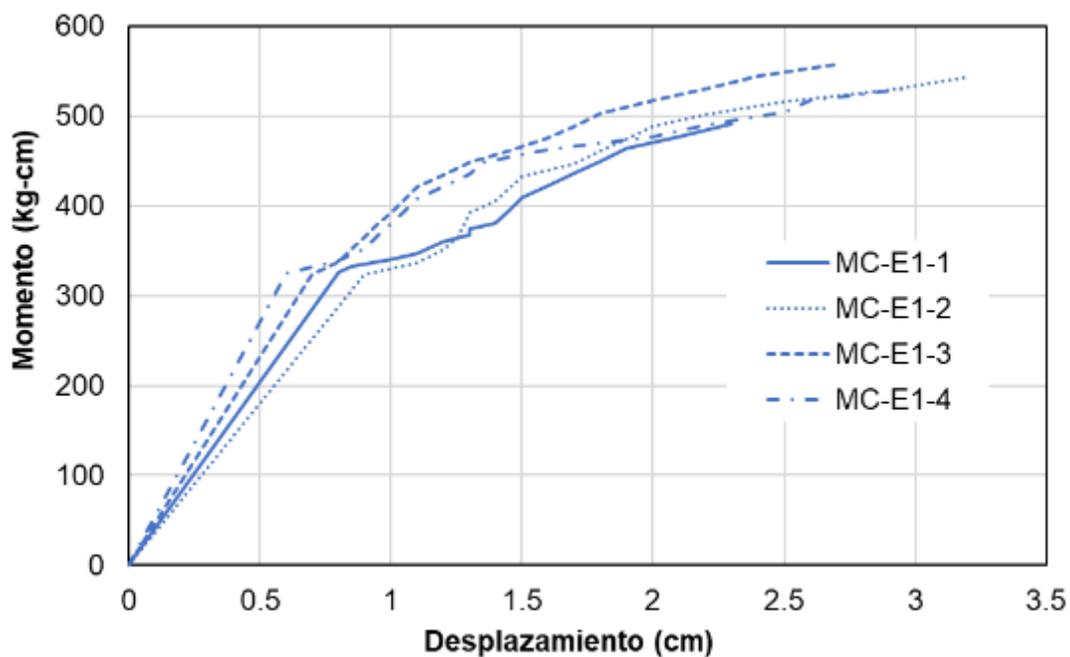


Figura 4.8 Momento – desplazamiento vertical marco de concreto.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Propiedades del CCA

En la Tabla 5.1 se presentan las propiedades de CCA obtenidas experimentalmente: la densidad aparente (ρ_{CCA}), la resistencia a compresión (f_{CCA}), la resistencia a tensión por compresión (f_{tCCA}), la resistencia a tensión por flexión (f_{rCCA}) y el módulo de elasticidad (E_{CCA}). El CCA estudiado en este trabajo fue clase 4 de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C1693. Debido a situaciones ajenas para la planta 2 no se pudo determinar experimentalmente la resistencia a compresión del CCA y el módulo de elasticidad del CCA. Dichas propiedades fueron calculadas con las ecuaciones establecidas en el ACI 530. Se calcularon con base a la resistencia a tensión por compresión obtenida experimentalmente. Se observa que la resistencia a compresión del CCA es mayor para la planta 1 en un 5 %. Mientras que, para la resistencia a tensión por compresión, la resistencia a tensión por flexión y el módulo de elasticidad del CCA, es menor para la planta 1 en un 3 %, 4 % y 17 %, respectivamente. La relación entre la resistencia a tensión por flexión y la resistencia a tensión por compresión es de 1.91 y 1.93 para la planta 1 y 2, respectivamente.

Tabla 5.1 Propiedades del CCA experimentales.

Planta productora de CCA	ρ_{CCA} (kg/m ³)	f_{CCA} (kg/m ²)	f_{tCCA} (kg/m ²)	f_{rCCA} (kg/m ²)	E_{CCA} (kg/m ²)	$\frac{f_{rCCA}}{f_{tCCA}}$	Clasificación ASTM C1693
Planta 1	498.33	49.55	4.31	8.23	19050	1.91	Clase 4
Planta 2	-	47.20	4.42	8.53	22707	1.93	Clase 4
Planta 1 / Planta 2	-	1.05	0.97	0.96	0.83	-	-

En Tabla 5.2 se presentan las propiedades del CCA calculadas con las ecuaciones establecidas en el ACI-530. Las propiedades son calculadas en función de la resistencia a compresión del CCA obtenida experimentalmente. Por tal motivo, no se calcula para la planta 2. Las ecuaciones establecidas en el ACI 530 sobrestima en un 5 % la resistencia a tensión por compresión (f_{tCCA}), 10 % la resistencia a tensión por flexión (f_{rCCA}) y 23 % el módulo de elasticidad (E_{CCA}).

Tabla 5.2 Comparación de las propiedades del CCA.

Planta 1	f_{tCCA} (kg/m ²)	f_{rCCA} (kg/m ²)	E_{CCA} (kg/m ²)
Experimental	4.31	8.23	19050
Analítica (ACI 530)	4.53	9.06	23379
Analítica / experimental	1.05	1.10	1.23

En la Tabla 5.3 se presenta la densidad aparente (ρ_{CCA}) obtenida con distintos tipos de especímenes para la planta 1, la relación de la densidad aparente con la densidad aparente obtenida de tres cubos de 10 cm (Tabla 5.1), el volumen del espécimen de estudio, el área superficial de cada espécimen y la relación del área superficial con el volumen. Se observa que la densidad aparente varía para cada tipo de espécimen. La densidad aparente es 8% mayor si es obtenida con prismas y 19% mayor si es obtenida con bloques B1 y B2. Esto se debe a la metodología establecida en la norma ASTM C1693. Al momento del secado, el calor generado por el horno se introduce por los poros del CCA evaporando el agua absorbida desde su fabricación. Debido a la relación área superficial con el volumen de cada espécimen el agua será evaporado en mayor o menor cantidad y a una menor o mayor velocidad. A mayor relación área superficial con el volumen es más fácil que el agua contenida en el centro del espécimen sea evaporada. De acuerdo con la metodología la masa para considerar al determinar la densidad aparente es la obtenida con una variación menor al 0.2% de la medición previa en un intervalo de 2 horas. Para especímenes con menor relación entre el área superficial con el volumen, en un intervalo de 2 horas no se genera una variación de masa mayor al 0.2%. Por lo tanto, la norma ASTM C 1693 propicia un secado superficial.

Tabla 5.3 densidad aparente para distintos tipos de especímenes para la planta 1.

Tipo de espécimen	ρ_{CCA} (kg/m ³)	$\frac{\rho_{CCA}}{\rho_{CCA} (Cubos)}$	Volumen (m ³)	Área superficial (m ²)	Área superficial /Volumen (1/m)
Cubo	498.33	1.00	0.0010	0.06	60
Prisma	537.94	1.08	0.0020	0.10	50
Bloque B1	594.85	1.19	0.0179	0.48	27
Bloque B2	593.20	1.19	0.0239	0.68	28

En la norma ASTM C1693 se establece que la densidad aparente debe ser determinada con prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm. La cual es empleada para determinar el contenido de humedad para distintos tipos de especímenes y depende de la relación del área superficial con el volumen. Por lo tanto, sería inadecuado para especímenes distintos a los prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm calcular su contenido de humedad. La relación de la densidad aparente para cada tipo de espécimen con la densidad aparente obtenida de tres cubos de 10 cm puede ser empleado como un factor de corrección ($FC\rho_{CCA}$). En la Figura 5.1 se presenta el factor de corrección contra la relación del área superficial con el volumen. Se realizó un ajuste lineal por mínimos cuadrados donde se obtuvo la ecuación 5.1. La R^2 es de 0.9868, por lo que representa un buen ajuste.

$$FC\rho_{CCA} = 1.3476 - 0.0056 \left(\frac{\text{Área superficial}}{\text{Volumen}} \right) \quad 5.1$$

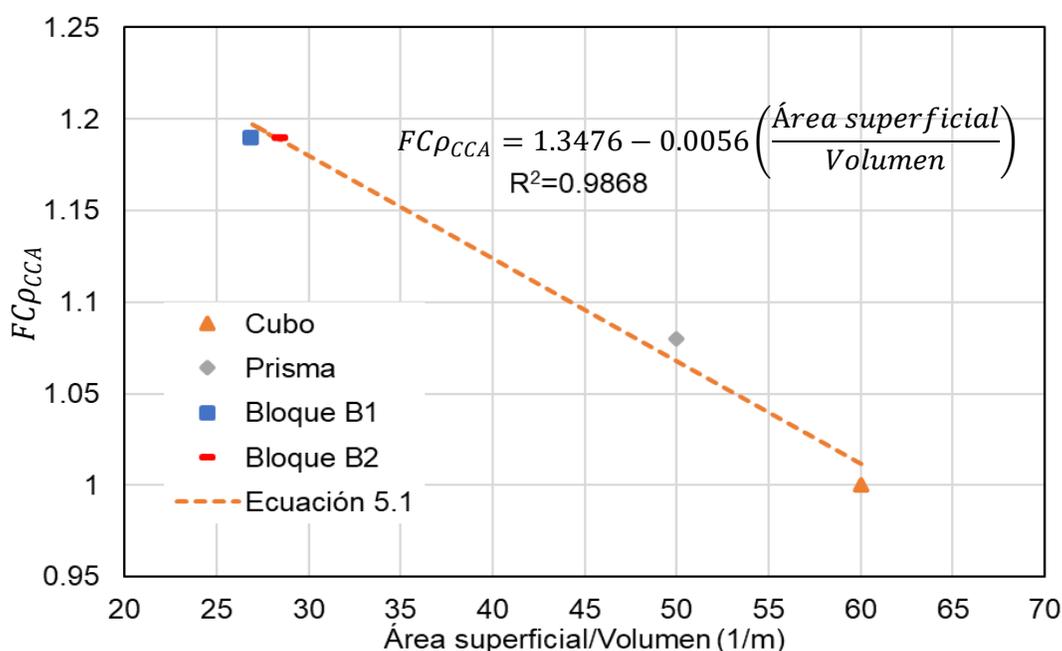


Figura 5.1 Factor de corrección vs relación del área superficial con el volumen.

Las propiedades mecánicas del CCA varían con respecto al contenido de humedad (H). Por tal motivo, se agruparon las resistencias a compresión del CCA (f_{CCA}) con

respecto al contenido de humedad. En la Tabla 5.4 se presentan el contenido de humedad, la resistencia a compresión del CCA y la resistencia a compresión del CCA normalizada con la resistencia a compresión del CCA obtenida para la planta 1 presentada en la Tabla 5.1. Se observa que la resistencia a compresión del CCA depende del contenido de humedad, a mayor contenido de humedad menor es la resistencia compresión del CCA. Lo anterior es consistente con lo observado por otros autores (Houst et al. 1983; Pérez 2019). Si la resistencia a compresión del CCA es obtenida con 6.21 % de contenido de humedad, cercano al límite inferior de la norma ASTM C1693, se obtendrán resistencias a la compresión 2 % mayores al promedio. Si es obtenida con 13.92 % de contenido de humedad, cercano al límite superior de la norma ASTM C1693, se obtendrán resistencias a compresión 4% menores al promedio. Se observa que la variación es poco significativa, sin embargo, si se ensayan especímenes de la planta 1 con contenido de humedad igual al mínimo establecido en la norma ASTM C1693 el CCA podría ser clasificado como clase 5.

Tabla 5.4 f_{CCA} para cubos con distintos H de la planta 1.

H (%)	f_{CCA} (kg/m ²)	$\frac{f_{CCA}}{f_{CCA} (planta\ 1)}$
6.21	50.74	1.02
10.08	49.27	0.99
13.92	47.44	0.96

Se determinó el contenido de humedad (H) para los bloques ensayados a tensión por compresión (f_{tCCA}) para la planta 1. Debido a que la densidad aparente varía con respecto al volumen del espécimen, en este trabajo el contenido de humedad fue determinado a partir de la densidad aparente reportada para bloques B1. El rango del contenido de humedad con el que se ensayaron los bloques se encuentra dentro los límites establecidos en la norma ASTM C1693. En la Figura 5.2 se presenta la relación de la resistencia a tensión por compresión con el contenido de humedad del bloque. Se observa que, para el rango estudiado, el contenido de humedad no influye significativamente en la resistencia a tensión por compresión. La resistencia a tensión por compresión máxima obtenida es 9% mayor al promedio. La resistencia a tensión por flexión mínima obtenida es 7% menor al promedio.

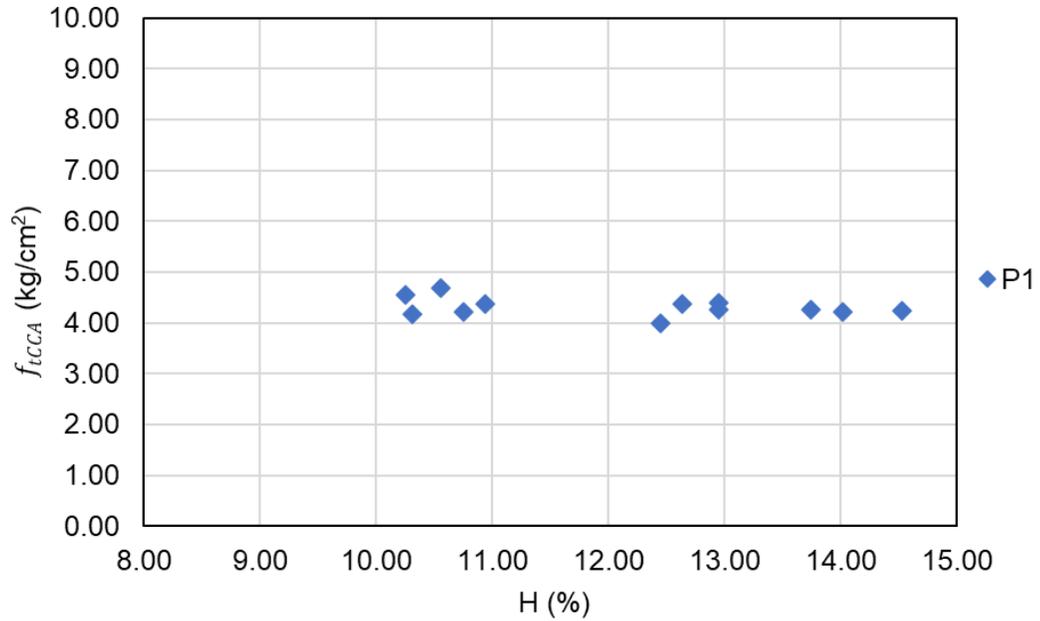


Figura 5.2 Contenido de humedad vs resistencia a tensión por compresión.

De manera similar se determinó el contenido de humedad (H) para los bloques ensayados a tensión por flexión (f_{rCCA}) para la planta 1. El rango del contenido de humedad obtenido se encuentra dentro los límites establecidos en la norma ASTM C1693. En la Figura 5.3 se presenta la relación de la resistencia a tensión por flexión con el contenido de humedad del bloque. Se observa que, para el rango estudiado, el contenido de humedad no influye significativamente para la resistencia a tensión por flexión. La resistencia a tensión por flexión máxima obtenida es 9% mayor al promedio. La resistencia a tensión por flexión mínima obtenida es 14% menor al promedio.

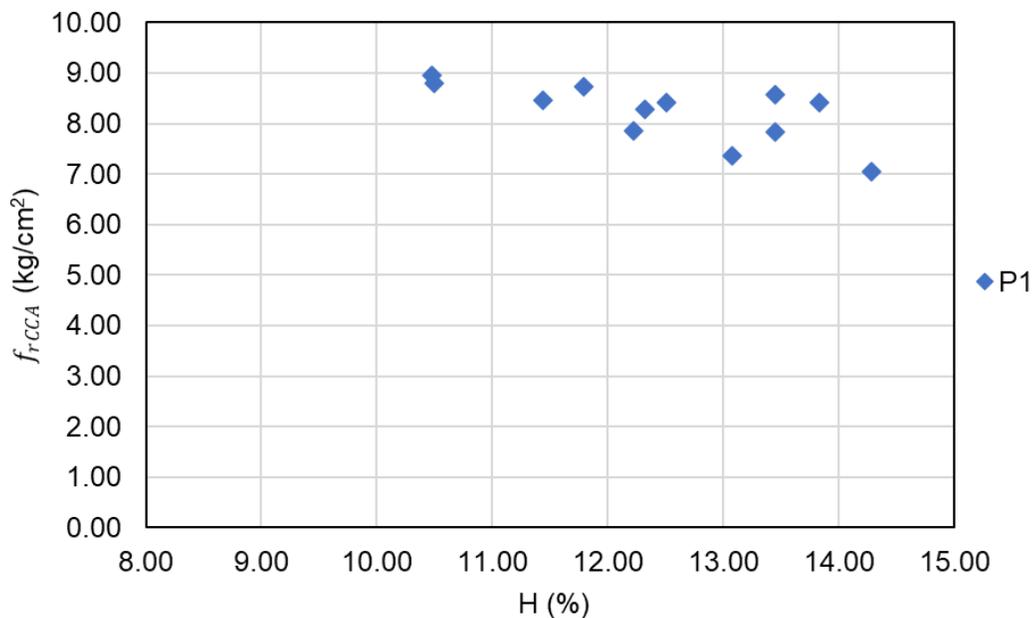


Figura 5.3 Contenido de humedad vs resistencia a tensión por flexión.

Se agrupó el módulo de elasticidad (E_{CCA}) con respecto al contenido de humedad (H). En la Tabla 5.5 se presentan el contenido de humedad, el módulo de elasticidad y el módulo de elasticidad normalizada con el módulo de elasticidad promedio obtenida para la planta 1 presentado en la Tabla 5.1. Se observa que a mayor contenido de humedad mayor es el módulo de elasticidad. Lo contrario a lo obtenido en la resistencia a compresión del CCA. Esto no es congruente a lo obtenido por Houst et al. 1983, donde a mayor contenido de humedad menor es el módulo de elasticidad. Si el módulo de elasticidad es obtenido con 6.42 % de contenido de humedad, cercano al límite inferior de la norma ASTM C1693, se obtendrán E_{CCA} 1% menores al promedio. Si es obtenida con 13.76% de contenido de humedad, cercano al límite superior de la norma ASTM C1693, se obtendrán módulo de elasticidad 2% mayores al promedio. Se observa que la variación es poco significativa. El módulo de elasticidad es poco sensible al contenido de humedad.

Tabla 5.5 módulo de elasticidad para prismas de la planta 1.

H (%)	E_{CCA} (kg/m²)	$\frac{E_{CCA}}{E_{CCA}(\text{planta 1})}$
6.42	18878	0.99
10.14	19019	1.00
13.76	19426	1.02

En la Tabla 5.6 se presenta la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada ($f_{tCCA-adh}$) asociada al tipo de falla observado y la relación de la $f_{tCCA-adh}$ con la $f_{tCCA-adh}$ de los especímenes que presentan falla en el bloque. Se observa que para especímenes construidos con bloques de la planta 1, se presenta con mayor frecuencia la falla en el bloque. Para los especímenes construidos con bloques de la planta 2, se presentan proporcionalmente los tres tipos de falla. Sin embargo, la variación de la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada de acuerdo con el tipo de falla presentado no es significativo. Por lo tanto, se asume que mortero de pared delgada tiene la suficiente resistencia para que este se comporte como un panel monolítico de CCA clase 4. Aunque la resistencia del mortero podría ser cercana a la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada obtenida experimentalmente. Se recomienda realizar más ensayos para determinar dicha resistencia considerando distintas clases de CCA, ya que para clases mayores se podría inducir la falla en la junta.

Tabla 5.6 Variación de la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada asociado con el tipo de falla.

M1-P1			
Tipo de falla	$f_{tCCA-adh}$ (kg/cm²)	Número de piezas	$\frac{f_{tCCA-adh}}{f_{tCCA-adh} \text{ bloque}}$
Bloque	3.35	3 (50.0%)	1.00
Junta	3.25	2 (33.3%)	0.97
Combinado	3.22	1 (16.7%)	0.96
M2-P2			
Tipo de falla	$f_{tCCA-adh}$ (kg/cm²)	Número de piezas	$\frac{f_{tCCA-adh}}{f_{tCCA-adh} \text{ bloque}}$
Bloque	2.72	2 (33.3%)	1.00
Junta	2.42	2 (33.3%)	0.89
Combinado	2.89	2 (33.3%)	1.06
M3-P1			
Tipo de falla	$f_{tCCA-adh}$ (kg/cm²)	Número de piezas	$\frac{f_{tCCA-adh}}{f_{tCCA-adh} \text{ bloque}}$
Bloque	3.80	4 (66.7%)	1.00
Junta	3.69	1 (16.7%)	0.97
Combinado	3.49	1 (16.7%)	0.92

En la Tabla 5.7 se presenta la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada ($f_{tCCA-adh}$), la resistencia a tensión por compresión (f_{tCCA}), de los bloques con el que se construyen los especímenes y la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada normalizada con la resistencia a tensión por compresión ($f_{tCCA-adh}/f_{tCCA}$). Se observa que la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada es 81% y 61% de la resistencia a tensión por compresión, para la planta 1 y 2, respectivamente. Debido a que se presenta con mayor frecuencia la falla del bloque, esto se asocia al crecimiento de la mezcla de CCA al momento de su fabricación. Cuando el CCA es depositado inicia un proceso mediante el cual la mezcla aumenta su volumen. La dirección de crecimiento de la mezcla de los bloques B1 es la presentada en la Figura 5.4. El crecimiento del CCA genera una mayor densidad en la parte inferior en comparación de la parte superior. Esto se relaciona directamente a la distribución y tamaño de poros. A mayor densidad aparente menor cantidad de poros; por consiguiente, mayor resistencia a compresión y a la tensión por compresión. Los especímenes para determinar la

resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada fueron realizados con dos medios bloques B1 pegados en sus caras externas. Lo que genera la unión de la zona del bloque B1 con mayor densidad aparente con la zona de menor densidad aparente. Un medio bloque tiene una mayor resistencia a tensión por compresión con respecto al otro. Esto induce la falla del espécimen a una menor carga en la zona de menor densidad aparente siempre y cuando el mortero cuente con la resistencia a tensión suficiente para inducir la falla en el bloque. Debido a esto, el proceso de expansión del CCA se presenta con mayor uniformidad para los bloques de la planta 1 debido a que la zona del bloque con menor densidad aparente alcanza en promedio el 81% de la resistencia a tensión por compresión de los bloques B1.

Tabla 5.7 $f_{tCCA-adh}$ de los especímenes.

Especímen	$f_{tCCA-adh}$ (kg/m ²)	f_{tCCA} (kg/m ²)	$\frac{f_{tCCA-adh}}{f_{tCCA}}$
M1 – P1	3.30	4.31	0.76
M2 – P2	2.68	4.42	0.61
M3 – P1	3.73	4.31	0.86

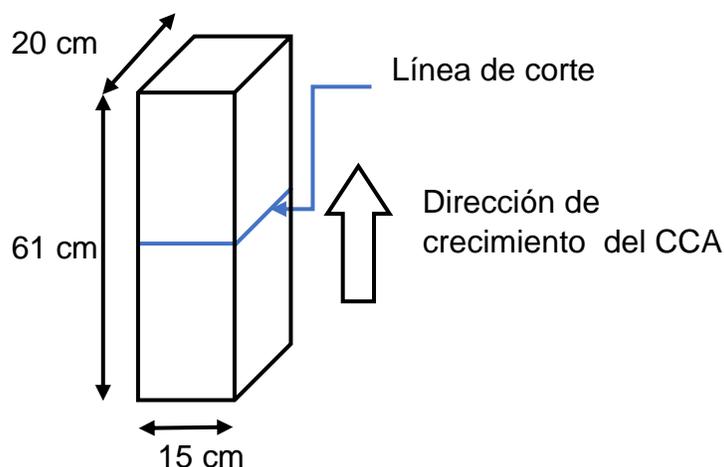


Figura 5.4 Dirección de crecimiento de bloques B1.

En los ensayos a tensión por flexión se observó un tipo de falla. La falla consistió en una grieta vertical cercana a la junta de mortero de pared delgada. Es decir, la resistencia de la junta es mayor que la del bloque. Por lo tanto, la resistencia a tensión perpendicular a las juntas de la mampostería a base de bloques de CCA estará

gobernado por la resistencia de los bloques. Para la unión de los bloques de CCA clase 4 se puede emplear cualquier tipo de mortero. En la Tabla 5.7 se presenta la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada ($f_{rCCA-adh}$), la resistencia a tensión por flexión (f_{rCCA}) de los bloques con el que se construyen los especímenes y la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada normalizada con la resistencia a tensión por flexión ($f_{rCCA-adh}/f_{rCCA}$). Se observa que, a pesar de no fallar en la junta la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada fue menor a la resistencia a tensión por flexión del bloque. La resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada fue en promedio 82% y 55% de la resistencia a tensión por flexión para la planta 1 y 2, respectivamente. De igual manera esto se asocia a la dirección de crecimiento del CCA discutido en la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada (Figura 5.4). El proceso de crecimiento de la mezcla del CCA se presenta con mayor uniformidad para los bloques de la planta 1 debido a que la zona del bloque con menor densidad alcanza en promedio el 82% de la resistencia a tensión por compresión de los bloques B1, congruente con lo observado en la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada. La relación entre la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada y la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada es de 2.05, 1.76 y 1.84 para los especímenes M1 – P1, M2 – P2 y M3 – P1, respectivamente. En promedio para la planta 1, la relación entre la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada y la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada fue 1.95, congruente con lo observado en la relación entre la resistencia a tensión por flexión y la resistencia a tensión por compresión igual a 1.91. Para la planta 2, la relación entre la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada y la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada fue 1.76, menor a lo observado en la relación entre la resistencia a tensión por flexión y la resistencia a tensión por compresión igual a 1.93.

Tabla 5.8 resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada de los especímenes.

Espécimen	$f_{rCCA-adh}$ (kg/m ²)	f_{rCCA} (kg/m ²)	$\frac{f_{rCCA-adh}}{f_{rCCA}}$	$\frac{f_{rCCA-adh}}{f_{tCCA-adh}}$
M1 – P1	6.76	8.23	0.82	2.05
M2 – P2	4.73	8.53	0.55	1.76
M3 – P1	6.86	8.23	0.83	1.84

5.2 Propiedades de la espuma de poliuretano

La relación esfuerzo a compresión (f_{c-e}) – desplazamiento (Δ) de las espumas de poliuretano obtenidas experimentalmente se presentan en la Figura 5.5. Se observa que el comportamiento de todas las espumas de poliuretano es similar. Por tal motivo, se presenta una curva promedio (EP) con base en las doce curvas obtenidas experimentalmente. Para la curva EP se definen desplazamientos conocidos y se promedian los esfuerzos asociados a dicho desplazamiento.

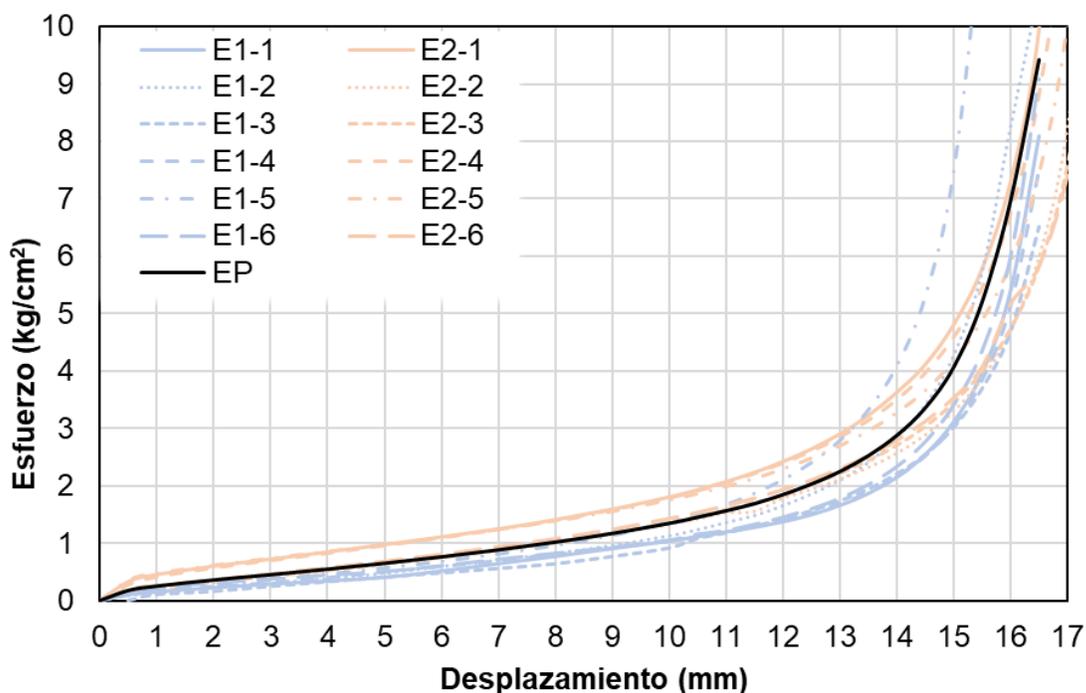


Figura 5.5 Esfuerzo a compresión vs desplazamiento de la espuma de poliuretano.

El comportamiento de la espuma de poliuretano se puede dividir en dos partes. Primero una zona elástica lineal y posteriormente un crecimiento exponencial. Para determinar los esfuerzos a compresión (f_{c-e}) que se transfieren por la espuma de poliuretano se definieron dos ecuaciones. Las cuales se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados. En la Tabla 5.9 se presentan las ecuaciones ajustadas. Los esfuerzos debido a la compresión de la espuma de poliuretano están definidos con las ecuaciones 5.2 y 5.3, para la zona lineal y crecimiento exponencial, respectivamente. Donde d es el nivel de desplazamiento en mm. En la Figura 5.6 se presenta la curva EP y ajuste de las ecuaciones.

Tabla 5.9 Ecuaciones ajustadas para la compresión de la espuma.

Ecuación	Rango	Número de ecuación
$f_{c-e}(d) = 0.1398d$	(0 mm - 12.19 mm)	5.2
$f_{c-e}(d) = 0.0231 e^{(0.3527d)}$	(12.19 mm - 16.5 mm)	5.3

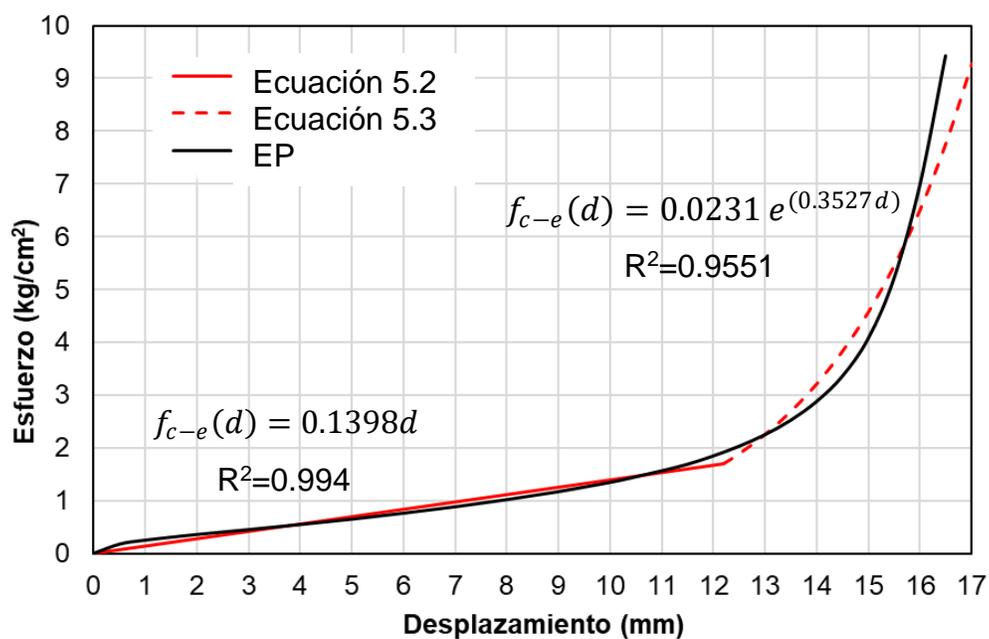


Figura 5.6 Curva promedio y ajuste lineal de la espuma de poliuretano a compresión.

Las ecuaciones fueron seleccionadas mediante un proceso iterativo mediante el cual se minimiza el error con respecto a los datos experimentales. Para ello se seleccionó como variable el límite de desplazamiento de la zona elástica lineal. Para el cálculo del error (E_i) se empleó la ecuación 5.4 que relaciona los datos obtenidos analítica y experimentalmente. El subíndice i se refiere a cualquiera de los datos con los que se cuente. El error global se calcula como el promedio de error para todos los datos obtenidos. En la Figura 5.7 se presenta la curva de error global de todos los datos en función del desplazamiento. Dicho error se minimiza para un desplazamiento igual a 12 mm. En la Tabla 5.10 se comparan los datos experimentales ($f_{c-e-EXP}$) con los esfuerzos a compresión analíticos (f_{c-e}). Se observa que el error promedio es de 11.86 %. La resistencia a compresión de la espuma de poliuretano se define como el límite lineal, igual a 1.85 kg/cm².

$$E_i = \left| \frac{(Analítico)_i}{(Experimental)_i} - 1 \right| \quad 5.4$$

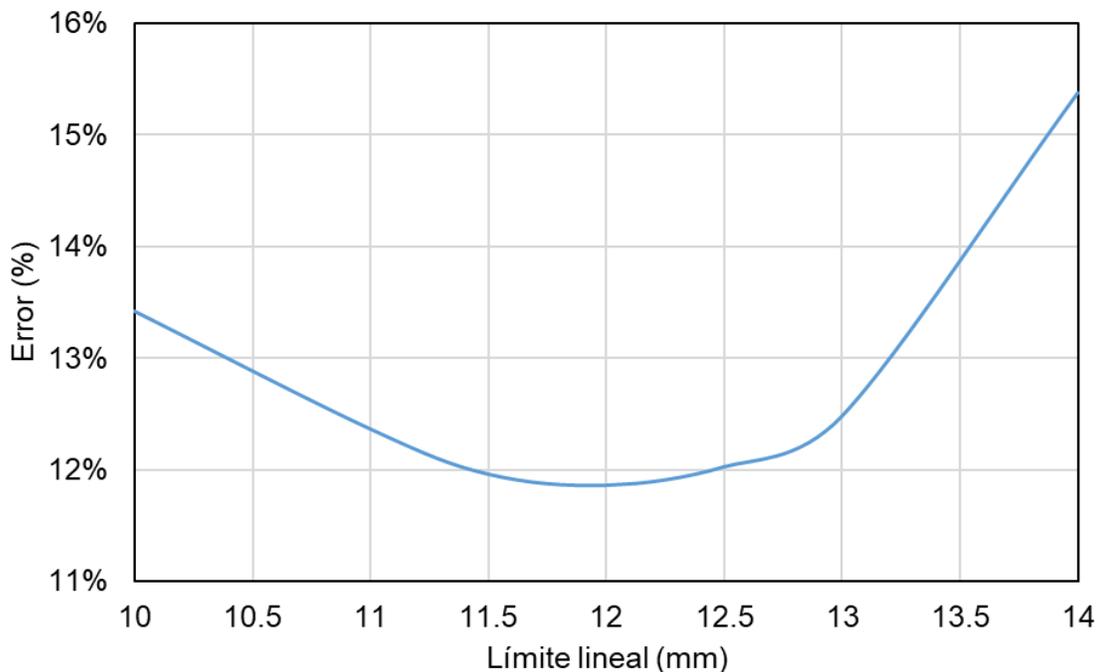


Figura 5.7 Minimización del error global de las ecuaciones para la compresión de la espuma de poliuretano.

Tabla 5.10 Esfuerzos de compresión experimentales y analíticos de la espuma de poliuretano.

Dato	Desplazamiento (mm)	f_{c-eEXP} (kg/cm ²)	f_{c-e} (kg/cm ²)	Error (%)
1	0.5	0.18	0.07	60.28
2	1.0	0.25	0.14	44.25
3	2.0	0.36	0.28	22.00
4	3.0	0.45	0.42	6.99
5	4.0	0.55	0.56	2.21
6	5.0	0.65	0.70	7.72
7	6.0	0.76	0.84	10.08
8	7.0	0.88	0.98	10.78
9	8.0	1.02	1.12	9.80
10	9.0	1.17	1.26	7.57
11	10.0	1.35	1.40	3.86
12	10.5	1.45	1.47	1.14
13	11.0	1.57	1.54	1.74
14	11.5	1.69	1.61	4.76
15	12.0	1.85	1.68	9.19
16	12.5	2.03	1.90	6.58
17	13.0	2.25	2.26	0.65
18	13.5	2.52	2.70	7.02
19	14.0	2.88	3.22	11.93
20	14.5	3.36	3.84	14.46
21	15.0	4.07	4.58	12.64
22	15.5	5.21	5.47	4.95
23	16.0	6.97	6.52	6.48
24	16.5	9.43	7.78	17.51
			Promedio	11.86

De acuerdo con las relaciones esfuerzo a compresión (f_{c-e}) – desplazamiento (Δ) de la espuma de poliuretano es importante tener en cuenta el nivel de desplazamientos que se generan en el marco estructural; por consiguiente, en la espuma de poliuretano. Es recomendable que el desplazamiento de la espuma no sea mayor que el límite lineal (12 mm), debido a que a mayores desplazamientos los esfuerzos que se transfieren al muro incrementan exponencialmente. Esto podría generar una falla en el plano del muro o modificar la rigidez de la estructura. En todo caso, en el diseño de muros no estructurales se verificará la transferencia de cargas con la curva esfuerzo – desplazamiento de la espuma de poliuretano presentada en la Figura 5.6 con ayuda

de las ecuaciones 5.2 y 5.3. Se recomienda realizar ensayos con distintos espesores de la junta de espuma de poliuretano.

La relación esfuerzo cortante (f_{cd-e}) – desplazamiento (Δ) entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA obtenido experimentalmente se presenta en la Figura 5.8. El comportamiento de la espuma se divide en tres partes. Primero una zona elástica lineal, posteriormente una zona no lineal hasta el punto de esfuerzo máximo y una pérdida de esfuerzos hasta la falla de la espuma de poliuretano. Se realiza una curva promedio para cada tipo de espuma de poliuretano (MC-E1 y MC-E2). Para la curva MC-E1 y MC-E2 se definen desplazamientos conocidos y se promedian los esfuerzos asociados a dicho desplazamiento. Dichas curvas se realizaron hasta la carga máxima.

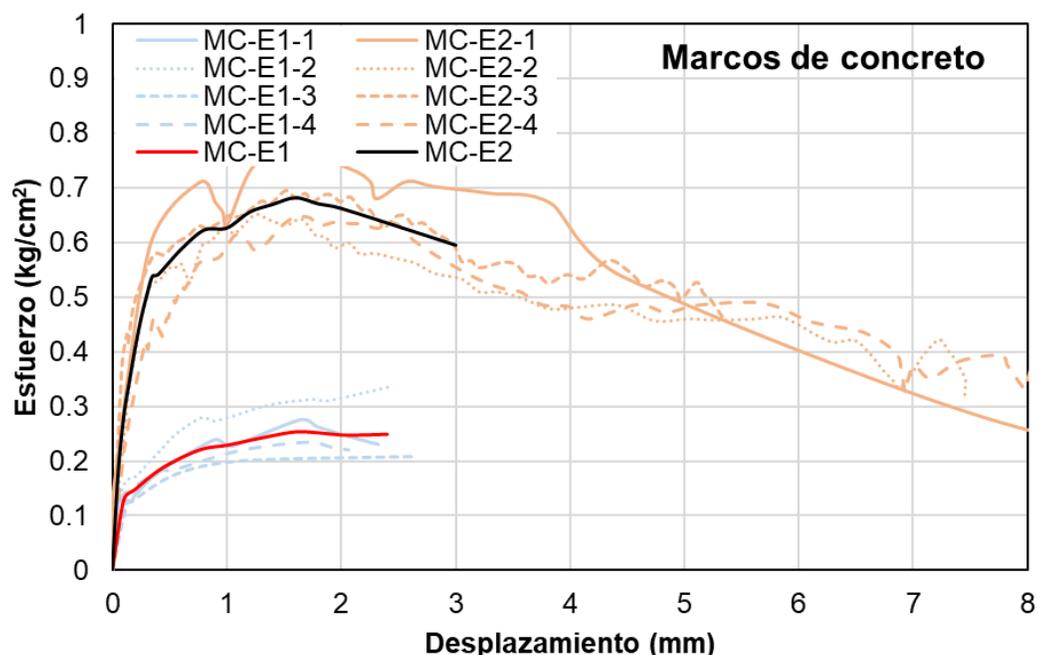


Figura 5.8 Curva promedio para las espumas de poliuretano en marcos de concreto.

La relación esfuerzo cortante (f_{cd-e}) – desplazamiento (Δ) entre el acero, la espuma de poliuretano y el CCA obtenida experimentalmente se presenta en la Figura 5.9. El comportamiento de la espuma se divide en tres partes. Primero una zona elástica lineal, posteriormente una zona no lineal hasta el punto de esfuerzo máximo y una pérdida de esfuerzos hasta la falla de la espuma de poliuretano. Se determinó una

curva promedio para cada tipo de espuma de poliuretano (MA-E1 y MA-E2). Para la curva MA-E1 y MA-E2 se definieron desplazamientos conocidos y se promedian los esfuerzos asociados a dicho desplazamiento. Dichas curvas se realizaron hasta la carga máxima.

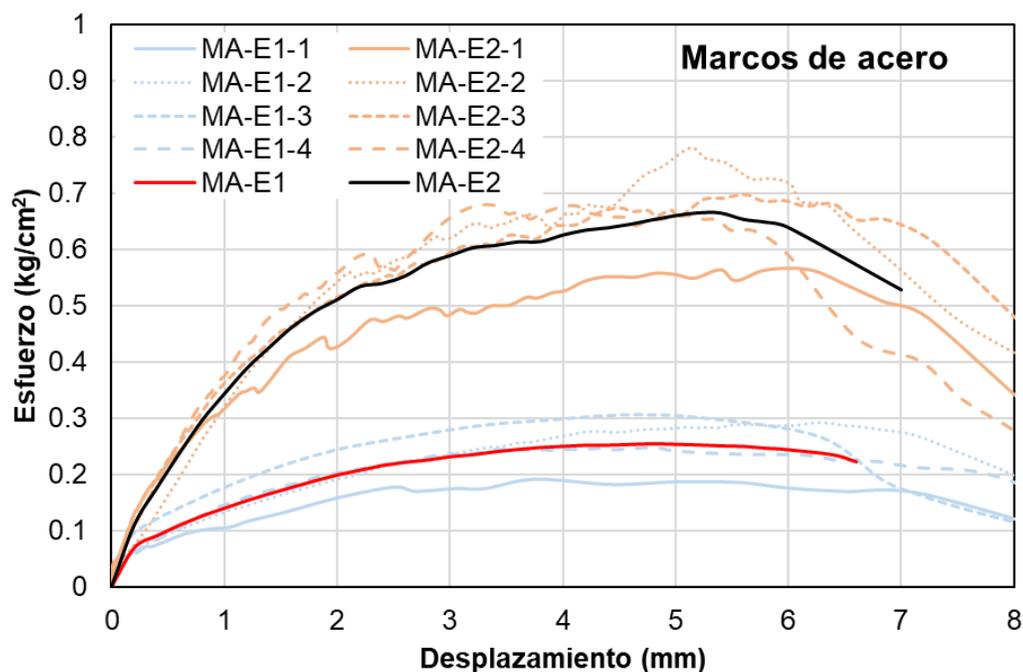


Figura 5.9 Curvas promedio para las espumas de poliuretano en marcos de acero.

Se ajustaron modelos bilineales mediante el método de mínimos cuadrados para cada tipo de espécimen. En la Figura 5.10 se presenta las curvas promedio en MC y el ajuste bilineal. El esfuerzo cortante de la espuma de poliuretano (f_{cd-e}) está definido para MC-E1 por las ecuaciones 5.5 y 5.6; mientras que para MC-E2 por las ecuaciones 5.7 y 5.8. En la Figura 5.11 se presenta las curvas promedio en MA y el ajuste bilineal. El esfuerzo cortante de la espuma de poliuretano está definido para MA-E1 por las ecuaciones 5.9 y la 5.10; mientras que para MA-E2 por las ecuaciones 5.11 y la 5.12. En todos los casos d es el desplazamiento en mm. Las ecuaciones fueron seleccionados con un proceso interactivo mediante el cual se minimiza el error con respecto a los datos experimentales. Para ello se seleccionó como variable el límite de desplazamiento de la zona elástica lineal. El cálculo del error para cada caso se presenta en el APÉNDICE K.

Tabla 5.11 Ecuaciones ajustadas para la compresión de la espuma.

Ecuación	Rango	Número de ecuación
$f_{cd-e}(d) = 1.2907d$	(0 mm - 0.12mm)	5.5
$f_{cd-e}(d) = 0.0791d + 0.1423$	(0.12 mm - 1.6 mm)	5.6
$f_{cd-e}(d) = 2.2742d$	(0 mm - 0.21 mm)	5.7
$f_{cd-e}(d) = 0.1656d + 0.4496$	(0.21 mm - 1.6 mm)	5.8
$f_{cd-e}(d) = 0.2060d$	(0 mm - 0.69 mm)	5.9
$f_{cd-e}(d) = 0.033d + 0.1189$	(0.69 mm - 4.80 mm)	5.10
$f_{cd-e}(d) = 0.3516d$	(0 mm - 1.30 mm)	5.11
$f_{cd-e}(d) = 0.0608d + 0.3778$	(1.30 mm - 5.20 mm)	5.12

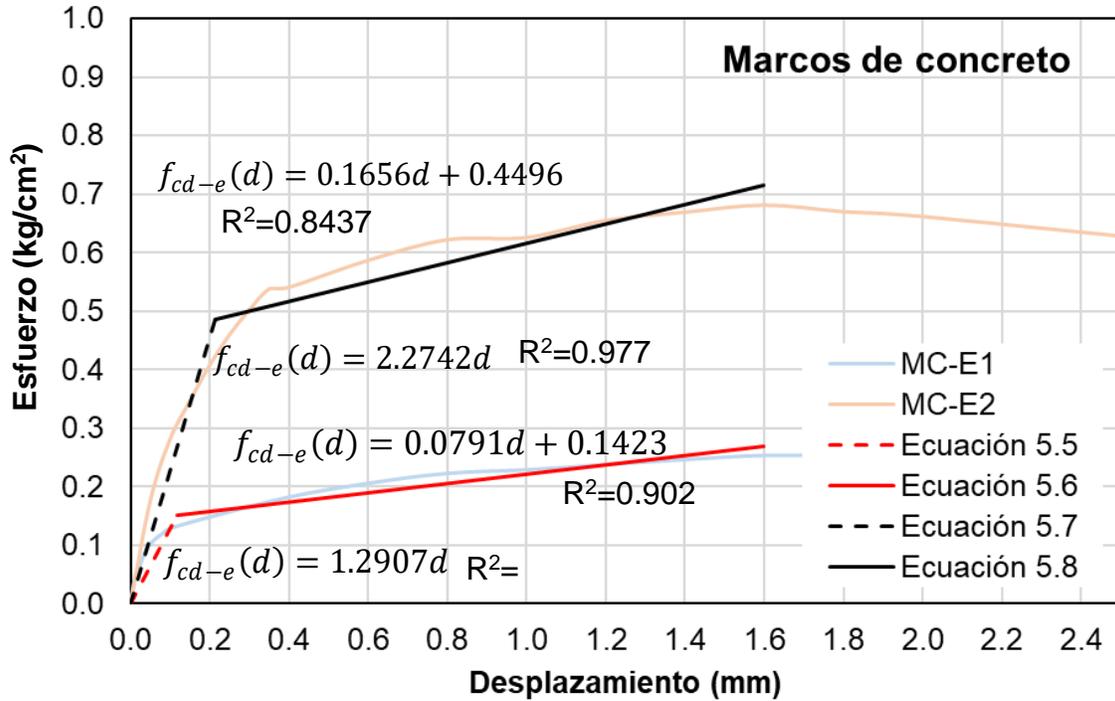


Figura 5.10 Ajuste en marcos de concreto.

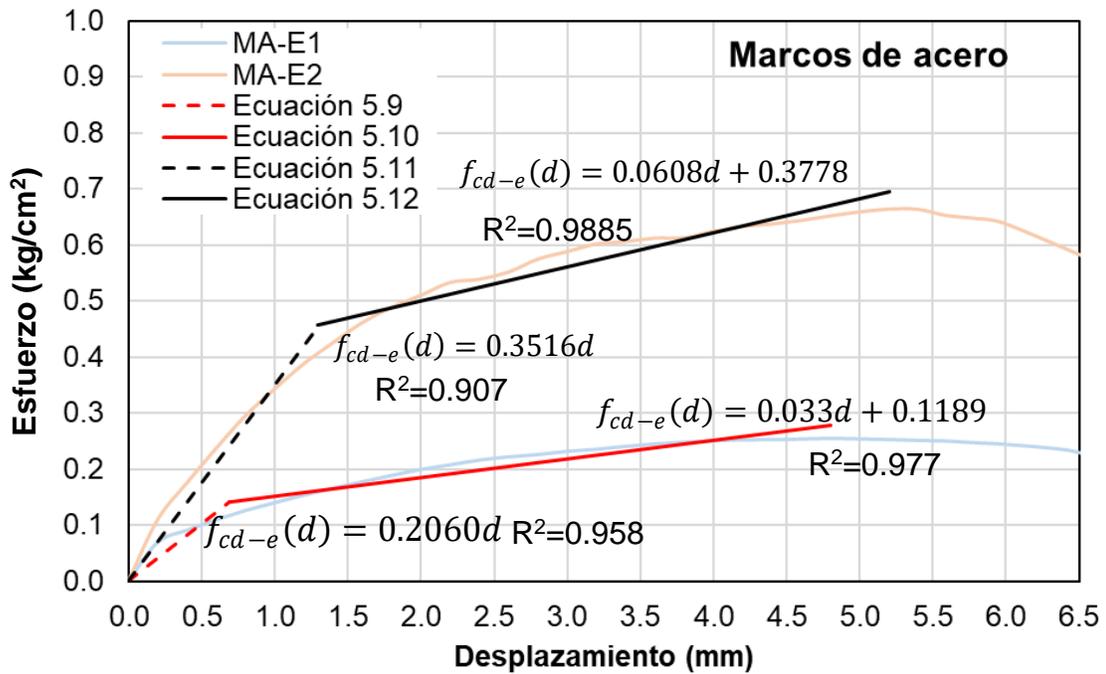


Figura 5.11 Ajuste en marcos de acero.

En la Tabla 5.12 se presenta el esfuerzo cortante de la espuma de poliuretano de la zona elástica lineal ($f_{cd-e\ lin}$), el desplazamiento asociado, la resistencia cortante de la espuma de poliuretano (f_{cd-adh}), el desplazamiento asociado, la rigidez de la zona lineal y la relación de la resistencia cortante con el esfuerzo cortante de la zona elástica lineal. Se observa que independientemente del tipo de marco en el que se coloque la espuma la resistencia a cortante tiende a ser la misma para una misma espuma. El esfuerzo cortante de la zona elástica lineal es 0.15 kg/cm² y 0.47 kg/cm², para la E1 y E2, respectivamente. La espuma de poliuretano en la zona lineal presenta una mayor rigidez en MC que en MA. La relación de la rigidez lineal de MA con MC es de 0.16. La resistencia cortante es 0.27 kg/cm² y 0.70 kg/cm², para la E1 y E2, respectivamente. Dichas cargas se presentan con mayores desplazamientos en MA que en MC. Congruente con la rigidez de la espuma en la zona lineal. Dicha diferencia de rigidez se asocia a la adherencia de la espuma de poliuretano con los marcos. Los MC presentan una mayor rugosidad que los MA. La falta de rugosidad en MA propicia que se generen desplazamientos relativos y por consiguiente una menor rigidez. En todos los casos la E1 presenta una menor resistencia a cortante en comparación con la E2. Para el diseño de los muros no estructurales es importante tener en cuenta la resistencia a cortante para la estabilidad del muro fuera del plano. La resistencia cortante deberá ser mayor que las cargas actuantes. Se recomienda que las cargas actuantes no excedan la zona lineal. Adicionalmente la resistencia cortante podría generar cargas en el plano. Es importante tener en cuenta que una mayor resistencia cortante para garantizar la estabilidad del muro podría ocasionar una falla en el plano. Se recomienda realizar ensayos con distintos espesores de la junta de espuma de poliuretano.

Tabla 5.12 Comparación de las resistencias a cortante (f_{cd-adh}) para los especímenes.

Espécimen	$f_{cd-e\ lin}$ (kg/cm ²)	Desp. (mm)	f_{cd-adh} (kg/cm ²)	Desp. (mm)	Rigidez lineal (kg/cm ²)	$\frac{f_{cd-adh}}{f_{cd-e\ lin}}$
MC – E1	0.15	0.12	0.27	1.60	1.29	1.77
MA – E1	0.14	0.69	0.28	4.80	0.20	1.95
MC – E2	0.48	0.21	0.71	1.60	2.27	1.47
MA – E2	0.45	1.29	0.69	5.20	0.35	1.53
MA – E1 / MC – E1	0.94	5.87	1.03	3.00	0.16	-
MA – E2 / MC – E2	0.94	6.05	0.97	3.25	0.15	-

5.3 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis del esfuerzo a compresión (f_{c-e}) y del esfuerzo cortante de la espuma de poliuretano (f_{cd-e}) generados en el muro. En la Tabla 5.13 se presentan los esfuerzos a compresión, los esfuerzos cortantes y las distorsiones (δ) en muros para diferentes desplazamientos horizontales de entrepiso (Δ) en el marco estructural. En dicha tabla se consideraron marcos de concreto (MC) y muros con alturas de 200 cm a 500 cm. Los esfuerzos a compresión se calcularon con las ecuaciones 5.2 y 5.3. Los esfuerzos cortantes se calcularon con las ecuaciones 5.5 a la 5.8 de acuerdo con la espuma de poliuretano (E1 o E2). Se observa que los esfuerzos cortantes contribuyen hasta un desplazamiento de 1.60 mm. Posteriormente, solo se tiene la contribución de los esfuerzos a compresión. A dicho desplazamiento se alcanza la resistencia cortante de la espuma de poliuretano; por lo tanto, la espuma de poliuretano en la junta horizontal superior se despega y no transfiere esfuerzos al muro estructural. Por otro lado, la falla por cortante de la espuma de poliuretano se presenta para distorsiones menores del 0.2%. Requisito de limitación de daños ante sismos frecuentes establecido en las NTCS. Es decir, después de sismos frecuentes se podrían observar grietas horizontales entre la trabe del marco estructural y el muro. Para la distorsión de limitación de daños ante sismos frecuentes, no se alcanza el límite de aplastamiento de la espuma de poliuretano.

Tabla 5.13 Esfuerzos en la espuma en marcos de concreto (MC).

Δ (mm)	f_{c-e} (kg/cm ²)	f_{cd-e} (kg/cm ²)		δ (%)			
		MC		h			
		E1	E2	200	300	400	500
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.10	0.01	0.13	0.23	0.0050	0.003	0.003	0.002
0.20	0.03	0.16	0.45	0.010	0.007	0.005	0.004
0.40	0.06	0.17	0.52	0.020	0.013	0.010	0.008
0.60	0.08	0.19	0.55	0.030	0.020	0.015	0.012
0.80	0.11	0.21	0.58	0.040	0.026	0.020	0.016
1.00	0.14	0.22	0.62	0.050	0.030	0.025	0.020
1.20	0.17	0.24	0.65	0.060	0.040	0.030	0.024
1.40	0.20	0.25	0.68	0.070	0.047	0.030	0.028
1.60	0.22	0.27	0.71	0.080	0.053	0.040	0.032
2.00	0.28	-	-	0.100	0.067	0.050	0.040
3.00	0.42	-	-	0.150	0.100	0.075	0.060
4.00	0.56	-	-	0.200	0.133	0.100	0.080
5.00	0.70	-	-	0.250	0.167	0.125	0.100
6.00	0.84	-	-	0.300	0.200	0.150	0.120
7.00	0.98	-	-	0.350	0.233	0.175	0.140
8.00	1.12	-	-	0.400	0.267	0.200	0.160
9.00	1.26	-	-	0.450	0.300	0.225	0.180
10.00	1.40	-	-	0.500	0.333	0.250	0.200
11.00	1.54	-	-	0.550	0.367	0.275	0.220
12.00	1.68	-	-	0.600	0.400	0.300	0.240
13.00	2.26	-	-	0.650	0.433	0.325	0.260
14.00	3.22	-	-	0.700	0.467	0.350	0.280
15.00	4.58	-	-	0.750	0.500	0.375	0.300
16.00	6.52	-	-	0.800	0.533	0.400	0.320
17.00	9.28	-	-	0.850	0.567	0.425	0.340
18.00	13.21	-	-	0.900	0.600	0.450	0.360
19.00	18.79	-	-	0.950	0.633	0.475	0.380
20.00	26.74	-	-	1.000	0.667	0.500	0.400
Las secciones marcadas con color representan lo siguiente:							
Color	Comentario						
	Falla de la espuma de poliuretano horizontal						
	Aplastamiento máximo recomendado de la espuma de poliuretano vertical						
	Requisito de limitación de daños ante sismos frecuentes cuando existen elementos no estructurales que puedan dañarse (NTCS)						

En la Tabla 5.14 se presentan los esfuerzo a compresión (f_{c-e}), el esfuerzo cortante (f_{cd-e}) y las distorsiones (δ) en muros para diferentes desplazamientos horizontales de entrepiso (Δ) en el marco estructural. En dicha tabla se consideraron marcos de acero (MA) y muros con alturas de 200 cm a 500 cm. Los esfuerzos a compresión se calcularon con las ecuaciones 5.2 y 5.3. Los esfuerzos cortantes se calcularon con las ecuaciones 5.9 a la 5.12 de acuerdo con la espuma de poliuretano (E1 o E2). Se observa una contribución de los esfuerzos a compresión y los esfuerzos cortantes hasta un desplazamiento de 4.80 mm. A dicho desplazamiento se alcanza la resistencia cortante de la espuma de poliuretano; por lo tanto, la espuma de poliuretano en la junta horizontal superior se despega y no transfiere esfuerzos al muro estructural. Por otro lado, la falla por cortante de la espuma de poliuretano se presenta para distorsiones menores del 0.2% para muros con alturas mayores a 300 cm. Requisito de limitación de daños ante sismos frecuentes establecido en las NTCS. Es decir, después de sismos frecuentes se podrían observar grietas horizontales entre la trabe del marco estructural y el muro. Para la distorsión de limitación de daños ante sismos frecuentes, no se alcanza el límite de aplastamiento de la espuma de poliuretano.

Tabla 5.14 Esfuerzos en la espuma en marcos de acero (MA).

Δ (mm)	f_{c-e} (kg/cm ²)	f_{cd-e} (kg/cm ²)		δ (%)			
		MA		h			
		E1	E2	200	300	400	500
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.60	0.08	0.12	0.21	0.030	0.020	0.015	0.012
1.20	0.17	0.16	0.42	0.060	0.040	0.030	0.024
1.80	0.25	0.18	0.49	0.090	0.060	0.045	0.036
2.40	0.34	0.20	0.52	0.120	0.080	0.060	0.048
3.00	0.42	0.22	0.56	0.150	0.100	0.075	0.060
3.60	0.50	0.24	0.60	0.180	0.120	0.090	0.072
4.00	0.56	0.25	0.62	0.200	0.133	0.100	0.080
4.20	0.59	0.26	0.63	0.210	0.140	0.105	0.084
4.40	0.62	0.26	0.65	0.220	0.147	0.110	0.088
4.60	0.64	0.27	0.66	0.230	0.153	0.115	0.092
4.80	0.67	0.28	0.67	0.240	0.160	0.120	0.096
5.00	0.70	-	-	0.250	0.167	0.125	0.100
6.00	0.84	-	-	0.300	0.200	0.150	0.120
7.00	0.98	-	-	0.350	0.233	0.175	0.140
8.00	1.12	-	-	0.400	0.267	0.200	0.160
9.00	1.26	-	-	0.450	0.300	0.225	0.180
10.00	1.40	-	-	0.500	0.333	0.250	0.200
11.00	1.54	-	-	0.550	0.367	0.275	0.220
12.00	1.68	-	-	0.600	0.400	0.300	0.240
13.00	2.26	-	-	0.650	0.433	0.325	0.260
14.00	3.22	-	-	0.700	0.467	0.350	0.280
15.00	4.58	-	-	0.750	0.500	0.375	0.300
16.00	6.52	-	-	0.800	0.533	0.400	0.320
17.00	9.28	-	-	0.850	0.567	0.425	0.340
18.00	13.21	-	-	0.900	0.600	0.450	0.360
19.00	18.79	-	-	0.950	0.633	0.475	0.380
20.00	26.74	-	-	1.000	0.667	0.500	0.400
Las secciones marcadas con color representan lo siguiente:							
Color	Comentario						
	Falla de la espuma de poliuretano horizontal						
	Aplastamiento máximo recomendado de la espuma de poliuretano vertical						
	Requisito de limitación de daños ante sismos frecuentes cuando existen elementos no estructurales que puedan dañarse (NTCS)						

Es importante hacer notar que para el cálculo de los esfuerzos cortantes (f_{cd-e}) transmitidos por la espuma de poliuretano ya no contribuyen a 1.6 mm y 4.8 mm para MC y MA, respectivamente. Sin embargo, esta es una consideración no conservadora. Debido a que con las curvas obtenidas experimentalmente (Figura 5.8 y Figura 5.9) la transferencia de esfuerzos continua hasta un desplazamiento de 8 mm. Si bien, los esfuerzos son menores, la superposición con los esfuerzos transmitidos por compresión generará cargas mayores a las consideradas en este trabajo. Es importante para futuros trabajos tener en cuenta la parte descendente de los esfuerzos por cortante.

En la Tabla 5.15 se presentan las fuerzas laterales asociadas a los esfuerzos de compresión (F_{c-e}) y las asociadas a los esfuerzos de cortante por adherencia (F_{cd-e}), la fuerza lateral total que actúa sobre el muro no estructural (V_a) y la distorsión. Se consideró un muro no estructural de CCA clase 4 de 400 cm de altura, 600 cm de longitud y 10 cm de espesor. El muro no estructural se encuentra dentro de un marco de concreto reforzado con junta de espuma de poliuretano de 2 cm. Se consideraron dos diferentes tipos de espumas de poliuretano. Las fuerzas laterales asociadas a los esfuerzos de compresión se calcularon asumiendo una distribución lineal de esfuerzos (Figura 3.24) y los esfuerzos de compresión obtenidos de la Tabla 5.13. Las fuerzas laterales asociadas a los esfuerzos cortantes se calcularon asumiendo una distribución constante de esfuerzos (Figura 3.24) y los esfuerzos cortantes de la Tabla 5.13. La fuerza lateral total se calcula como la suma de F_{c-e} y F_{cd-e} .

Tabla 5.15 Cargas actuantes en el muro.

Δ (mm)	F_{c-e} (kg)	F_{cd-e} (kg)		V_a (kg)		δ (%)
		MC		MC		
		E1	E2	E1	E2	
0.00	0	0	0	0	0	0.000
0.10	28	774	1365	802	1392	0.003
0.20	56	949	2729	1005	2785	0.005
0.40	112	1044	3095	1155	3207	0.010
0.60	168	1139	3294	1306	3462	0.015
0.80	224	1233	3492	1457	3716	0.020
1.00	280	1328	3691	1608	3971	0.025
1.20	336	1423	3890	1759	4225	0.030
1.40	391	1518	4089	1910	4480	0.035
1.60	447	1613	4287	2061	4735	0.040
2.00	559			559	559	0.050
3.00	839			839	839	0.075
4.00	1118			1118	1118	0.100
5.00	1398			1398	1398	0.125
6.00	1678			1678	1678	0.150
7.00	1957			1957	1957	0.175
8.00	2237			2237	2237	0.200
9.00	2516			2516	2516	0.225
10.00	2796			2796	2796	0.250
11.00	3076			3076	3076	0.275
12.00	3355			3355	3355	0.300
13.00	3689			3689	3689	0.325
14.00	4201			4201	4201	0.350
15.00	4954			4954	4954	0.375
16.00	6022			6022	6022	0.400
17.00	7511			7511	7511	0.425
18.00	9575			9575	9575	0.450
19.00	12413			12413	12413	0.475
20.00	16315			16315	16315	0.500
Las secciones marcadas con color representan lo siguiente:						
Color	Comentario					
	Falla de la espuma de poliuretano horizontal					
	Aplastamiento máximo recomendado de la espuma de poliuretano vertical					
	Requisito de limitación de daños ante sismos frecuentes cuando existen elementos no estructurales que puedan dañarse (NTCS)					
	Falla por cortante del muro (ACI 530)					
	Falla por cortante del muro (Fernández, 2019)					

En la Tabla 5.15 se observa que las fuerzas laterales asociadas a los esfuerzos de compresión (F_{c-e}) y las asociadas a los esfuerzos de cortante por adherencia (F_{cd-e}) actúan simultáneamente en el muro no estructural hasta un desplazamiento de 1.60 mm. La contribución de las fuerzas asociadas al cortante por adherencia de la espuma de poliuretano es mayor que las fuerzas asociadas a la compresión de la espuma de poliuretano. Posterior a dicho desplazamiento, la espuma de poliuretano en la junta horizontal superior se despega y no transfiere fuerzas al muro estructural. La falla por cortante de la junta de espuma de poliuretano se presenta para una distorsión de 0.04 %, menor que la recomendada en las NTCS para limitación de daños ante sismos frecuentes (0.20 %). Es decir, después de sismos frecuentes se podrían observar grietas horizontales entre la trabe del marco estructural y el muro. Para la distorsión de limitación de daños ante sismos frecuentes, no se alcanza el límite de aplastamiento de la espuma de poliuretano. El aplastamiento límite recomendado en este trabajo (12 mm) se presenta a una distorsión de 0.30 %.

Por otro lado, se determinó la fuerza lateral resistente por cortante del muro (V_{nCCA}) estudiado con las ecuaciones 2.1 y 2.2. Las resistencias obtenidas fueron de 9,559 kg y 17,574 kg, respectivamente. Con base en la Tabla 5.15, la falla por cortante del muro de acuerdo con la ecuación 2.1 se presentaría a un desplazamiento de 18 mm (0.45 de distorsión). Dicha distorsión es mayor que la distorsión de limitación de daños ante sismos frecuentes (0.20 %) y menor que la distorsión de seguridad contra colapso (1.50 % para marcos de baja ductilidad) establecidas en las NTCS. De acuerdo con la ecuación 2.2, el muro no estructural podría entrar en contacto directo con el marco estructural (0.50 % de distorsión). Dicha distorsión es mayor que la distorsión de limitación de daños ante sismos frecuentes (0.20 %) y menor que la distorsión de prevención de seguridad contra colapso (1.5% para marcos de baja ductilidad) establecidas en las NTCS.

En la Tabla 5.16 se presentan la fuerza lateral resistente por cortante (V_{nCCA}) de los muros y las correspondientes distorsiones a las cuales se presentaría la falla por cortante. Se consideraron muros con distintas alturas y longitudes. La fuerza lateral

resistente por cortante se determinó con las ecuaciones 2.1 y 2.2. No se consideran factores de carga, ni de reducción de la resistencia.

Tabla 5.16 Distorsiones asociadas a la falla por cortante de muros no estructurales de CCA-4.

h (cm)	L (cm)	V_{nCCA} ACI 530 (kg)	V_{nCCA} Fernández 2019 (kg)	δ ACI 530 (%)	δ Fernández 2019 (%)
300	200	3186	5248	0.47	0.56
	300	4779	8421	0.54	0.62
	400	6373	11594	0.58	0.66
	500	7966	14767	0.61	0.67
	600	9559	17940	0.67	0.67
400	200	3186	4882	0.29	0.37
	300	4779	8055	0.37	0.43
	400	6373	11228	0.41	0.47
	500	7966	14401	0.43	0.49
	600	9559	17574	0.45	0.50
500	200	3186	4515	0.18	0.26
	300	4779	7688	0.27	0.32
	400	6373	10861	0.30	0.35
	500	7966	14034	0.32	0.37
	600	9559	17207	0.34	0.39
Las secciones marcadas con color representan lo siguiente:					
Color	Comentario				
	distorsión menor al requisito de limitación de daños ante sismos frecuentes cuando existen elementos no estructurales que puedan dañarse (NTCS)				
	La falla del muro por cortante se presenta al entrar en contacto directo con el marco estructural				

Con base en los resultados obtenidos a partir de la ecuación 2.1, en la Tabla 5.16 se observa que, para el muro de 500 cm de altura y 200 cm de longitud, la resistencia por cortante se alcanza a una distorsión menor que la de limitación de daños ante sismos frecuentes (0.20 %). Es decir, en dicho muro se podrían observar grietas diagonales después de sismos frecuentes. Por otro lado, los demás muros para sismos frecuentes no presentarán agrietamientos diagonales. Sin embargo, para una distorsión asociada

a la seguridad contra colapso (1.50 % para marcos de baja ductilidad), se podrían observar agrietamientos diagonales por cortante en todos los muros estudiados.

Por otro lado, con base en los resultados obtenidos con la ecuación 2.2 propuesta por Fernández (2019), ningún muro presentará agrietamientos diagonales para una distorsión asociada con limitación de daños antes sismos frecuentes. Sin embargo, los muros de 300 cm x 500 cm, 300 cm x 600 cm y 400 cm x 600 cm (altura x longitud) entrarán en contacto con el marco estructural durante sismos severos. Adicionalmente, se observa que la resistencia por cortante se alcanza a distorsiones menores que la asociada a la seguridad contra el colapso (1.50 % para marcos de baja ductilidad). Es decir, para sismos severos se podrían observar grietas diagonales en los muros no estructurales.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron las fuerzas de transferencia entre marcos y muros no estructurales de CCA a través de la espuma de poliuretano. Por tal motivo, se realizaron ensayos experimentales para determinar las propiedades del CCA, la relación esfuerzo a compresión – desplazamiento de la espuma de poliuretano, la relación esfuerzo cortante – desplazamiento entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA y la relación esfuerzo cortante – desplazamiento entre el acero, la espuma de poliuretano y el CCA. Con base en los resultados experimentales y numéricos obtenidos se formulan las siguientes conclusiones:

1. El CCA estudiado en esta investigación se clasifica como clase 4 de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM 1693. La densidad relativa (ρ_{CCA}) depende de la relación del área superficial con el volumen. A mayor relación área superficial con el volumen menor ρ_{CCA} . La resistencia a compresión axial (f_{CCA}) y el módulo de elasticidad del CCA (E_{CCA}) dependen del contenido de humedad (H). A mayor H menor f_{CCA} y mayor E_{CCA} . Lo observado con el E_{CCA} no es congruente con la literatura, por lo que, se recomienda realizar más estudios al respecto.
2. Las ecuaciones establecidas en el ACI 530 sobrestiman la resistencia a tensión por compresión (f_{tCCA}), la resistencia a tensión por flexión (f_{rCCA}) y el módulo de elasticidad (E_{CCA}) del CCA estudiado en este trabajo.
3. La resistencia a tensión de la mampostería a base de bloques de CCA clase 4 está gobernada por la resistencia a tensión de los bloques. Sin embargo, la resistencia a tensión por compresión con junta de pared delgada ($f_{tCCA-adh}$) y la resistencia a tensión por flexión con junta de mortero de pared delgada ($f_{rCCA-adh}$) es menor a la resistencia a tensión por compresión (f_{tCCA}) y la resistencia a tensión por flexión (f_{rCCA}), respectivamente. Esto está asociado con la dirección de crecimiento de la mezcla del CCA. En este trabajo la resistencia a tensión por compresión con junta de mortero de pared delgada

fue, en promedio, 81% y 61% de la resistencia a tensión por compresión de los bloques para la planta 1 y 2, respectivamente. La resistencia a tensión por flexión con mortero de pared delgada fue, en promedio, 82% y 55% de la resistencia a tensión por flexión para la planta 1 y 2, respectivamente. La planta 1 cuenta con un mejor proceso de crecimiento de la mezcla en comparación a la planta 2. Se recomienda realizar ensayos de CCA de distintas clases con junta de mortero de pared delgada, así como ensayos de paneles de mampostería.

4. El comportamiento a compresión de la espuma de poliuretano se divide en dos partes, una zona lineal hasta un desplazamiento de 12 mm y posterior un crecimiento exponencial de cargas. Por tal motivo, la espuma de poliuretano empleada en las juntas de los muros no estructurales transfiere cargas en el plano. Por ello, para el diseño de los muros es necesario verificar el nivel de deformación de la espuma y garantizar que el muro no estructural resista las cargas en el plano. Se recomienda realizar más ensayos a compresión de la espuma de poliuretano con distintos espesores.
5. El comportamiento a cortante de la espuma de poliuretano depende del tipo de espuma y el tipo de marco en el que es empleado. En general, el comportamiento se divide en tres partes. Primero una zona elástica lineal, posteriormente una zona no lineal hasta el punto de esfuerzo máximo y una pérdida de esfuerzos hasta la falla de la espuma de poliuretano. La resistencia cortante es mayor para la E2 que en la E1. De igual manera, es mayor en marcos de concreto que en marcos de acero. A mayor resistencia a cortante mayor resistencia a cortante fuera del plano y mayor transferencia de cargas en el plano. Se recomienda realizar más ensayos a compresión de la espuma de poliuretano con distintos espesores.
6. Con base en los resultados experimentales se propone un modelo bilineal para la relación esfuerzo a compresión – desplazamiento de la espuma de poliuretano, la relación esfuerzo cortante – desplazamiento entre el concreto, la espuma de poliuretano y el CCA y la relación esfuerzo cortante –

desplazamiento entre el acero, la espuma de poliuretano y el CCA. Los modelos propuestos aproximan de manera satisfactoria los resultados experimentales.

7. La junta de espuma de poliuretano entre un marco estructural y un muro no estructural ocasiona que existan transferencias de esfuerzos. Esto podría ocasionar un aumento en la rigidez lateral modificando el comportamiento de la estructura. Eventualmente el muro de mampostería fallaría. En muros no estructurales de mampostería de CCA se generan principalmente dos tipos de esfuerzos, los primeros asociados a la compresión de la espuma de poliuretano en la junta vertical y los segundos asociados al cortante por adherencia de la espuma de poliuretano en la junta horizontal superior.
8. Los esfuerzos cortantes contribuyen hasta un desplazamiento de 1.60 mm y 4.80 mm, para en MC y MA, respectivamente. Posteriormente, solo se tiene la contribución de los esfuerzos a compresión (f_{c-e}). Por lo general, la falla de la espuma de poliuretano en la junta superior se presenta a distorsiones menores de la condición de limitación de daños ante sismos frecuentes (0.20 %). Es decir, después de sismos frecuente se podrían observar grietas horizontales entre la trabe del marco estructural y el muro no estructural.
9. Se determinaron las distorsiones asociados a la falla por cortante en el plano para distintos muros. Por lo general, la resistencia por cortante se alcanza a distorsiones menores que la condición de prevención contra el colapso (1.50 % para marcos de baja ductilidad). Es decir, después de sismos severos se podrían observar grietas diagonales en los muros no estructurales.

CAPÍTULO 7: REFERENCIAS

1. AirCrete (2019). Nuestra historia. Disponible en: <https://aircrete.mx/nosotros/>
Recuperado el 02 de marzo de 2020.
2. Alcocer, R. (2017). Ecuaciones de diseño por cortante para muros confinados de CCA. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
3. Argudo J. F. (2003). Evaluation and Synthesis of Experimental Data for Autoclaved Aerated Concrete. Tesis de maestría. The University of Texas at Austin, USA.
4. ASTM, C. (2011). 1693. Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC). ASTM International, West Conshohocken, PA, 7.
5. ASTM, C. (2001). 1006. Standard Specification for Splitting Tensile Strength of Masonry Units, ASTM International, West Conshohocken, PA.
6. Casolo S. y Milani G. (2010). A simplified homogenization-discrete element model for the non-linear static analysis of masonry walls out-of-plane loaded. "Engineering Structures", 32(8).
7. Cecci A., Milani G., y Tralli A. (2005). Validation of analytical multiparameter homogenization models for out-of-plane loaded masonry walls by means of the finite element method. "Journal of Engineering Mechanics", ASCE, 131(2).
8. Drysdale R. G. y Essawy A.S. (1988). Out-of-plane bending of concrete block walls. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 114(1).
9. Escobar J. (2004). Estudio analítico y experimental de alternativas para muros no estructurales en mampostería a la luz de la NSR-98. Tesis de maestría, Universidad de los Andes, Colombia.
10. Fernández D. R. (2019). Resistencia a cortante de muros confinados de CCA. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
11. Ferretti, D., Michelini, E., & Rosati, G. (2015a). Cracking in autoclaved aerated concrete: Experimental investigation and XFEM modeling. "Cement and Concrete Research", 156-167.

12. Griffith M. C., Lam N. T., Wilson J. L. y Doherty K. (2004). Experimental investigation of unreinforced brick masonry walls in flexure. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 130(3).
13. Houst Y., Alou F., Wittmann F. H. (1983). Influence of moisture content on the mechanical properties of autoclaved aerated concrete. Proceedings Autoclaved Aerated Concrete, Moisture and Properties. Amsterdam: Elsevier. 219-3.
14. Hu W., Neufeld R. D., Vallejo L. E., Kelly C. y Latona M. (1997). Strength properties of autoclaved cellular concrete with high volume fly ash. "Journal of Energy Engineering", ASCE, 123(10).
15. Małyszko, L., Kowalska, E., & Bilko, P. (2017). Splitting tensile behavior of autoclaved aerated concrete: Comparison of different specimens' results. "Construction and building materials", 1190-1198.
16. Martinez, J., Martinez, J. (2010). Fallas estructurales comunes en las edificaciones de Mexicali B.C., debido al sismo del 4 de abril del 2010. En "Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural", Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Guanajuato, México.
17. Martini K. (1997). Finite element studies in the out-of-plane failure of unreinforced masonry. "Proceedings of the 7th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering", Seoul, Corea, Vol. 1, 179-184.
18. Masonry Standards Joint Committee. (2011). Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures (TMS 402-11 / ACI 530-11 / ASCE 5-11). The Masonry Society. Farmington Hills, MI.
19. Middleton A. C. y Drysdale R. G. (1995). Flexural capacities of concrete block walls with openings. "Seventh Canadian Masonry Symposium", Hamilton, Ontario.
20. Milani G., Lourenco P., Tralli A. (2006). Homogenization approach for the limit analysis of out-of-plane loaded masonry walls. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 132(10).

21. Monaco y Guadagnuolo (2009). Out of plane behaviour of unreinforced masonry walls. "Protection of historical buildings", PROHITECH 09, Taylor & Francis Group, Londres, Inglaterra, pp. 1177-1180.
22. Morandi P., Magenes G., Griffith M. (2008). Second order effects in out-of-plane strength of unreinforced masonry walls subjected to bending. "Australian Journal of Structural Engineering", 8(2).
23. NTCM - Gobierno del Distrito Federal (2004). Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.
24. Okazaki, T., Nakashima, M., Suita, K., Matusmiya, T. (2007). Interaction between cladding and structural frame observed in a full-scale steel building test. "Earthquake Engineering and Structural Dynamics", 36, 35-53.
25. Pérez D. S. (2019). Análisis de las propiedades mecánicas del concreto celular de autoclave. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
26. Puc A. I. (2019). Métodos de ensaye de propiedades mecánicas básicas del concreto celular de autoclave. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
27. Pujol, S., Rodríguez, M. (2019). Evaluación del comportamiento de muros no estructurales en edificios de la Ciudad de México en el terremoto del 19 de septiembre de 2017. "Revista de Ingeniería Sísmica", 101, 53-66.
28. Parker, J., Tanner, J., & Varela, J. (2007). Evaluation of ASTM Methods to determine splitting tensile strength in concrete, masonry and Autoclaved Aerated Concrete. "Journal of ASTM International", 1-12.
29. Qu, X., & Zhao, X. (2016). Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete - A review. "Construction and Building Materials", 505-516.
30. RILEM, T. C. (1993). RILEM Recommended Practice: Autoclaved Aerated Concrete: Properties, Testing and Design, RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC, E & FN Spon, London.

31. Saatcioglu, M., Tremblay, R., Mitchell, D., Ghobarah, A., Palermo, D., Simpson, R., Adebar, P., Ventura, C., Hong, H. (2013). Performance of steel buildings and nonstructural elements during the 27 February 2010 Maule (Chile) Earthquake. "Canadian Journal of Civil Engineering", 40, 722-734.
32. SASID (4.0.2.0) [Software] (2017). Recuperado de <https://www.isc.cdmx.gob.mx/servicios/servicio/normas-tecnicas-complementarias-y-sasid>.
33. Sepulveda A, Astroza M., Kausel E., Campos J., Casas E., Rebolledo S, Verdugo R. (2008). New Findings on the 1958 Las Melosas Earthquake Sequence, Central Chile: Implications for Seismic Hazard Related to Shallow Crustal Earthquakes in Subduction Zones. "Journal of Earthquake Engineering", 12:3, 432-455.
34. Song, Y., Li, B., Yang, E., Liu, Y., y Ding, T. (2015). Feasibility study on utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as aerating agent for the production of autoclaved aerated concrete. "Cement & concrete composites", 51-58.
35. Xella International GmbH. (2007). Production Process. Disponible en: <http://www.hebel.mx> Recuperado el 30 de abril de 2019.
36. Yi T, Moon F. L., Leon R. T. y Kahn L. F. (2006). Analyses of a two-story unreinforced masonry building. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 132(5).

APÉNDICE A DISEÑO DEL EXPERIMENTO ESPECÍMENES CON JUNTA DE MORTERO DE PARED DELGADA

Se determinó la resistencia a tensión por compresión del CCA con junta de mortero de pared delgada ($f_{tCCA-adh}$) y la resistencia a tensión por flexión del CCA con junta de mortero de pared delgada ($f_{rCCA-adh}$). Por tal motivo, se construyeron un total 36 especímenes consistentes en dos medios bloques de 15 cm x 20 cm x 60 cm (B1) unidos con mortero de pared delgada (Figura 7.1). Se construyeron con los procesos tradicionales utilizados para CCA. Primero se cortaron los bloques de CCA en dos partes iguales (Figura 7.2a), posteriormente se colocó mortero de pared delgada a una cara externa del bloque (Figura 7.2b) y se unió con la cara externa del otro medio bloque (Figura 7.2c). Para unir los medios bloques se emplearon tres tipos distintos de mortero de pared delgada (M1, M2 y M3). Los especímenes unidos con M1 y M3 el espesor promedio de la junta fue de 3mm. Los especímenes unidos con M2 el espesor promedio de la junta fue de 2mm. En la Figura 7.2d se presenta una vista general de un espécimen. En la Figura 7.3 se presenta el diseño del experimento para la obtención de las propiedades del CCA con junta de mortero de pared delgada.

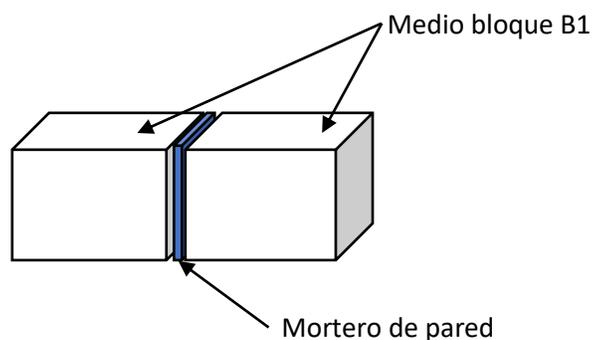


Figura 7.1 Esquema de espécimen con junta de mortero de pared delgada.



a) Corte de bloques.



b) Colocación del mortero.



c) Pegado de piezas.



d) Vista general.

Figura 7.2 Proceso de construcción de especímenes para adherencia de CCA con mortero de pared delgada.

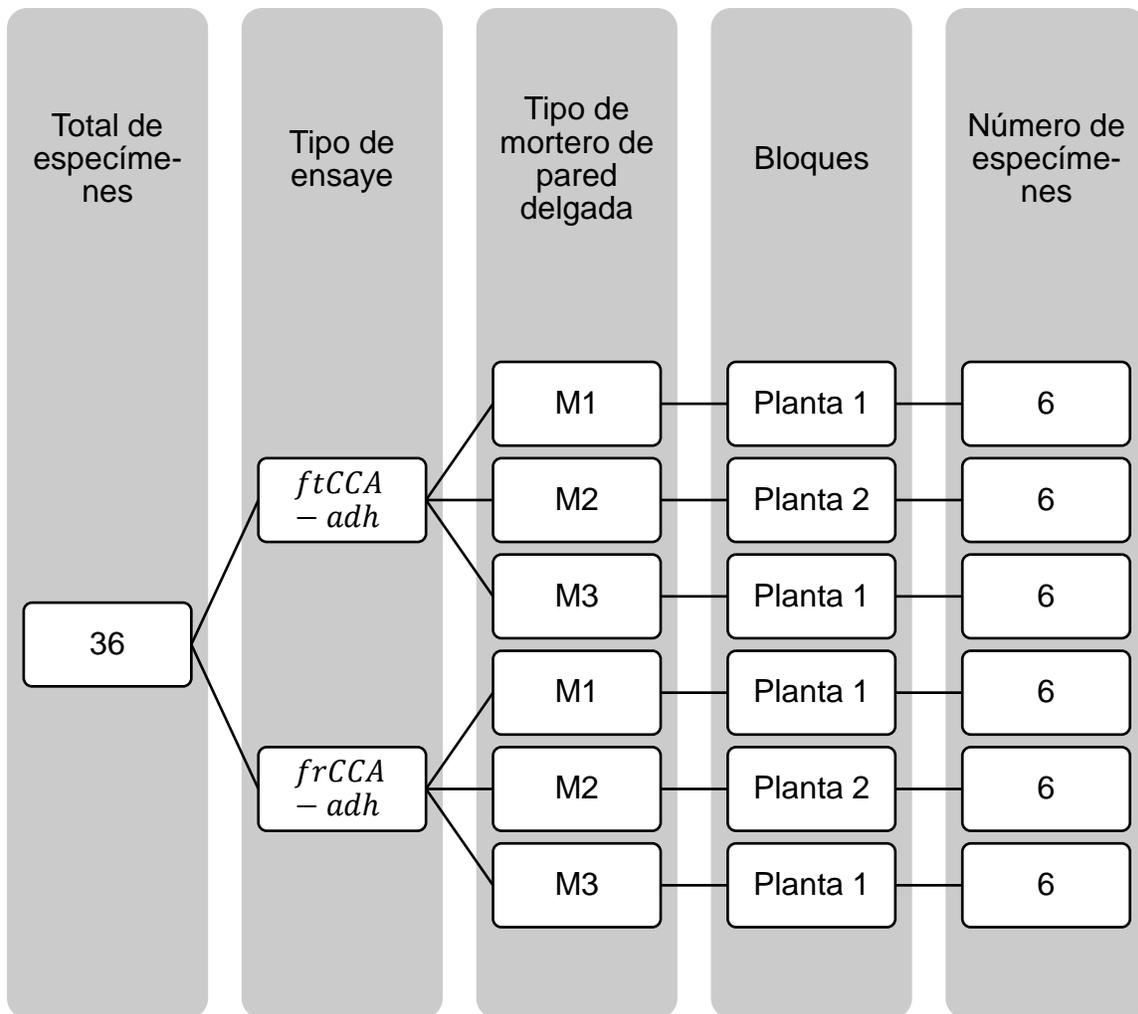


Figura 7.3 Diseño del experimento para la obtención de las propiedades del CCA con junta de mortero de pared delgada.

APÉNDICE B DISEÑO DEL EXPERIMENTO

ESPECÍMENES CON ESPUMA DE POLIURETANO

Se realizaron dos tipos de ensayos: resistencia a cortante directo y resistencia a tensión por flexión. Se construyeron 20 especímenes consistentes en una pieza de CCA de 10 cm x 40 cm x 60 cm (B2) adherida por medio de una junta de espuma de poliuretano a un marco. En los especímenes ensayados a cortante directo, la espuma de poliuretano se colocó en dos bordes paralelos en una longitud de 45 cm (Figura 7.4). En los especímenes ensayados a tensión por flexión, la espuma de poliuretano se colocó en un borde en una longitud de 45 cm (Figura 7.5). El espesor de la espuma de poliuretano fue en promedio 2 cm. Para la colocación de la junta de poliuretano primero se limpiaron y humedecieron las áreas de contacto (Figura 7.6), posterior se colocaron las piezas de CCA dentro del marco y se procedió a colocar la espuma de poliuretano (Figura 7.7). La junta de espuma de poliuretano se colocó siguiendo las instrucciones establecidas en las fichas técnicas. En la Figura 7.8 se presenta el diseño del experimento para la obtención de las propiedades de la espuma de poliuretano con CCA y marcos.

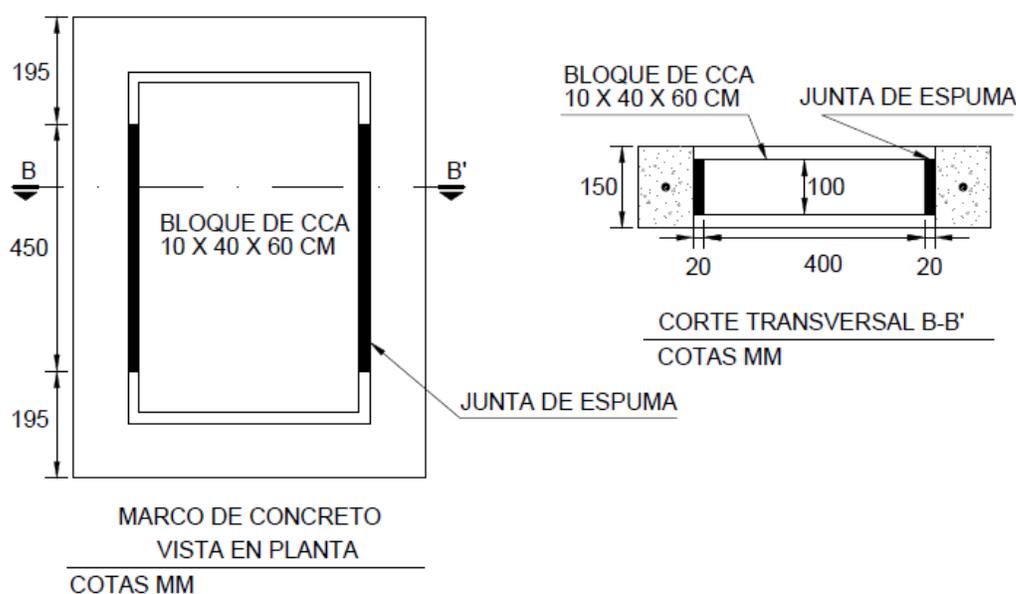


Figura 7.4 Marco con dos juntas de espuma para ensayo de cortante directo.

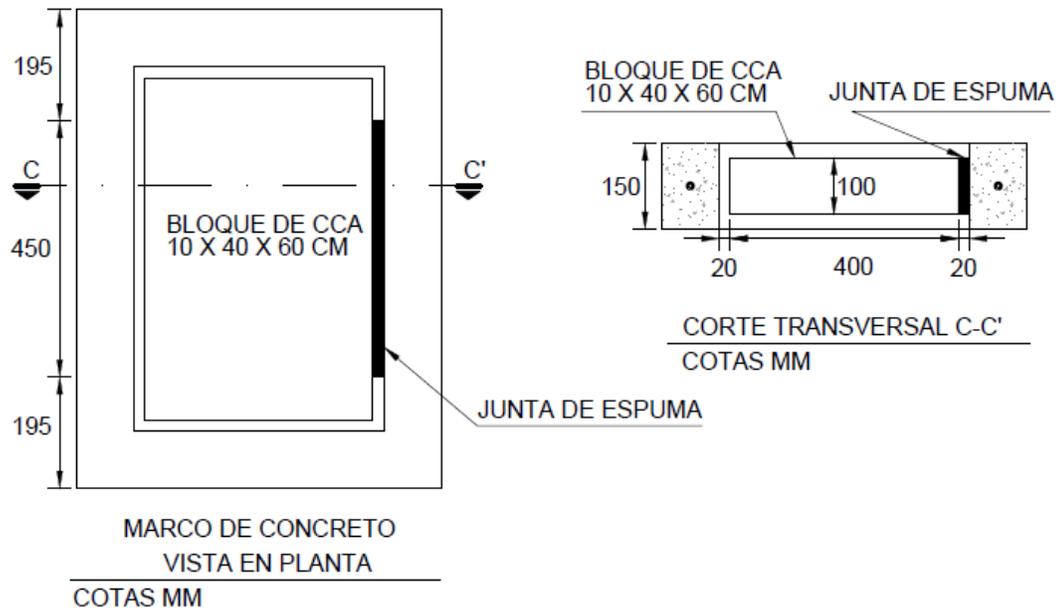


Figura 7.5 Marco con una junta de espuma para ensaye a flexión.



a) Limpieza de marcos de concreto.



b) Limpieza de la pieza de CCA.

Figura 7.6 Limpieza de marcos de concreto y bloques de CCA.



c) Colocación de la pieza.



d) Colocación del poliuretano.

Figura 7.7 Colocación del poliuretano en marco de concreto.

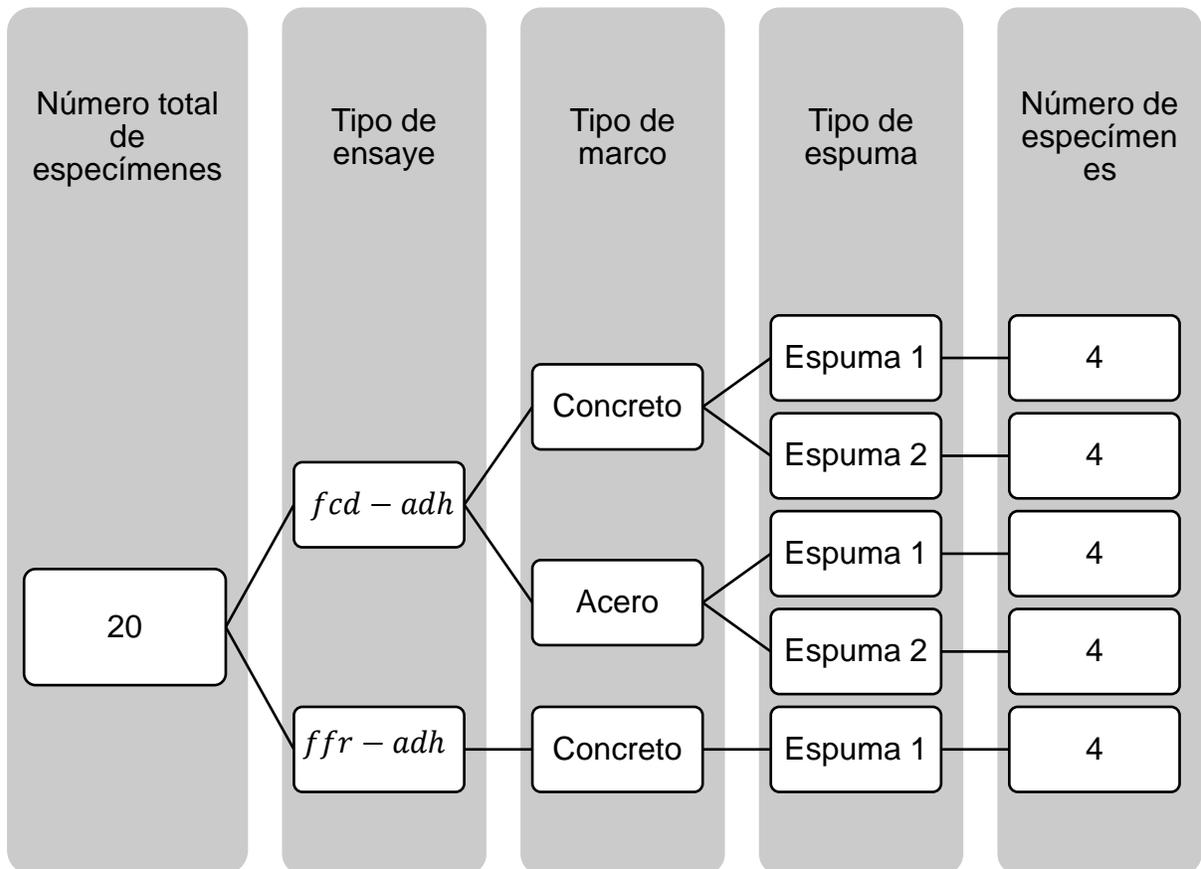


Figura 7.8. Diseño del experimento para la obtención de las propiedades de la espuma de poliuretano con CCA y marcos.

Se construyeron ocho marcos de concreto reforzado y ocho marcos de acero estructural. Las características de los marcos de concreto y acero se presentan en la Figura 7.9 y la Figura 7.10, respectivamente.

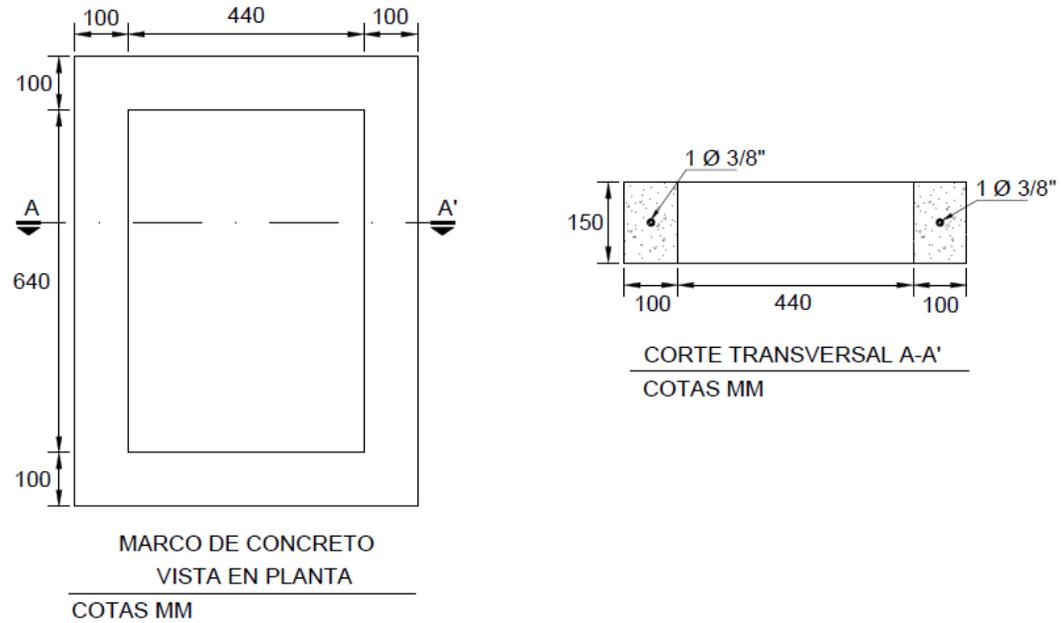


Figura 7.9 Geometría de los marcos de concreto.

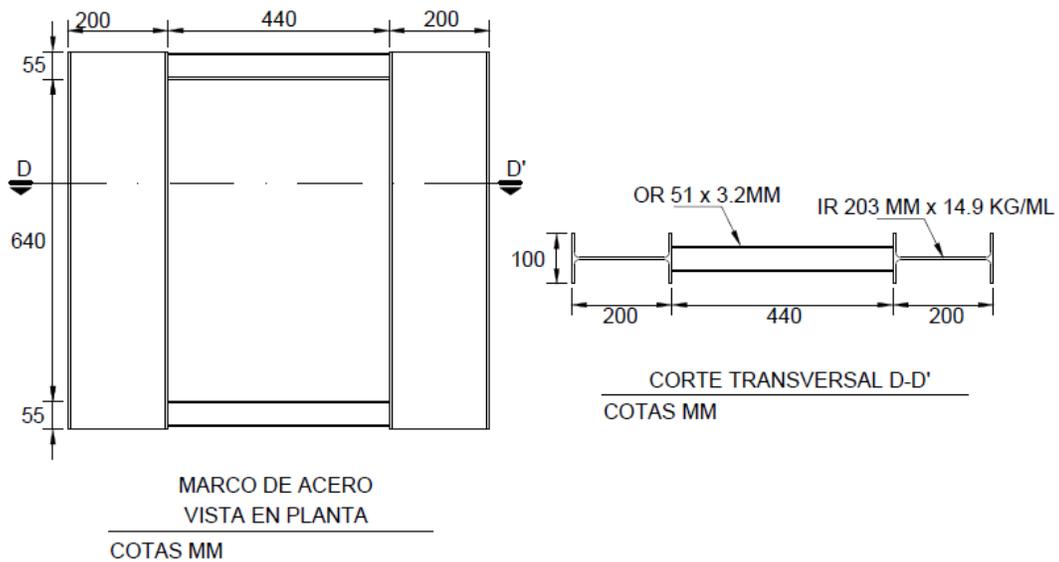


Figura 7.10 Geometría de los marcos de acero.

Para la construcción de los marcos de concreto primero se habilitó la cimbra (Figura 7.11a), posteriormente se habilitó el acero de refuerzo, se colocó desmoldante y se realizó el vertido del concreto (Figura 7.11b). Se desmoldaron los marcos y se esperaron 28 días para colocar los bloques de CCA.



a) Habilitado de cimbra



b) Vertido del concreto

Figura 7.11 Elaboración marco de concreto.

La fabricación de los marcos de acero fue realizada por una empresa especializada en estructuras metálicas. En la Figura 7.12 se presentan los marcos de concreto y acero.



Figura 7.12 Marcos de concreto y acero.

APÉNDICE C FALLAS DE CUBOS DE CCA (f_{CCA})

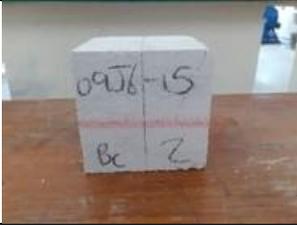
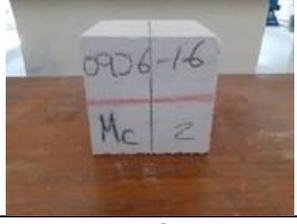
Planta 1		
		
L1-TC-16	L1-MC-16	L1-BC-16
		
L4-TC-03	L4-MC-03	L4-BC-03
		
L2-TC-15	L2-MC-15	L2-BC-15
		
L2-TC-16	L2-MC-16	L2-BC-16

Figura 7.13 Fallas de cubos de CCA sujetos a compresión.

APÉNDICE D FALLAS DE BLOQUES (f_{tCCA})

Planta 1		
		
L1-ft-7	L1-ft-8	L1-ft-9
		
L1-ft-10	L1-ft-11	L1-ft-12
		
L2-ft-7	L2-ft-8	L2-ft-9
		
L2-ft-10	L2-ft-11	L2-ft-12
Planta 2		
		
L1-ft-1	L1-ft-2	L1-ft-3

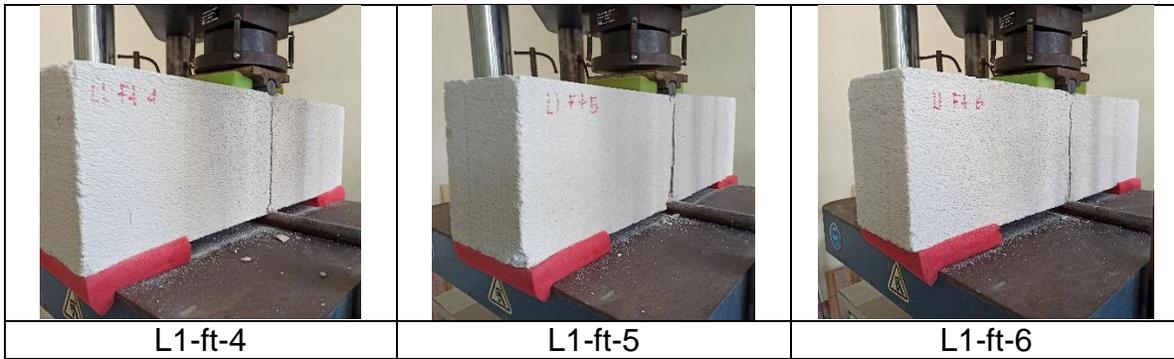
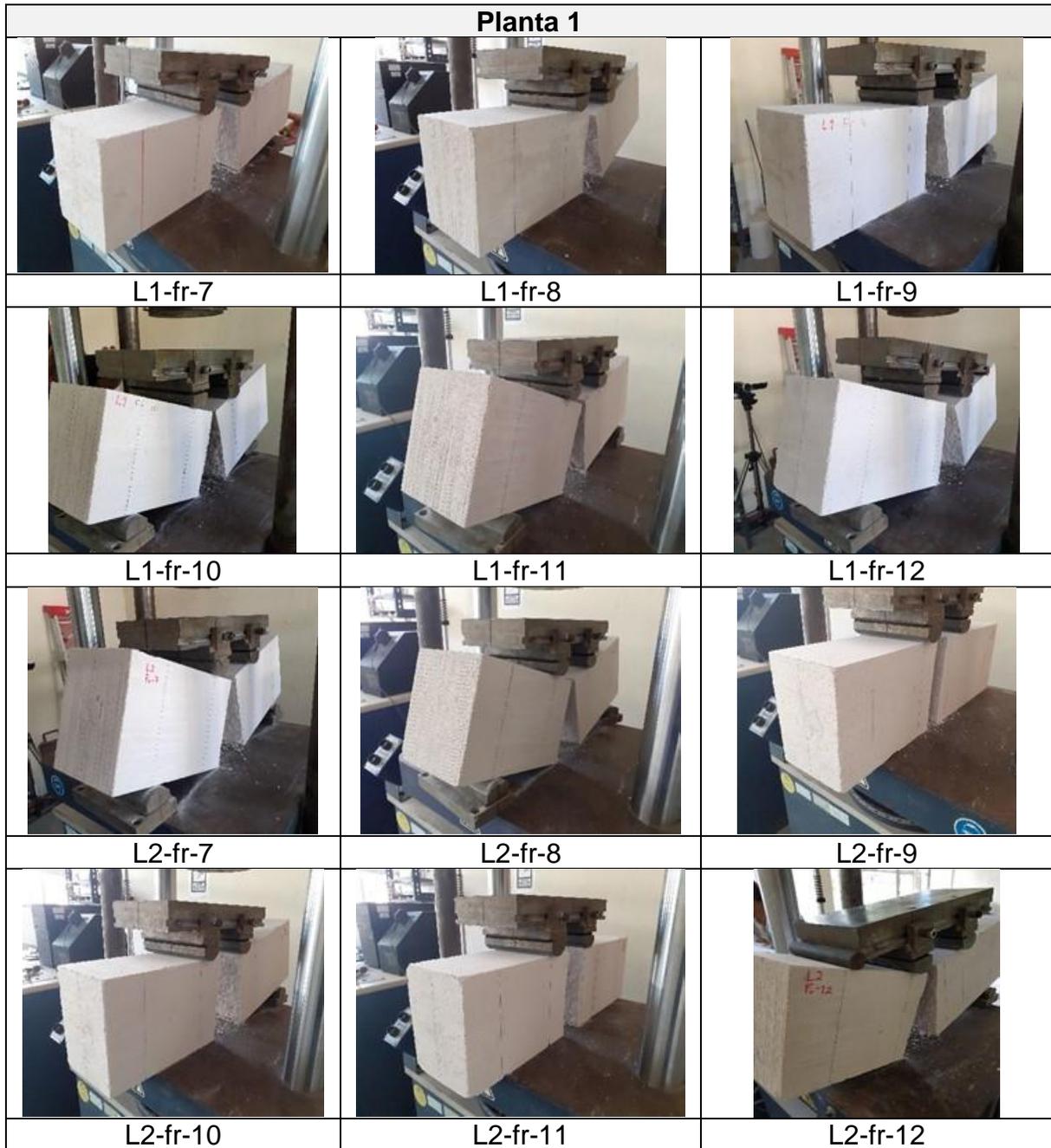


Figura 7.14 Fallas de bloques B1 sujetos a tensión por compresión.

APÉNDICE E FALLAS DE BLOQUES (f_{rCCA})



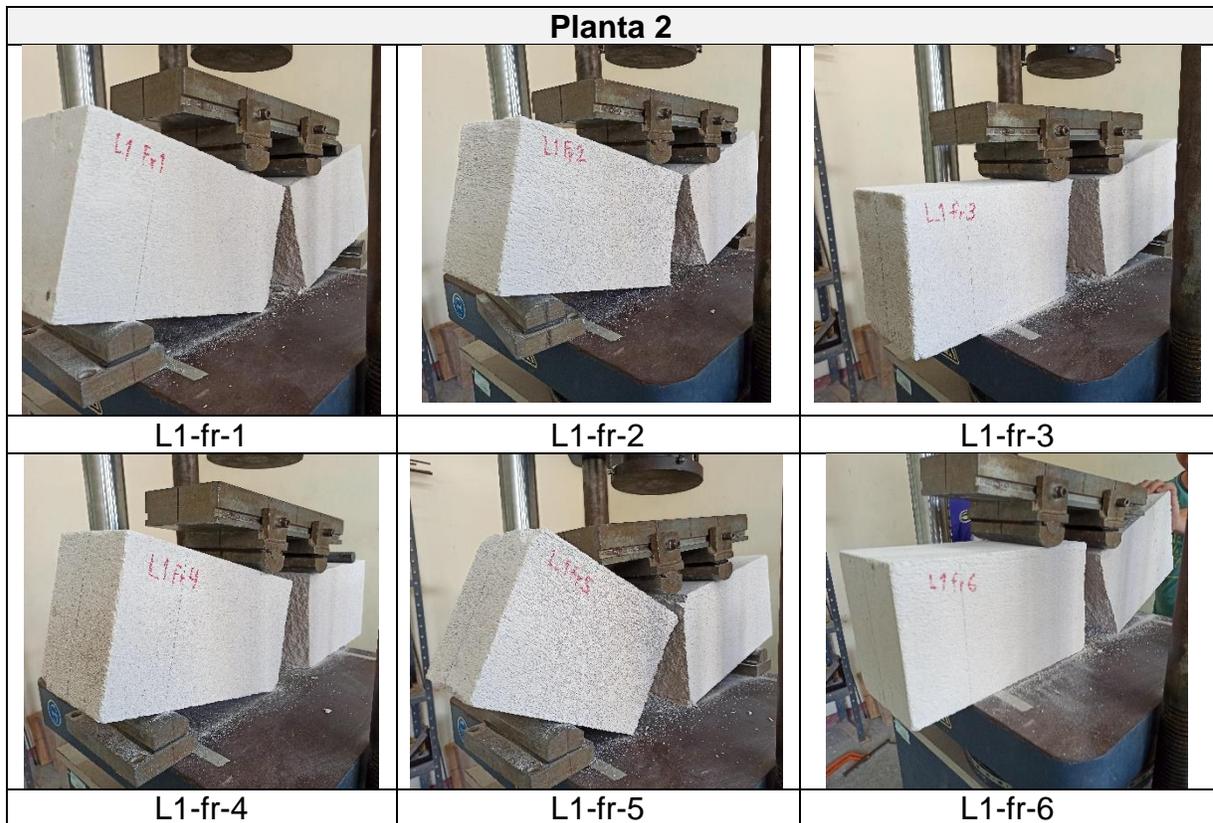


Figura 7.15 Fallas de bloques B1 sujetos a tensión por flexión.

APÉNDICE F FALLAS DE PRISMAS (E_{CCA})

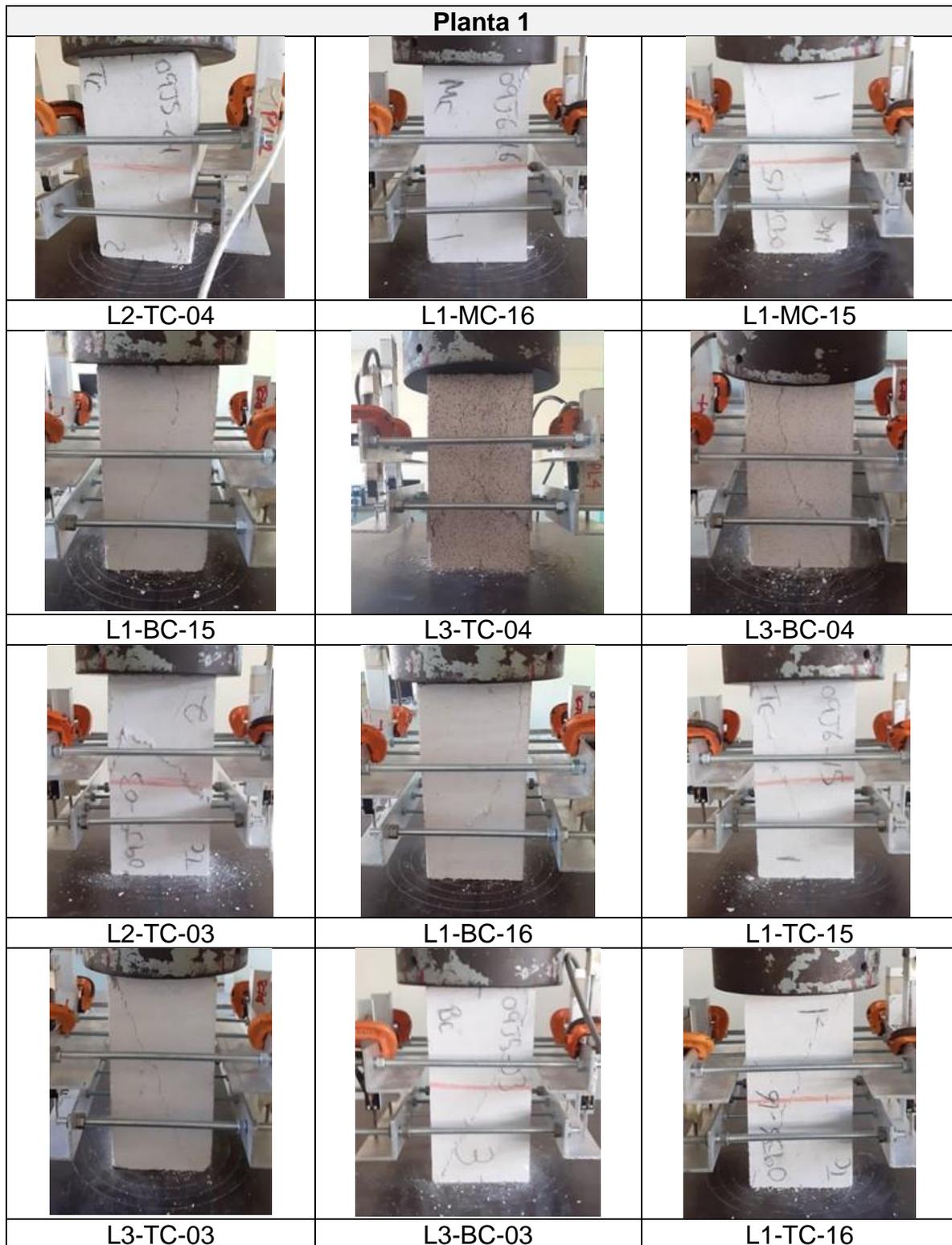
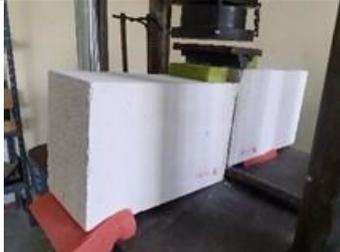


Figura 7.16 Fallas de prismas de CCA.

APÉNDICE G FALLAS DE BLOQUES CON JUNTA

$(f_{tCCA-adh})$

M1 y bloques de la planta 1		
		
M1-P1-ft-1	M1-P1-ft-2	M1-P1-ft-3
		
M1-P1-ft-4	M1-P1-ft-5	M1-P1-ft-6
M2 y bloques de la planta 2		
		
M2-P2-ft-1	M2-P2-ft-2	M2-P2-ft-3
		
M2-P2-ft-4	M2-P2-ft-5	M2-P2-ft-6

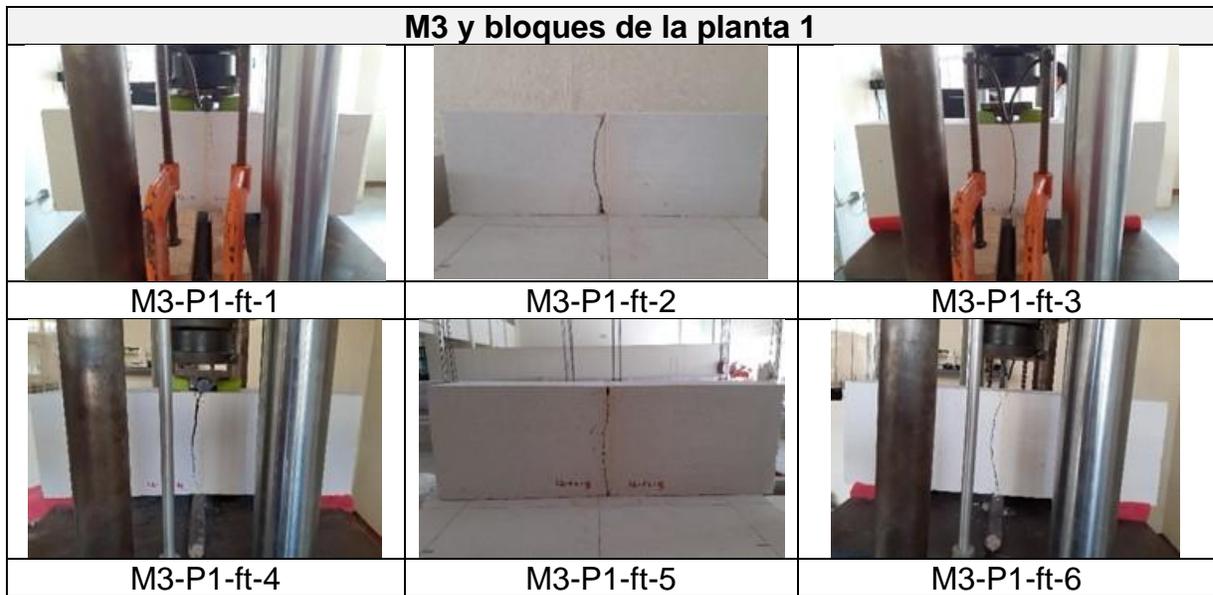


Figura 7.17 Fallas de especímenes consistentes de dos medios bloques B1 unidos por una junta adhesivo sujetos a tensión por compresión.

APÉNDICE H FALLAS DE BLOQUES CON JUNTA

$(f_{rCCA-adh})$

M1 y bloques de la planta 1		
		
M1-P1-fr-1	M1-P1-fr-2	M1-P1-fr-3
		
M1-P1-fr-4	M1-P1-fr-5	M1-P1-fr-6
M2 y bloques de la planta 2		
		
M2-P2-fr-1	M2-P2-fr-2	M2-P2-fr-3
		
M2-P2-fr-4	M2-P2-fr-5	M2-P2-fr-6

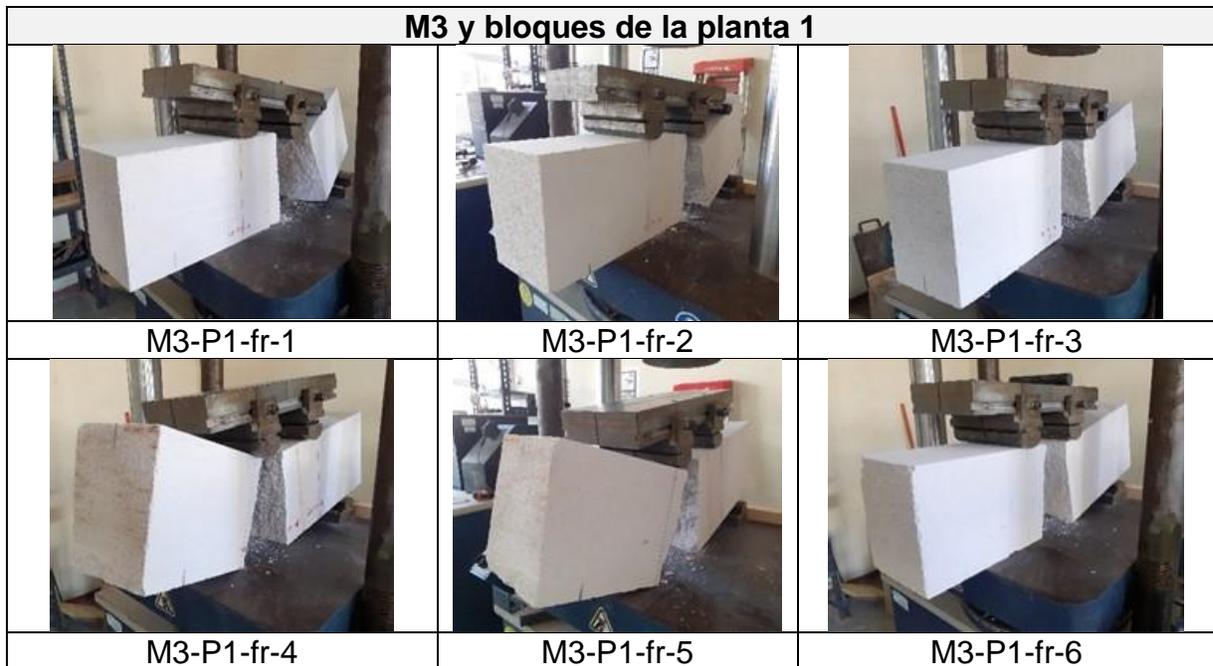
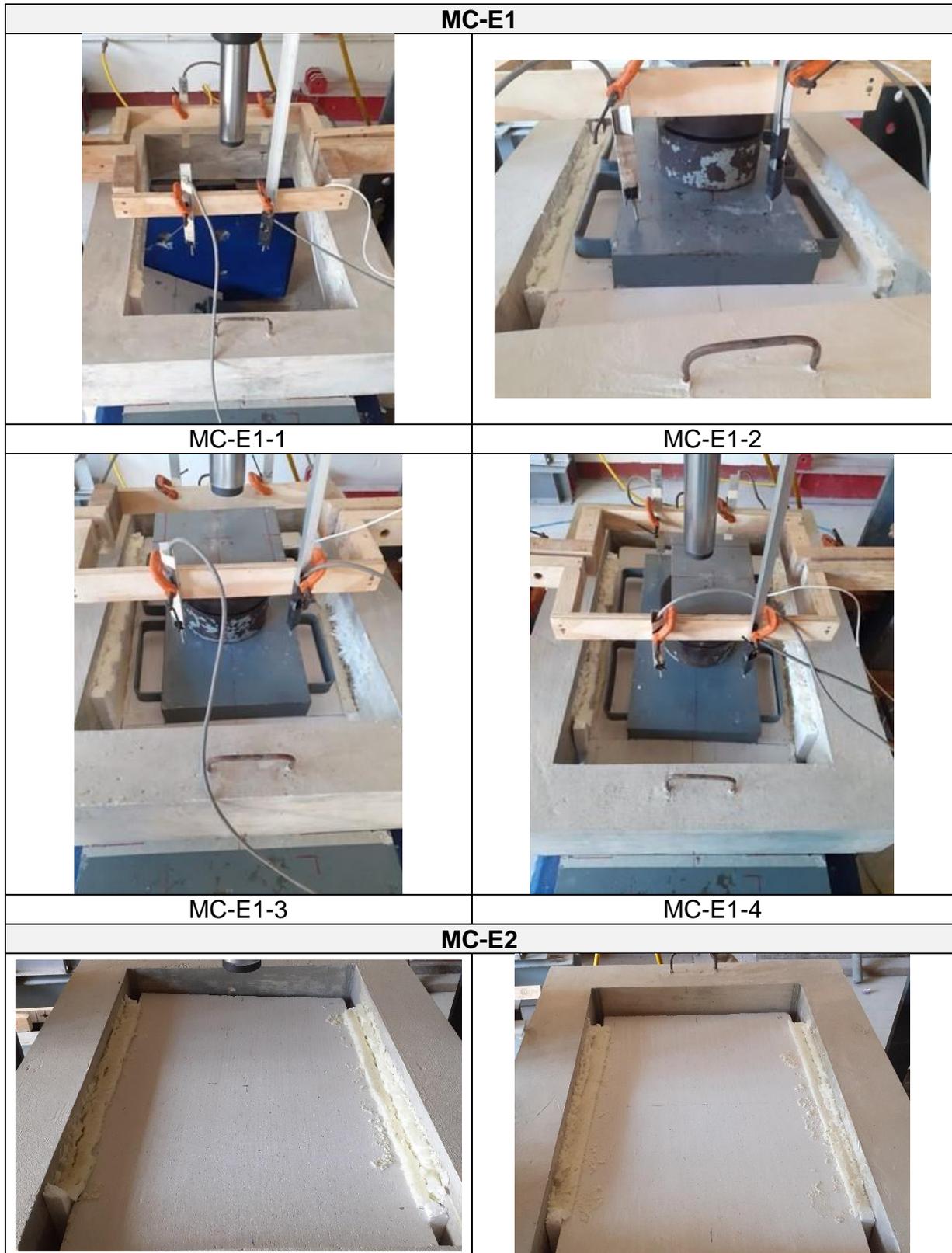


Figura 7.18 Fallas de especímenes consistentes de dos medios bloques B1 unidos por una junta adhesivo sujetos a tensión por flexión.

APÉNDICE I FALLAS DE JUNTAS (f_{cd-adh})



<p>MC-E2-1</p> 	<p>MC-E2-2</p> 
<p>MC-E2-3</p>	<p>MC-E2-4</p>
<p>MA-E1</p>	
	
<p>MA-E1-1</p>	<p>MA-E1-2</p>
	
<p>MA-E1-3</p>	<p>MA-E1-4</p>
<p>MA-E2</p>	
	
<p>MA-E2-1</p>	<p>MA-E2-2</p>

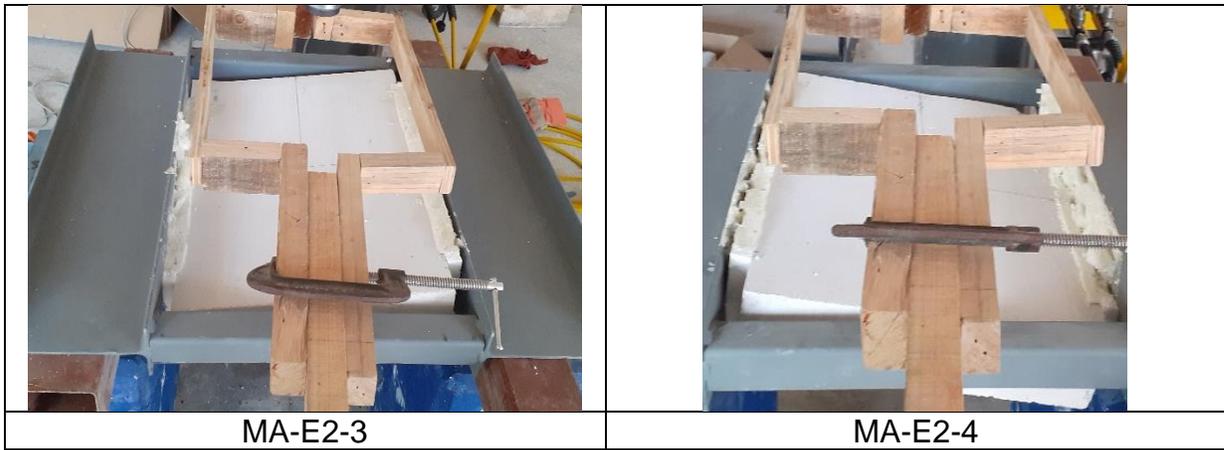


Figura 7.19 Fallas en los especímenes (f_{cd-adh}).

APÉNDICE J FALLAS DE JUNTAS (f_{fr-adh})

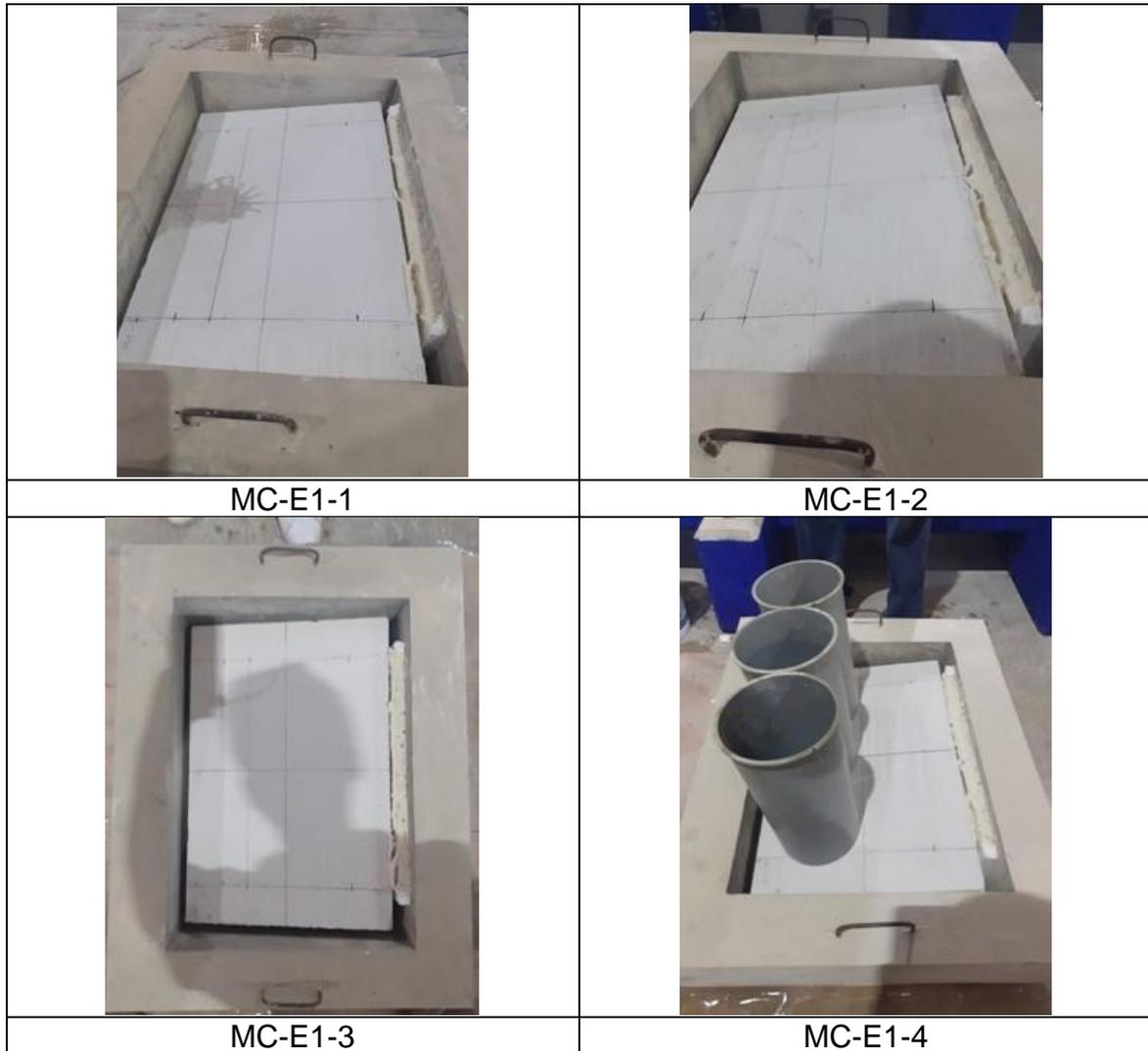


Figura 7.20 Fallas de especímenes (f_{fr-adh}).

APÉNDICE K ERROR EN LA f_{cd-e}

Se presenta la curva de error global de todos los datos en función del desplazamiento para cada tipo de espécimen para la obtención de las ecuaciones.

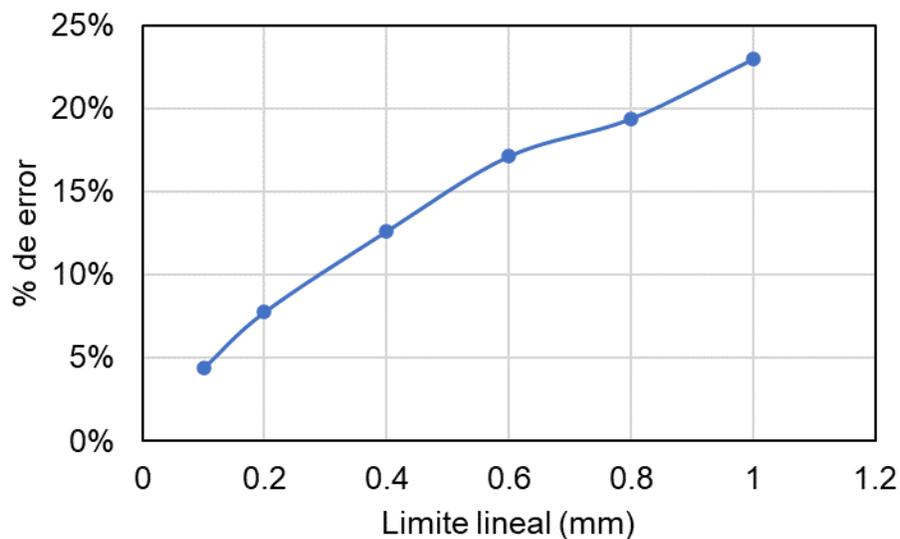


Figura 7.21 MC-E1.

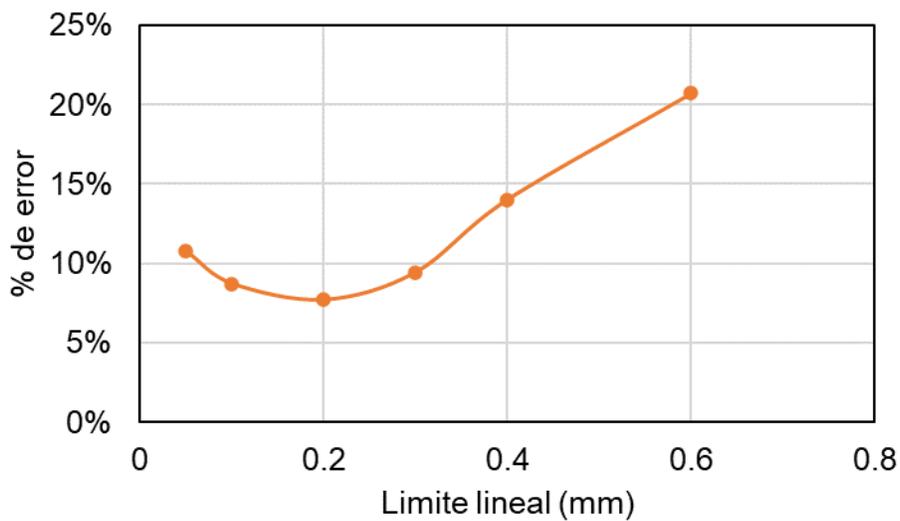


Figura 7.22 MC-E2.

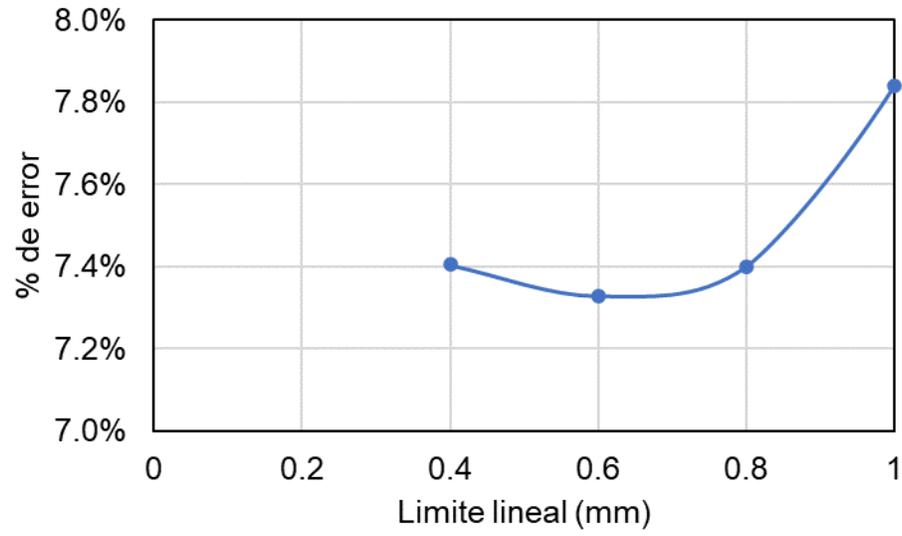


Figura 7.23 MA-E1.

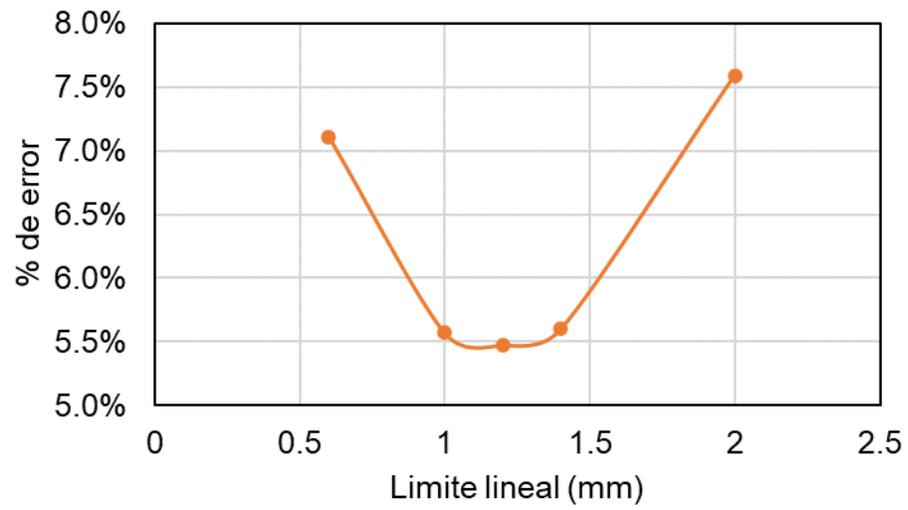


Figura 7.24 MA-E2.