



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**EVALUACIÓN DE UNIONES ORTOGONALES ENTRE MUROS Y LOSAS
PREFABRICADOS CON NÚCLEO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO Y ELECTROMALLA**

Lucía del Carmen Ramazzini Carrillo
Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, octubre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE UNIONES ORTOGONALES ENTRE MUROS Y LOSAS
PREFABRICADOS CON NÚCLEO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO Y ELECTROMALLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUCÍA DEL CARMEN RAMAZZINI CARRILLO
ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Alan Giovanni Cosillo Pinto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE UNIONES ORTOGONALES ENTRE MUROS Y LOSAS PREFABRICADOS CON NÚCLEO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO Y ELECTROMALLA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 10 de septiembre de 2014.



Lucía del Carmen Ramazzini Carrillo

Guatemala, 23 de septiembre de 2015

Ingeniero

José Gabriel Ordoñez Morales

Jefe de área de materiales de construcción

Facultad de Ingeniería

Señor jefe de área:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **“EVALUACIÓN DE UNIONES ORTOGONALES ENTRE MUROS Y LOSAS PREFABRICADOS CON NÚCLEO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO Y ELECTROMALLA”**, desarrollado por la estudiante universitaria Lucía del Carmen Ramazzini Carrillo, quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo realizado por la estudiante **Lucía Ramazzini**, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Mario Rodolfo Corzo Ávila
Ingeniero Civil. No. De colegiado 2089

Mario Rodolfo Corzo
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 2089



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>



Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala,
09 de octubre de 2015

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **EVALUACIÓN DE UNIONES ORTOGONALES ENTRE MUROS Y LOSAS PREFABRICADOS CON NÚCLEO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO Y ELECTROMALLA**, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Lucía del Carmen Ramazzini Carrillo, quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





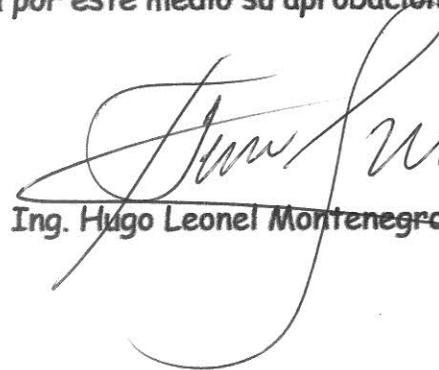
USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez, al trabajo de graduación de la estudiante Lucía del Carmen Ramazzini Carrillo, titulado **EVALUACIÓN DE UNIONES ORTOGONALES ENTRE MUROS Y LOSAS PREFABRICADOS CON NÚCLEO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO Y ELECTROMALLA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre 2015

/bbdeb.

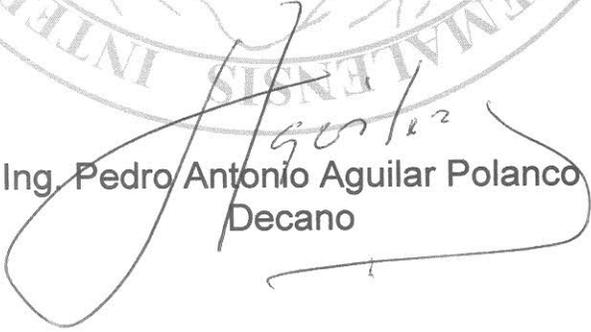
Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE UNIONES ORTOGONALES ENTRE MUROS Y LOSAS PREFABRICADOS CON NÚCLEO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO Y ELECTROMALLA**, presentado por la estudiante universitaria: **Lucía del Carmen Ramazzini Carrillo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2015



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Creador de la vida. Por fijarse en mí y depositar su amor en mi corazón.
Virgen María	Madre de Dios y madre mía. Por auxiliarme y guiarme hacia Jesús.
Mis padres	Luis Enrique Ramazzini Bran (q. e. p. d.), por ser mi ángel, cuidarme siempre y haber sido mi ejemplo de perseverancia y honradez. María Isabel Carrillo García, por ayudarme todos los días y ser mi ejemplo de amor, humildad y entusiasmo por la vida.
Mis hermanos	Almarinia, Luis, Alfredo y Julio Ramazzini Carrillo, por cuidarme, apoyarme y creer en mí. Su compañía y consejos han influido para alcanzar esta meta.
Mis abuelos	Cástulo Carrillo (q. e. p. d.), Juventina García (q. e. p. d.), Luis Ramazzini (q. e. p. d.) y Carlota Bran (q. e. p. d.), por sus cuidados, la paciencia y el cariño. El sueño que tuvieron para mi vida profesional se cumple con este logro.

Mis tíos

Julián Carrillo (q. e. p. d.), Juana Carrillo (q. e. p. d.), Francisca Carrillo, Rubén y Carlos García, Aracely (q. e. p. d.), Osvina, Telma, Irma y Ottoniel Ramazzini, por su cariño y apoyo incondicional.

Mis sobrinos

Luis, Alfredo, Brandon, Valentina, Chelcy, Evelyn, Lourdes y Alejandra, por darme muchas alegrías.

Mis amigos

Whendolyn Estrada, Sergio Estrada, Marleny Cifuentes, Julio Acajabón, Perla Javalois, Elmer López, Hilda Cumes, Flor García, Belén García, Mónica García, Evelyn Pérez, Beto Barrera, Luis Ángel, Carlos Mejía, Paola, Erick Javier, Mynor, Ariel, Byron, Mariam, Mayra, Sandy, Alberto y Jorge, por su amistad sincera y su compañía.

Mi novio

Ludwin Gómez, por darme ánimo, tenerme paciencia y enseñarme lo hermoso que es caminar junto a la persona que se ama.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por iluminarme, como ingeniero del universo, en los momentos más difíciles.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi segunda casa y brindarme la oportunidad de formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por la formación académica y humana recibida.
Mis amigos de la Facultad	Naty Carrera, Ricardo Orellana, Iram Luna, Erick Bautista, Ricardo Ávila, Jorge Higueros, Génesis Cap, Marvin, Carlos, René, Rosbelly, Berta, Jesús, Álvaro, Elisa, Sergio, Mynor y Eddi, por compartir tristezas, alegrías, desvelos y no dejarme sola en este camino.
Mi asesor	Ing. Mario Corzo, por dedicarme tiempo, tanto en la elaboración de mi trabajo de graduación, como para aconsejarme y compartir sus valiosos conocimientos y experiencias de la vida.
Señor Fabio Sánchez	Por el apoyo y muestras de cariño recibido durante mi estancia en el área de prefabricados. Sus consejos han sido de beneficio para mi vida

y su colaboración en los ensayos de mi trabajo de graduación fue indispensable.

Grupo Monolit

Por su valiosa colaboración y aporte de materiales en el desarrollo del presente trabajo.

Los ingenieros

Gabriel Ordoñez y Guillermo Melini, por su dedicación, paciencia y su trato fraterno en el desarrollo de revisión de mi trabajo de graduación y por los consejos a lo largo de la carrera.

2.3.	Sistemas constructivos con electropanel	22
2.3.1.	Método de construcción e instalación	23
2.3.2.	Propiedades físicas y mecánicas del sistema	27
3.	UNIONES ENTRE PANELES	29
3.1.	Métodos de anclajes de uniones en prefabricados	29
3.2.	Esfuerzos en las uniones	32
3.2.1.	Fenómeno de corte	34
3.2.2.	Fenómeno de deslizamiento	35
3.2.3.	Efecto producido por un muro en un muro	36
3.2.4.	Efecto producido por un muro en una losa.....	37
3.3.	Fallas.....	38
3.3.1.	Fallas superficiales.....	38
3.3.2.	Fallas internas	41
4.	ENSAYOS.....	49
4.1.	Evaluación previa.....	49
4.1.1.	Estado de las uniones sin ensayar.....	49
4.1.2.	Condiciones de construcción de las uniones.....	52
4.2.	Preparación de los ensayos	53
4.3.	Ensayo de unión entre muros en forma de T	61
4.4.	Ensayo de unión entre muros en forma de L o esquina	62
4.5.	Ensayo de unión entre muro y losa en forma de T.....	63
4.6.	Análisis de resultados	64
	CONCLUSIONES.....	81
	RECOMENDACIONES.....	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	APÉNDICES.....	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Disposición de electromalla.....	12
2.	Diagrama esfuerzo-deformación del acero	13
3.	Composición molecular de los metales	15
4.	Comportamiento mecánico del acero.....	17
5.	Fibras de polipropileno	19
6.	Peso plástico vs. resistencia a la compresión para varios contenidos de cemento y relación agua-cemento	20
7.	Detalle de cimentación	23
8.	Colocación inicial de paneles	24
9.	Zona de traslape entre paneles.....	25
10.	Aperturas de puertas y ventanas	25
11.	Colocación de tendales y puntales.....	26
12.	Angular doble	29
13.	Intersección para refuerzo en dos lechos.....	31
14.	Unión muro con losa	31
15.	Distribución de esfuerzos	32
16.	Distribución de esfuerzos en perfil de esquina de unión muro-muro....	33
17.	Desplazamientos por aplicación de carga.....	35
18.	Deformación de losa	39
19.	Grietas en zona de tensión	40
20.	Desprendimiento de material por torsión.....	40
21.	Fallas por deslizamiento.....	41
22.	Deformación del acero	42

23.	Agrietamiento de tensión diagonal.....	43
24.	Falla por corte.....	43
25.	Espaciamiento de refuerzo a corte	44
26.	Efecto de dovela	45
27.	Diagnóstico externo-interno	46
28.	Detalle de superposición de refuerzo.....	47
29.	Humedad en los paneles	51
30.	Pasos para realizar ensayo	54
31.	Dimensiones de ensayo 1	54
32.	Dimensiones de ensayo 2.....	55
33.	Dimensiones de ensayo 3.....	55
34.	Dimensiones de ensayo 4.....	56
35.	Dimensiones de ensayo 5.....	56
36.	Dimensiones de ensayo 6.....	57
37.	Avance de la colocación de uniones para ensayar	58
38.	Sujeción con sargentos.....	59
39.	Observación de fallas	60
40.	Verificación de armado	60
41.	Unión entre muros en forma de T	61
42.	Unión entre muros en forma de L o esquina.....	62
43.	Unión entre muro y losa en forma de T.....	63
44.	Gráfica de carga vs. deformación ensayo 1.....	65
45.	Gráfica de carga vs. deformación ensayo 2.....	67
46.	Gráfica de carga vs. deformación ensayo 3 (a)	69
47.	Gráfica de histéresis de carga y descarga vs deformación ensayo 3 (b).....	70
48.	Gráfica de carga vs. deformación ensayo 4.....	72
49.	Gráfica de carga vs. deformación ensayo 5.....	74
50.	Gráfica de carga vs. deformación ensayo 6 (a)	75

51.	Gráfica de histéresis de carga y descarga vs. deformación ensayo 6 (b)	77
-----	---	----

TABLAS

I.	Clasificación y características del porcentaje de carbono en el acero ..	16
II.	Ventajas y desventajas de paneles	22
III.	Características generales de electropaneles	27
IV.	Profundidad de recubrimiento al refuerzo	46
V.	Evaluación de uniones previo ensayo	50
VI.	Ensayo 1 para unión muro-losa en forma de T	64
VII.	Ensayo 2 para unión muro-losa en forma de T	66
VIII.	Ensayo 3 para unión muro-muro en forma de T	68
IX.	Ensayo 4 para unión muro-muro en forma de L	71
X.	Ensayo 5 para unión muro-muro en forma de L	73
XI.	Ensayo 6 para unión muro-losa en forma de T	75
XII.	Ensayo 6 (b) de descarga	76
XIII.	Comparación de deriva teórica, real y máxima	79

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h	Altura de muro
A	Área
A_s	Área de acero
P	Carga puntual
cm	Centímetro
d	Deformación lineal
ε	Deformación unitaria
w_c	Densidad del concreto
Δf	Desplazamiento lateral de muro
V	Esfuerzo de corte
s	Esfuerzo normal
t	Espesor de muro
f_y	Fluencia del acero
Kg	Kilogramo
d	Longitud de muro
Mpa	Mega pascales
m	Metro
mm	Milímetro
E	Módulo de elasticidad
%	Porcentaje
f'_c	Resistencia a compresión del concreto
f'_{ct}	Resistencia promedio a la compresión del concreto

GLOSARIO

Acero	Aleación de hierro y carbono que posee un comportamiento dúctil.
ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano de Concreto).
Agrietamiento fino	Abertura producida por separación de materiales, de tamaño casi imperceptible.
Ampollas	Protuberancias huecas en la superficie del concreto.
Astillamiento	Desprendimiento de fragmentos de un objeto debidos a manipulación violenta.
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).
Carga	Fuerzas resultantes del peso de los materiales de construcción, los ocupantes y efectos ambientales.
Deslizamiento	Corrimiento entre materiales provocado por fuerzas paralelas.
Ductilidad	Propiedad de un material de deformarse sin romperse.

Eflorescencia	Cristalización de sales, generalmente de color blanco, que se da en una superficie.
Elasticidad	Capacidad de un material para recuperar su forma al retirar una fuerza que lo altera.
Electropanel	Panel prefabricado compuesto por un núcleo y reforzado en sus caras con malla electrosoldada.
Mortero	Mezcla de cemento, arena, agua y cal que sirve para unir mampostes o recubrir paredes.
Punzonamiento	Esfuerzo producido por una carga localizada.
Recubrimiento	Espesor de hormigón medido entre la parte externa del refuerzo hasta la cara exterior cercana del elemento.
Resistencia	Propiedad que tiene un elemento para soportar una carga o fuerza.
Rigidez	Propiedad de oponerse a la deformación.
Segregación	Es la separación de los componentes del concreto que ya ha sido mezclado, presentando una distribución no uniforme.
UBC	Uniform Building Code (Código Uniforme de la Edificación).

RESUMEN

En el mundo de la construcción existe investigación sobre el uso de nuevos materiales, para solucionar distintos problemas y hacer más eficiente el tiempo de construcción. Los materiales prefabricados han sido un gran aporte para disminuir los tiempos de ejecución. Uno de estos materiales son los paneles con núcleo de poliestireno expandido y electromalla, que poseen la característica de ser livianos y ser fácilmente transportados y ensamblados.

Una construcción con este tipo de paneles tiene puntos críticos. Las uniones representan la zona donde existe una mayor concentración de esfuerzos. Una unión correctamente construida y con buen confinamiento, mantiene la estabilidad e integridad de un sistema completo ante una excitación por cargas propias y por cargas externas como las de un sismo.

Para determinar la capacidad de resistencia de las uniones de electropaneles, se evaluaron en el área de estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería, combinaciones a escala de muro-muro en forma de T y de L y muro-losa en forma de T. La forma de ensayo consistió en aplicar una carga distribuida a lo largo de cada tipo de unión y observar los efectos de corte, deslizamiento y punzonamiento, así como la carga máxima registrada.

Los resultados obtenidos muestran que las uniones poseen su mayor debilidad en el agrietamiento precoz del recubrimiento. Sin embargo, la ductilidad y capacidad de resistir carga es una gran fortaleza de los electropaneles.

OBJETIVOS

General

Evaluar la resistencia y comportamiento a esfuerzos de corte y deslizamiento entre las uniones ortogonales entre muros y muro-losa de electropaneles de poliestireno expandido y electromalla.

Específicos

1. Determinar la carga máxima que soporta una unión de esquina, muro-muro y muro-losa del sistema
2. Relacionar la deformación unitaria *versus* carga para hallar un patrón de comportamiento del sistema.
3. Calcular la resistencia que provee la malla de refuerzo en el electropanel.
4. Comparar la resistencia requerida teóricamente con la obtenida en la realización de ensayos.
5. Proponer el armado ideal para resistir los esfuerzos en las uniones de muro-muro y muro losa de un sistema prefabricado de electropanel.

INTRODUCCIÓN

En toda construcción existen elementos de carácter estructural, que son claves para el funcionamiento y sustentabilidad de un sistema. Es importante reconocer la presencia de puntos críticos, como es el caso de las uniones en los nudos y esquinas. Estos aspectos deben ser considerados con especial atención debido a que son los lugares donde existe mayor concentración de momentos y esfuerzos. Como consecuencia el diseño del refuerzo de los elementos que llegan a estos puntos, está influenciado por las condiciones y características particulares de cada unión.

En el presente trabajo, se estudió un sistema de uniones ortogonales, es decir a 90° , entre muros y losas, con combinaciones de muro-muro en forma de T, muro-muro de esquina o en forma de L y muro-losa en forma de T. El material de los muros y losas fueron paneles con un núcleo de poliestireno expandido y una electromalla de acero, confinados con *joist*. Adicionalmente cuentan con un recubrimiento de mortero de cemento-arena y fibras de polipropileno.

El procedimiento de evaluación se conformó de dos fases: observación previa y ensayo. En la primera fase se hizo una lista de cotejo de problemas que se podrían presentar por condiciones de clima, proceso constructivo o traslado. Posteriormente se diseñó un modelo de ensayo con un marco, gato hidráulico y deformómetro. En la medida que se aplicó carga distribuida en la unión, se registraron los valores de deformación que esta presentó.

Al finalizar los ensayos se realizó un análisis de datos mediante gráficas y tablas. También se hizo un diseño teórico con base en cálculos de mampostería, que sirvió como parámetro de comparación entre la deformación teórica que se esperaba de los muros y la real obtenida de la experimentación. Los valores teóricos y reales se chequearon con el valor de deflexión máxima permisible para muros flexibles que establece el código IBC (Código Internacional de la Edificación).

Los resultados más interesantes se observaron en las gráficas de carga contra deformación, donde se apreció perfectamente el seccionamiento de tres zonas a partir de puntos de fluencia. Estos puntos concuerdan con el esfuerzo de trabajo de los materiales: mortero, electromalla y *joist*. El conjunto de estos materiales y su aporte al sistema mostraron que la unión posee una buena ductilidad y resistencia.

1. PREFABRICADOS

1.1. Tipos de paneles prefabricados

Los materiales prefabricados son aquellos cuya naturaleza consiste en fabricarlos en serie, en un lugar distinto a la ubicación de la obra donde estos se utilizarán. En el momento en que estos sean necesarios se transportan para dar paso a su colocación.

Existe una amplia variedad de productos prefabricados para el uso en la construcción. Estos incluyen diversos materiales, como: estructuras de madera, armaduras prefabricadas, viguetas, losas, muros de contención, bordes, tubos de concreto, bloques, fachaletas, paneles, muros, entre otros.

Específicamente los paneles son elementos prefabricados utilizados principalmente para construir cerramientos de pisos y cubiertas, así como divisiones. Según el uso y las condiciones de construcción que se tengan, los paneles se pueden clasificar como ligeros, medios y pesados. Los primeros son aplicables para techos, cubiertas, muros divisorios, decoración, entre otros. Los paneles medios se usan para muros divisorios, por último los paneles prefabricados pesados se usan para muros de contención, entrepisos, pasos a desnivel, puentes, entre otros.

Existen varios tipos de paneles prefabricados entre los cuales se pueden mencionar:

- **Panel de cemento**
Están compuestos de un núcleo de cemento Portland reforzado con doble malla de fibra de vidrio polimerizada, que cubre ambas superficies y sus cantos. Por su resistencia e impermeabilidad, estos paneles son de común utilización como base para azulejos. También se usa para acabados, bardas, chimeneas exteriores y marquesinas.
- **Panel relleno de polietileno**
El panel sándwich relleno de polietileno consiste en un elemento con ambas caras de malla electrosoldada y un núcleo de polietileno. El recubrimiento es una capa de mortero de un espesor de aproximadamente 2,5 cm, la cual provee mayor rigidez. Tiene la característica de aislamiento térmico y acústico, se puede utilizar en muros que no sean de carga, interiores, cerramientos, habitaciones así como edificios y comercios.
- **Panel relleno de lana roca**
Estos paneles se usan como aislantes térmicos y protectores contra el fuego, especialmente para cuartos fríos. La lana de roca es un material que se fabrica de roca volcánica. Su estructura es fibrosa y multidireccional. Cuenta con doble cara de metal y un acabado final. Este tipo de panel es ideal para cerramiento y cobertura de todo tipo de naves y edificios industriales, posee baja conductividad térmica y una gran capacidad de aislamiento acústico.
- **Paneles de yeso**
También conocido como tabla yeso o cartón yeso, es un panel que se utiliza para muros de división en interiores y en ocasiones se utiliza para revestimiento de techos y paredes. Está conformado por una placa de

yeso laminado, cubierto de una capa de cartón. Estos paneles tienen la ventaja de que se le pueden hacer vanos para puertas y ventanas, se le pueden hacer acabados y es fácil de transportar.

- **Panel de hormigón**

El panel de hormigón es utilizado para cerramientos, divisiones y viviendas. Está compuesto por el hormigón y acero de refuerzo. Posee alta resistencia, aislamiento acústico y alta resistencia al fuego. La producción de estos paneles se hace con una altura máxima de 2,5 m y espesores de 10, 12, 15 y 20 cm. Las uniones horizontales son amachimbradas y debe poseer un sellado de juntas horizontales y verticales.

1.2. Usos de paneles prefabricados en la construcción

Los materiales prefabricados son de gran importancia para aplicaciones que requieran acelerar la construcción. Este factor incide en la optimización de recursos claves. En primer lugar está el tiempo de conclusión de la obra, del cual los contratistas están muy atentos. Este aspecto conlleva al control de la parte económica de la construcción, pues cuando hay un límite de tiempo de entrega y se tiene el pago de trabajadores por día, el uso de prefabricados es una excelente solución.

Otros beneficios de los prefabricados es que se tiene un mejor control de calidad para cada pieza desde su banco de producción, reduciendo así los porcentajes de desperdicio. Además de esto las piezas prefabricadas tienden a ser más livianas, lo cual hace que la integración de carga sea menor. Estas y otras características hacen que el uso de prefabricados sea una solución eficiente para sistemas de rápida construcción.

En la elección de materiales para la construcción, actualmente se está introduciendo el uso de paneles prefabricados como opción preferencial. Los paneles se pueden utilizar en la construcción de las siguientes formas:

- **Muros estructurales**
Elemento vertical que recibe cargas puntuales o distribuidas para trasladarlas a vigas, cimientos o zapatas. Su uso principal es delimitar un espacio, por lo que se puede utilizar tanto en muros de vivienda como muros perimetrales.
- **Divisiones**
Elemento vertical cuya función es separar dos ambientes. Idealmente este tipo de muros no soportan cargas mayores, por lo que en caso de ser necesario pueden retirarse.
- **Losas de entrepisos**
La losa de entrepiso es un elemento horizontal que divide un nivel inferior del superior. Una de sus características es que no está expuesto a la intemperie.
- **Losa final**
La losa final es una cubierta plana que se encuentra al final de un edificio, generalmente expuesto y con acceso por gradas.
- **Fachadas y faldones**
La fachada constituye el ornamento exterior de un edificio o vivienda. Los faldones son elementos exteriores modelan el frente, también es usada como cenefa.

- **Cúpulas**
Son bóvedas que tienen formas semiesféricas o similares. Con las cúpulas se cubre parte de un edificio o incluso todo. Su uso más común es como elemento decorativo o en pequeños ambientes como salas.

1.3. Propiedades mecánicas

Los materiales tienen un comportamiento diferente a su estado natural cuando estos se encuentran bajo efectos de fuerzas aplicadas en ellos. A dicho comportamiento se les puede llamar propiedades mecánicas, las cuales se expresan en términos de cantidades de esfuerzo, deformación o ambas.

Las propiedades mecánicas más sobresalientes son resistencia, rigidez, elasticidad, plasticidad, ductilidad y capacidad energética.

1.3.1. Resistencia

La resistencia es la capacidad que poseen los materiales para soportar diversas fuerzas. La medida de la resistencia se puede determinar con ensayos de tracción, compresión, flexión, dureza, torsión, entre otros. Dichos ensayos revelan datos numéricos, que indican cuál es la capacidad máxima que se resiste en determinado escenario de aplicación de carga o sometimiento de los materiales.

Para el estudio de paneles prefabricados, interesa saber principalmente la resistencia a la flexión, impacto y en algunos casos torsión, puesto que son los contextos más críticos ante los cuales estaría expuesto un panel prefabricado, ya sea para usarse como un muro o como una losa.

En la presente investigación, el centro de atención es la respuesta que poseen las uniones, combinación muro-losa y muro-muro (elaborados con paneles de poliestireno expandido y electromalla), al momento de resistir fuerzas que van en el sentido de una de las uniones. Estas fuerzas pueden simular los efectos de sismo sobre los muros, así como el efecto de los muros al cargar las losas.

Conocer la resistencia de elementos prefabricados, provee de una idea general de cómo se comportan individualmente. Sin embargo es muy importante saber cuál es la carga por metro lineal, que el elemento como parte de un sistema puede resistir. Además es interesante la observación del comportamiento de los materiales en una zona tan crítica como lo son los nudos y uniones. La delicadeza de esta parte de una estructura, es que siendo la que le da integridad al sistema, es el lugar donde se presentan concentraciones de esfuerzos.

De manera análoga en los nudos estructurales de concreto el código¹ considera que la resistencia a momento positivo debe ser por lo menos el 50 % de la resistencia a momento negativo, lo cual toma en cuenta una posible inversión de momentos debidos a la acción sísmica. Este aspecto es un indicador de la importancia que tiene la resistencia que da el refuerzo en un nudo, o en las uniones para el caso de esta investigación.

1.3.2. Rigidez y ductilidad

La rigidez se define como el inverso de la deformación. Esto quiere decir que mientras más rígido es un elemento, menos se deformará bajo la acción de fuerzas externas y viceversa. De esta manera la rigidez permite resistir grandes esfuerzos sin sufrir grandes deformaciones o desplazamientos.

¹ ACI 318S-08. 21.5.2.2.

La rigidez puede analizarse desde una sección de un solo material hasta una estructura completa como un edificio. Los paneles que se utilizan como muros para edificios le proveen a la estructura una rigidez que vale la pena investigar, pues estos muros serán los que soporten no solo parte o totalidad de algunas cargas, sino que resistan los esfuerzos debidos a fuerzas laterales, entre las más críticas y usuales para Guatemala las causadas por efectos de sismo y viento.

Para resultados exitosos en métodos constructivos, debe existir armonía. Cuando se diseña y planifica una estructura no se piensa solo en que sea tan rígida y restringida que no se pueda mover. Tampoco es válido que ante la acción cargas, una estructura se desplace tanto que la deformación sea excesiva y crítica. Para tener equilibrio, existe en los códigos de diseño un límite de deformación para que la estructura tenga movilidad y desplazamientos, que le hagan ser dúctil.

La ductilidad es la capacidad que tiene un material de deformarse plásticamente antes de llegar a la ruptura. Esta propiedad puede investigarse en probetas mediante dos parámetros que son alargamiento y reducción de área.

El material de la construcción dúctil por excelencia, es el acero. En el concreto armado puede apreciarse la buena integración entre el concreto y el acero. Esta combinación se logra gracias al gradiente térmico en el que ambos materiales coinciden. El resultado es que se obtiene la rigidez que da el concreto y la ductilidad que le da el acero en un solo material.

La fraternidad de materiales es la que se busca combinando materiales para la fabricación de estructuras. El concreto armado no es el único que logra

ese objetivo. Existen más opciones de composición de acuerdo a las necesidades constructivas. Tal es el caso de los paneles prefabricados de poliestireno expandido y electromalla. Aunque la electromalla no queda perfectamente embebida, como sería el caso de las varillas de refuerzo en el concreto armado, se adhiere entre el mortero y el poliestireno. De esta manera no solo mantiene la regularidad de la forma del panel, sino que le transfiere sus propiedades de ductilidad y rigidez por la distribución especial que posee.

2. ELECTROPANEL

2.1. Características de los materiales

El electropanel consiste en un sistema conformado por un núcleo de poliestireno expandido de 5,5 cm de grosor, una electromalla de acero grado 70 de diámetro 3,2 mm colocada en ambas caras. Además, está recubierto de un mortero de cemento-arena y fibras de polipropileno. Las dimensiones de cada unidad son de 2,44 m de largo y 1,22 m de ancho. Este tipo de panel se pretende utilizar como un sistema de construcción equivalente a tabiques, muros exteriores, muros perimetrales, incluso para como muros de carga y losas de entrepiso.

2.1.1. Poliestireno expandido

El pentano es un material agente de expansión que agregado al estireno, mediante un proceso de polimerización, genera el poliestireno expandible. Este polímero es un material plástico espumado que se compone de perlas esféricas de diámetros entre 0,30 y 2,00 mm.

El poliestireno expandido se genera a partir de tres fases de fabricación. El proceso inicia con una preexpansión donde el vapor de agua dilata el pentano y expande las perlas. Seguidamente entra la fase de maduración que permite la estabilidad física. Por último se le da forma introduciendo las perlas en un molde cerrado, el cual es sometido a una inyección de vapor de agua. El resultado obtenido es que las perlas se expanden y se sueldan entre ellas, hasta llenar todo el molde y formar un bloque.

El poliestireno expandido presenta varias características que le aportan múltiples beneficios para su uso en la construcción. Entre sus características más destacadas se encuentran:

- Aislamiento térmico
- Resistencia a la humedad
- Durabilidad
- Resistencia mecánica
- Adaptabilidad
- Versatilidad de dimensiones
- Fácil manejo y transporte
- Densidad uniforme
- No tiene valor nutricional para hongos, bacterias u otros

Además, el poliestireno expandido cuenta con las siguientes propiedades mecánicas:

- Resistencia a la compresión a corto plazo.
- Contracción transversal.
- Fluencia y relajación.
- Resistencia a la compresión a largo plazo.
- Resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y resistencia al deslizamiento.
- Coeficiente de rozamiento.

2.1.2. Electromalla

El refuerzo con el que cuentan los paneles, es electromalla fabricada con acero grado 70. Consiste en un conjunto de varillas de acero liso, las cuales se

disponen formando una malla electrosoldada, donde la unión de las dos piezas de metal, son presionadas por electrodos para tener un buen contacto eléctrico. Al pasar la corriente el nudo se calienta y el metal comienza a derretirse, de tal forma que las dos piezas quedan unidas por la fundición de ambas, dando lugar a una conexión sólida sin necesidad de utilizar otro material para unir. Los beneficios de usar este tipo de técnica para soldar la electromalla garantiza el control de la presión y precisión de las uniones de este material.

La electromalla debe cumplir con la Norma ASTM-185, para malla de acero electro soldado para refuerzo de concreto.

La resistencia a la fluencia del refuerzo electrosoldado de alambre liso, debe considerarse que se desarrolla mediante el embebido en el concreto de 2 alambres transversales, con el alambre transversal más próximo a no menos de 50 mm de la sección crítica. Sin embargo, l_d no debe ser menor que

$$l_d = 3,3 \left(\frac{A_b}{s} \right) \left(\frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right)$$

Donde l_d se mide desde la sección crítica hasta el alambre transversal más alejado, s es el espaciamiento entre alambres a desarrollarse, y λ se da en 12.2.4(d). l_d no debe ser mayor a 150 mm.²

2.1.2.1. Forma de la malla: disposición del acero

La malla de acero de refuerzo utilizado en la presente investigación, está conformada por varillas de 3,20 mm de diámetro, formando cuadros de 7,5 cm x 15 cm. En los paneles individuales esta malla se coloca en ambas caras. Internamente el núcleo de poliestireno está seccionado a cada 15 cm en cuya división se encuentra un *joist* a lo largo de toda la sección vertical.

² ACI 318-08. 12.8.

Figura 1. **Disposición de electromalla**



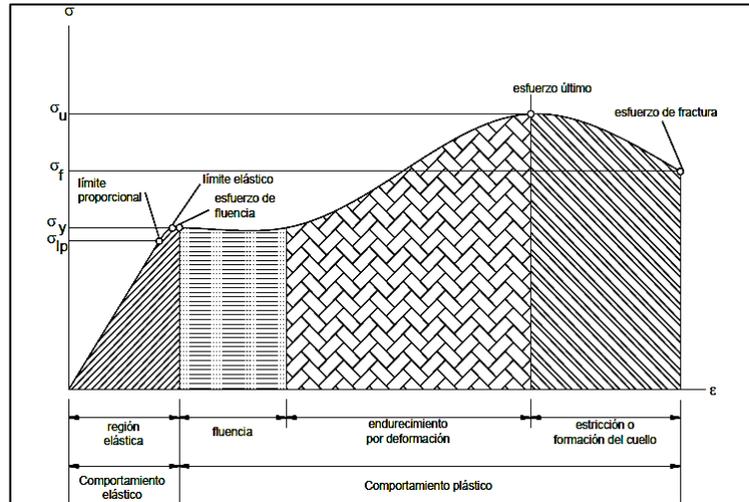
Fuente: Área de estructuras CII.

Las uniones especiales entre muros y muro-losa, tienen un refuerzo adicional en las esquinas, en la cual se provee de 30 cm de electromalla en cada cara y 60 cm de electromalla en la parte posterior.

2.1.2.2. Rigidez del acero

En estructuras de concreto reforzado, el acero posee características que aportan múltiples beneficios al sistema. La primera es la ductilidad (propiedad descrita en el capítulo anterior). Por otro lado el acero es un material con una zona elástica amplia, puede sufrir deformaciones sujetas a la acción de carga y al dejar de aplicar fuerzas exteriores las deformaciones se revierten.

Figura 2. Diagrama esfuerzo-deformación del acero



Fuente: Concreto Armado Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería.

En la figura 2 se puede apreciar la zona elástica que presenta el acero. La elasticidad longitudinal del acero, se define por la pendiente entre el origen y el límite proporcional, por lo que:

$$E = \frac{\sigma_y}{\epsilon}$$

Escrito de otra manera la relación existente es la ley de Hooke.

$$\sigma_y = E\epsilon$$

Esta expresión recibe el nombre módulo de Young, debido a que en 1807, Thomas Young introdujo la expresión matemática con una constante de proporcionalidad³. Posteriormente se sustituyó el nombre por módulo elástico.

A veces es conveniente que la expresión anterior esté en función del equivalente de σ que es P/A y el de ε es δ/L Por lo que $\frac{P}{A} = E \frac{\delta}{L}$.

³ PYTEL, Andrew; SINGER, Ferdinand L. *Resistencia de materiales*. p. 31.

Cabe mencionar que el módulo elástico no se refiere a las propiedades elásticas del material, es una medida de rigidez. Para el acero el módulo de elasticidad correspondiente es $E_s = 200,000$ Mpa.

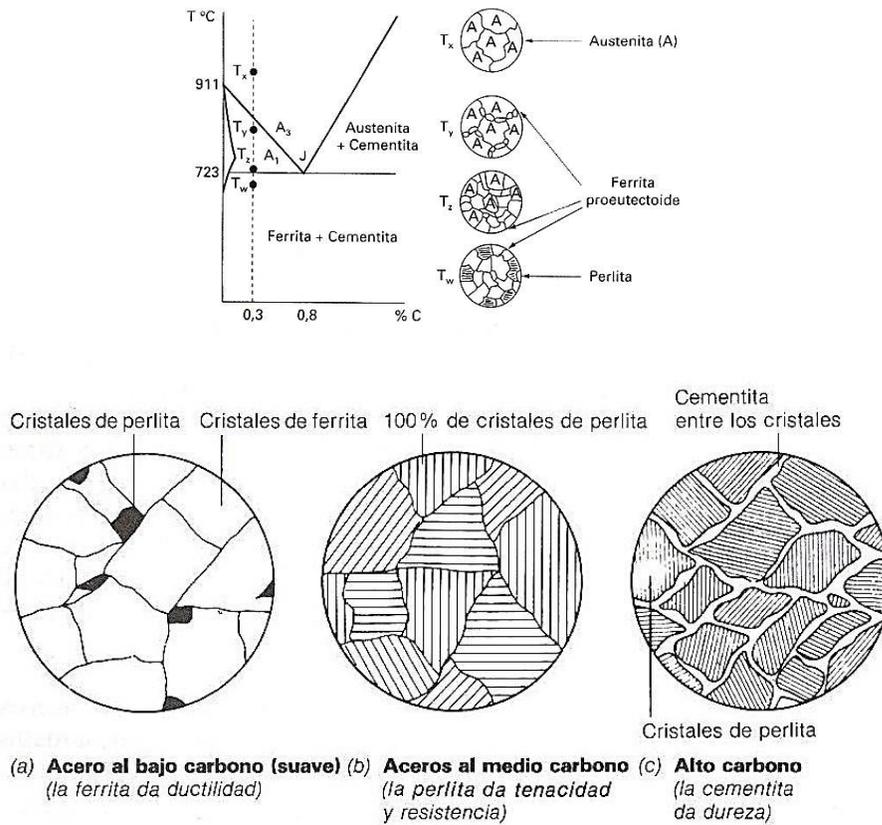
2.1.2.2.1. Contenido de carbono y resistencia

El acero utilizado en la fabricación de la electromalla de esta investigación es de grado 70. Esto quiere decir que su resistencia a la fluencia f_y es de $4\,922 \text{ Kg/cm}^2$. Esta resistencia está relacionada con la composición química que posee el acero.

El acero es una aleación, comúnmente de hierro y carbono. Esta composición tiene variantes, según el contenido de carbono y la temperatura a la cual se mezclan. De esta manera se obtienen dos tipos de reacciones: las eutécticas y las eutéctoides. Las primeras se dan a temperaturas superiores a 927 °C , compuesta por fases tanto líquidas como sólidas. Las reacciones eutéctoides se dan por debajo de los 927 °C y se mantienen en un estado sólido.

En el rango eutécticoide, se dan fases como la cementita, que tiene características de mucha dureza y fragilidad. Otra fase es el hierro, que se divide en hierro alfa, conocido como ferrita y posee suavidad y ductilidad. Esta fase solo tiene la capacidad de disolver hasta un $0,03 \%$ de carbono; el hierro gamma, también llamado austenita, es menos dúctil y más duro que la ferrita con un contenido de hasta un 2% de carbono.

Figura 3. **Composición molecular de los metales**



Fuente: *Composición molecular de los metales*. <http://www.mexicoarmado.com/cuchillos-y-navajas/183173-tratamientos-termicos-termoquimicos-del-acero-e-informacion-general.html>.

Consulta: febrero de 2015.

Otro constituyente de las fases de la aleación de hierro y carbono es la llamada perlita. Tiene una composición alternada de capas de ferrita y cementita. Esta característica hace que la perlita tenga valores de dureza y ductilidad, intermedios a los de la ferrita y la cementita.

Las propiedades de cada fase, anteriormente mencionadas, dependen del contenido de carbono. Cuando se aumenta el contenido de carbono en la

aleación, por encima del 0,8 % la fase de ferrita continúa a una cementita dura y quebradiza. Estas características indican que el acero utilizado en la construcción se mantiene en la fase de perlita.

De manera práctica, según el contenido de carbono, los aceros se pueden clasificar como de bajo, medio y alto carbono. Las características particulares se especifican en la siguiente tabla.

Tabla I. **Clasificación y características del porcentaje de carbono en el acero**

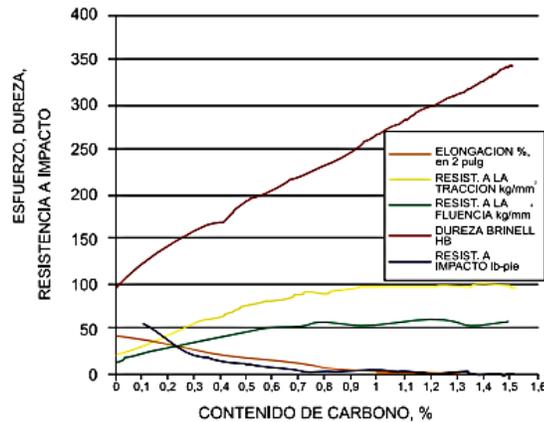
porcentaje de carbono	Clasificación de carbono	Características
< 0,25	Bajo	Poca resistencia Soldaduras sin problemas
0,25-0,8	Medio	Mayor resistencia Buena ductilidad Cuidado especial en soldaduras
> 0,8	Alto	Muy alta resistencia Fragilidad Dificultad para soldar

Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de carbono en el acero influye en sus propiedades mecánicas. La principal característica es que mientras haya más carbono, el acero es menos dúctil y más frágil, lo cual es una debilidad. En contraposición el aumento de carbono, provee de mejor resistencia a la tracción. Asimismo, el acero se vuelve más duro y tenaz.

La figura 4 muestra el comportamiento mecánico del acero a diferentes grados de carbono.

Figura 4. **Comportamiento mecánico del acero**



Fuente: *Corporación aceros Arequipa. El acero, lo que hay que saber.*

[http://www.acerosarequipa.com/fileadmin/templates/AcerosCorporacion/destacados/El_Acero.p](http://www.acerosarequipa.com/fileadmin/templates/AcerosCorporacion/destacados/El_Acero.pdf)
df. Consulta: febrero de 2015.

El uso de un mayor grado de carbono en el acero debe evaluarse con atención, ya que los aceros de alta resistencia con alto contenido de carbono generalmente tienen una plataforma más corta de cedencia que los aceros de menor resistencia y menor contenido de carbono. Los aceros de alta resistencia también tienen una elongación previa a la fractura, más pequeña que los aceros de baja resistencia.

Estas propiedades deben tener especial cuidado en el momento de la elección y aplicación del acero. Debe tomarse en cuenta que el acero debe tener suficiente ductilidad. De esta manera el material podrá tener grandes deformaciones antes de llegar a la fractura. Si el material no se comportara de esta manera su falla sería de tipo explosiva e inesperada, sin dar tiempo de tomar medidas de seguridad.

Las características anteriormente mencionadas, apuntan a que el acero de la electromalla de la presente investigación se puede clasificar de tipo medio. La resistencia de la electromalla a la fluencia es alta, tiene buena ductilidad y su soldadura ha tenido especial cuidado ya que cada punto de intersección ha sido electro soldado con precisión y gran control de calidad.

2.1.3. Mortero

Se conoce como mortero al fluido coloidal, que al igual que el concreto, se solidifica con el paso del tiempo. Es una mezcla de agregado fino, material cementante y agua. Su uso más común es en mampostería, donde se utiliza para unir las piezas. El mortero también es utilizado para acabados y recubrimientos.

El mortero está compuesto por arena de río limpia y cemento, donde proporciones del mortero pueden ser 1:3 o 1:4, con un agregado de cal del 10 %. El electropanel posee un recubrimiento de 2,5 cm de espesor en ambas caras del mismo. El colocado es por capas, pueden ser dos o tres. Es recomendable que entre la primera y segunda capa se deje un tiempo de fraguado de 24 horas.

El recubrimiento con que cuentan los electropaneles tiene una característica especial: concreto celular con fibras. Este tipo de concreto es una modificación del concreto normal, en el cual todo o parte del agregado grueso se sustituye por estructuras milimétricas. Existen varias formas de obtener un concreto celular.

El llamado “puro” consiste en una incorporación de una espuma, esta genera burbujas de aire que se distribuyen en todo el concreto. Además de las celdas de aire, se pueden incorporar otros aditivos, entre los cuales se puede mencionar:

- Fibra dispersante
- Retardante
- Expansor
- Escoria
- Ceniza volante
- Agregados ligeros

Las fibras sintéticas en el concreto celular de los electropaneles, son de polipropileno. Estas reducen la fisuración por contracción plástica del concreto, debido a que al mezclarse las fibras se distribuyen en todas direcciones. Dicha distribución crea redes que ayudan a mantener la integridad de los elementos que constituyen el concreto celular.

La utilización de fibras en concreto debe cumplir con las Normas ASTM C-1116 para concreto reforzado con fibra; y ASTM C-1399, prueba para determinar el esfuerzo promedio residual del concreto reforzado con fibra.

Figura 5. **Fibras de polipropileno**



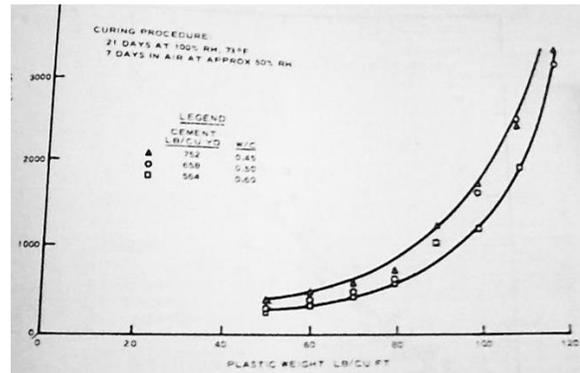
Fuente: *Fibra de polipropileno*. <http://www.dzly-buildingmaterials.es/>. Consulta: febrero de 2015.

En la parte 5 del manual práctico de concreto del ACI, para mampostería, concreto prefabricado y procesos especiales, se definen algunas propiedades mecánicas para el concreto celular:

- **Compresión**

Los esfuerzos de compresión del concreto celular son afectados por factores como el peso, contenido de cemento, relación agua cemento, propiedades de los agregados y el curado. La siguiente figura muestra como la compresión del concreto celular es afectada por ambos: relación agua-cemento y contenido de cemento. Es recomendable que la determinación de esfuerzos de compresión del concreto celular cumpla con la Norma ASTM C330.

Figura 6. **Peso plástico vs. resistencia la compresión para varios contenidos de cemento y relación agua-cemento**



Fuente: ACI. *Manual de práctica de concreto parte 523.3R-9.*

- **Módulo de elasticidad**

Se considera el módulo de elasticidad E_c como la secante a $\frac{1}{2}f'_c$.

$$E_c = w^{1.5} \times 33 \times \sqrt{f'_c}$$

Donde w tiene valores entre 1400-2400 kg/m³

- **Coeficiente de expansión térmica**
La expansión térmica del concreto celular incrementa con su densidad seca.
- **Conductividad térmica**
La conductividad es una función del peso unitario del concreto. Esta propiedad se determina en la densidad del concreto secado al horno según la Norma ASTM C 177.
- **Resistencia a la tensión**
La Norma ASTM C 496 determina el proceso de evaluación para la tensión indirecta de la resistencia a la tensión del concreto celular, de acuerdo a la siguiente expresión

$$f'_{ct} = \frac{2P}{\pi ld}$$

Donde P es la carga máxima aplicada y l y d son las longitudes y diámetros de la muestra, respectivamente.

2.2. Ventajas y desventajas

Los paneles de poliestireno poseen atributos que aportan beneficios en la construcción. Estas ventajas deben ser aprovechadas de la mejor manera posible, para que tenga un impacto significativo en la calidad y en el presupuesto de un proyecto. Por otro lado es importante prevenir situaciones desagradables, conociendo las desventajas de estos materiales. Saber los contras de un material no implica desistir de usarlo, sino tener los cuidados necesarios para que este funcione de manera eficiente. A continuación se

muestra una comparación entre las ventajas y desventajas del panel de poliestireno expandido y electromalla.

Tabla II. **Ventajas y desventajas de paneles**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a los sismos • Aislante térmico: impide la entrada de calor y cuando hay frío impide que el calor interno salga. • Aislante acústico. • Susceptible a variar la textura del acabado para decoraciones. • Facilidad de remodelaciones y ampliaciones. • Peso liviano. • Las uniones y anclajes son sencillos, la instalación requiere menos tiempo de mano de obra. • No se usan formaletas. • Practicidad para cortar y modular paneles. • Adaptabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad: no se obtiene tan rápido y fácil en todos los puntos del país, como otros materiales tradicionales. • No hay mano de obra calificada • Necesita una supervisión de mucha calidad. • No se pueden cubrir luces mayores de 4,5 m de techos y entrepisos. • Necesita refuerzo adicional para cubrir momentos que superen los momentos de diseño de los paneles • Aparición de grietas al no aplicar curado adecuado al mortero. • El costo por metro cuadrado puede ser más elevado que el de otros materiales tradicionales. • No se puede usar como estructura principal para edificaciones de más de dos niveles.

Fuente: elaboración propia.

2.3. **Sistemas constructivos con electropanel**

Como se ha mencionado con anterioridad, los electropaneles pueden tener diversas aplicaciones como en el caso de viviendas, oficinas, losas, entrepisos, entre otros. La funcionalidad de estos depende de la buena integración de los elementos. El sistema de electropanel para construcciones se compone de los paneles de poliestireno expandido y electromalla, incluyendo otros elementos como pines, esquineros, como piezas internas adicionales.

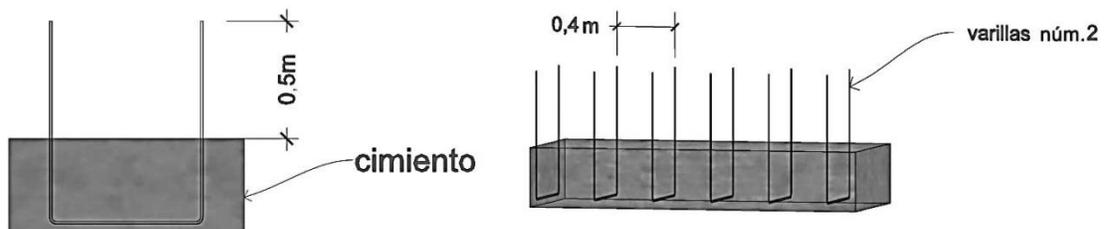
Asimismo, para la construcción es necesario contar con tendales y puntales, para dar estabilidad mientras se lleva a cabo la construcción.

2.3.1. Método de construcción e instalación

Los electropaneles se instalan de acuerdo a los siguientes pasos:

- En el cimiento donde se colocarán los paneles como muros, se dejan embebidas varillas núm. 2 de cada lado donde se ubicará el panel. Este refuerzo puede conectarse mediante ganchos, para que quede todo integrado con forma de U. La longitud que queda libre debe medir como mínimo 50 cm a partir del nivel de cimiento terminado. Estos refuerzos se colocan a cada 40 cm.

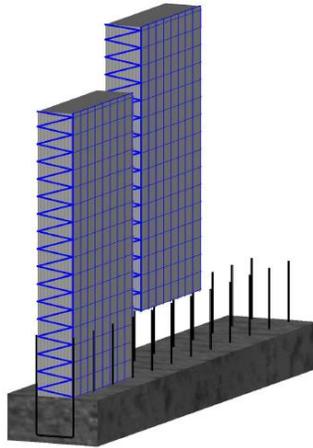
Figura 7. Detalle de cimentación



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

- Se inserta el panel en las varillas que quedan libres, las cuales se posicionan entre la malla y el poliestireno. Posteriormente se amarra con alambre.

Figura 8. **Colocación inicial de paneles**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

La unión entre paneles se hace mediante la unión de mallas en ambas caras, haciendo el amarre con alambre.

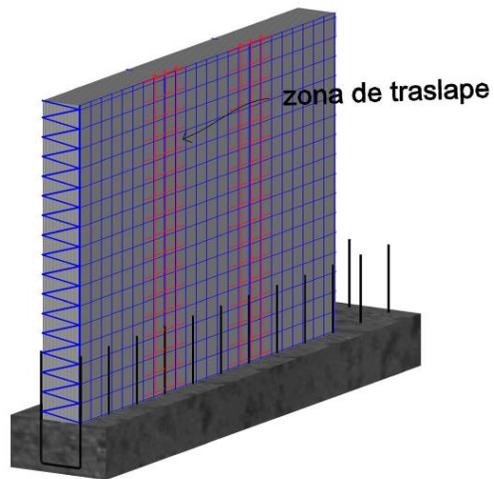
Donde A_s suministrada es menor que 2 veces la requerida por el análisis en la zona de empalme, la longitud de traslape medida entre los alambres transversales más alejados de cada refuerzo electrosoldado individual, no debe ser menor que el mayor de un espaciamiento de los alambres transversales más 50 mm, $1.5 l_d$, y 150 mm.

Donde A_s suministrada es por lo menos el doble de la requerida por análisis en la ubicación del empalme, la longitud del traslape, medida entre los alambres transversales más alejados de cada hoja de refuerzo electrosoldado, no debe ser menor que la mayor de $1.5 l_d$, y 50 mm.⁴

En las esquinas el procedimiento de traslape es el mismo, con la diferencia que se presenta un doblaje con un ángulo de 90° en la malla.

⁴ ACI 318-08. 12.9.1 y 12.9.2.

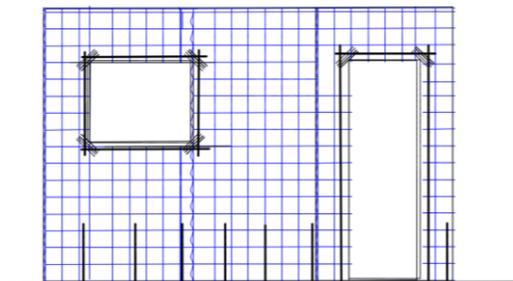
Figura 9. **Zona de traslape entre paneles**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

- Para las puertas y ventanas, se marca la sección. Luego se recortan y retiran tanto la malla como el poliestireno. Las esquinas de los marcos de puertas y ventanas, son puntos críticos que deben reforzarse con esquineros especiales de electromalla.

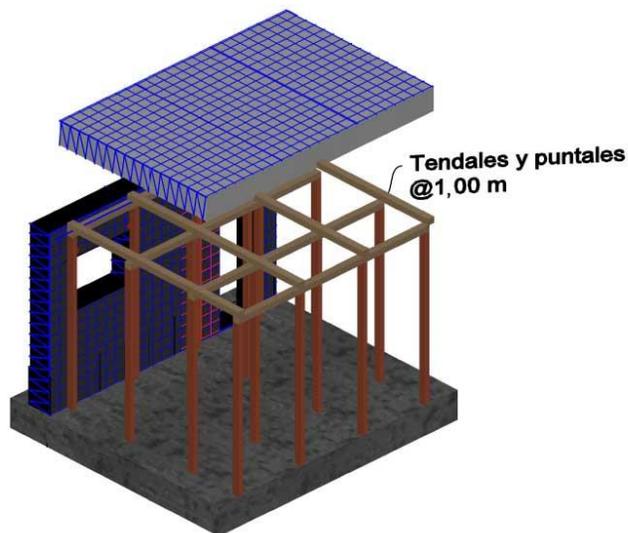
Figura 10. **Aperturas de puertas y ventanas**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

- Para colocar las instalaciones eléctricas y de agua, se marca la ubicación de las mismas. Si es necesario se corta la electromalla y con una cuchilla, soplete o pistola de calor se extrae el poliestireno. Después de colocada la instalación necesaria, debe colocarse o sustituirse la electromalla que fue cortada para esos fines.
- Se utilizan tendales en el paraleado para la losa con electropanel. Estos se colocan perpendiculares al sentido del zig-zag, sostenidos por parales a cada metro. Los parales deben dejarse por lo menos 15 días después de la integración de todo el sistema.

Figura 11. **Colocación de tendales y puntales**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Para que la colocación final de mortero tenga aplanados uniformes, previo a su aplicación se deben plomar y alinear los muros y losas.

2.3.2. Propiedades físicas y mecánicas del sistema

Los electropaneles con núcleo de poliestireno, poseen en sí mismos propiedades físicas y mecánicas, como: densidad, geometría, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, resistencia al impacto, entre otras. Sin embargo, cuando los paneles se unen para formar un sistema constructivo, sus propiedades se mantienen pero estas se adecúan a la disposición y forma que tengan los paneles.

Los paneles individuales cuentan con las características especificadas en la tabla III.

Tabla III. **Características generales de electropaneles**

CARACTERISTICAS GENERALES	
Largo:	2,44 Metros
Ancho:	1,22 Metros
Espesor de Panel	7,5 cm.
Peso de Panel	8,16 Kg.
Espesor de Monoport:	5,5 cms.
Límite de fluencia de Electromalla:	4 922 Kg/cm ²

Fuente: *Características generales de electropaneles.*

http://www.grupomonolit.com/index_empresa.htm. Consulta: marzo de 2015.

Los electropaneles se consideran como si fuera mampostería. Su capacidad compresiva se gobierna por la resistencia al aplastamiento, y la capacidad de adherencia entre unidades (capacidad en tracción).

Como material de mampostería, el diseño se puede llevar a cabo según los esfuerzos mecánicos que aporten los materiales. Esto conlleva a dos

opciones de diseño: por esfuerzos admisibles o por resistencia. El primero consiste en comparar los esfuerzos de cargas de servicio con los esfuerzos admisibles. Los esfuerzos deben ser afectados por un factor de seguridad que normalmente va entre 2,4 y 4. Estas relaciones se representan mediante la expresión.

$$\text{esfuerzos de servicio} \leq \frac{\text{esfuerzos de falla}}{\text{factor de seguridad}}$$

Por otro lado el diseño por resistencia, calcula las fuerzas axiales, cortes y momentos, mediante las cargas de servicio mayoradas. Dichas cargas se deben comparar con la capacidad nominal de los elementos, la cual se multiplica por un factor de reducción de capacidad.

$$\text{Cargas de servicio} \times \text{factor de mayoración} = \phi \times \text{capacidad nominal}$$

El comportamiento del sistema se define no solo por la consideración de las cargas y los factores de seguridad, sino por la restricción que evita que los elementos estructurales sufran grandes deformaciones. Esta propiedad es la rigidez. Para elementos de mampostería, como en el caso de los muros, se puede calcular la rigidez de la siguiente manera:

$$\text{Rigidez} = \frac{GA'}{L}$$

Donde G es el módulo del cortante, A' es el área efectiva de una sección en planta y L es la altura.

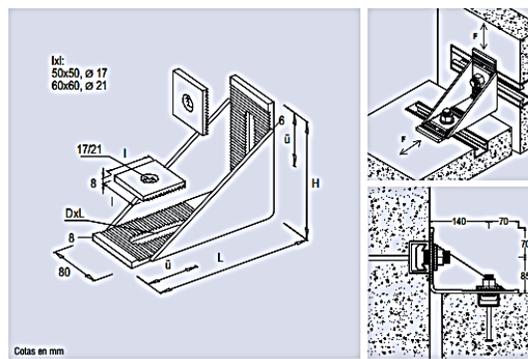
3. UNIONES ENTRE PANELES

3.1. Métodos de anclajes de uniones en prefabricados

El proceso de unión entre paneles es el punto clave de la forma y función que tome un sistema constructivo. Cuando esto sucede, los paneles deben quedar perfectamente unidos, de tal forma que trabajen como un sistema. Se debe tratar de no afectar las propiedades estructurales para las cuales fueron diseñadas.

Según el tipo de panel prefabricado que se utilice, existen varios métodos de anclaje en las uniones. Por ejemplo para algunos paneles de hormigón prefabricado, se usan angulares que poseen dentaduras y roldanas que se ajustan, restringiendo el movimiento entre paneles y manteniéndolos unidos como se muestra en la siguiente figura.

Figura 12. Angular doble



Fuente: *Angular doble*. http://www.jp-anclajes.com/gestion/images/J&P_Catalogo_fachadas_hormigon_pref_2001.pdf. Consulta: mayo de 2015.

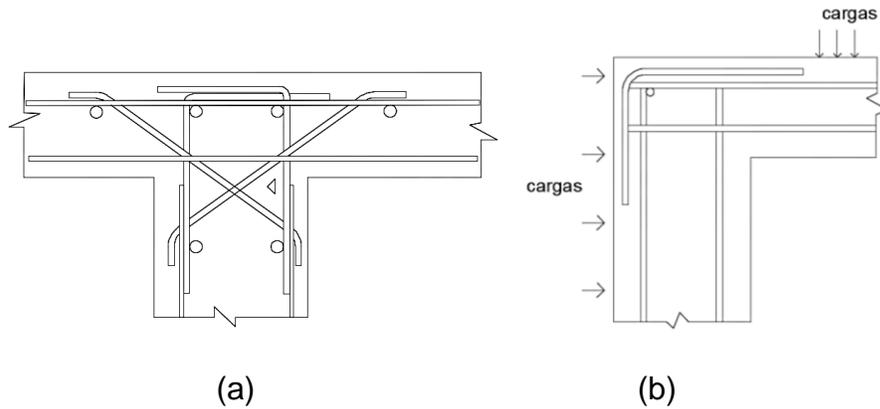
Así como este, existen varios métodos y artículos que facilitan el anclaje entre paneles. Sin embargo, estos no son aplicables a aquellos cuyos materiales no aseguran la sujeción, como es el caso del poliestireno. Para este tipo de paneles, los anclajes se constituyen por la forma en la que se disponga el acero de electromalla y las varillas adicionales que sujeten los paneles en un determinado punto de unión.

En general la unión entre paneles está dividida en dos fases. La primera es de tipo “seca”, es decir el proceso de anclaje mediante electromalla y refuerzos adicionales. En esta fase se aseguran las uniones con alambre, y se verifica la verticalidad con la plomada, así como el ángulo recto si hubiera. La segunda consiste en la integración final por medio de la aplicación del mortero.

El primer trabajo de anclaje, se da desde el trabajo de cimentación. Es ahí donde se dejan varillas con ganchos que le den estabilidad a los primeros paneles de la construcción. Los paneles adicionales que se coloquen, se unen traslapando electromalla, la cual es amarrada con alambre negro o grapas galvanizadas. Estas uniones que van de manera continua son relativamente fáciles de instalar. El cuidado especial se debe tener al momento de unir dos paneles para hacer una combinación de muro-losa, o bien en muros ortogonales, es decir que formen 90° entre sus uniones.

Para dichas uniones, el anclaje debe crear una zona de confinamiento, que logre integrar las partes involucradas. A continuación se muestran ejemplos de detalles en las intersecciones basadas en el ACI 318, los cuales se pueden adaptar de manera análoga a las uniones de electro paneles.

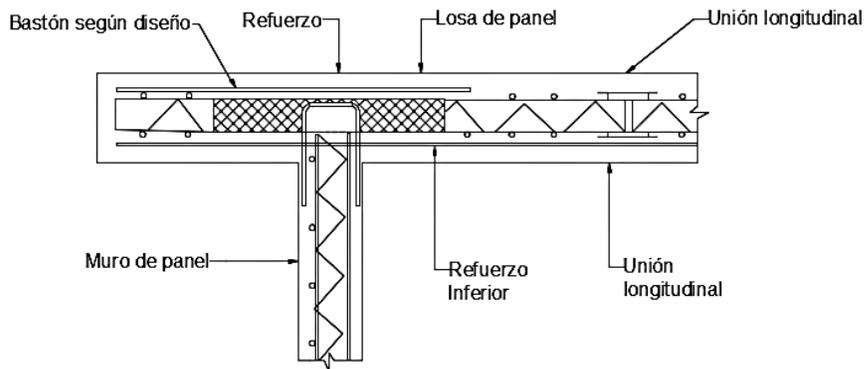
Figura 13. **Intersección para refuerzo en dos lechos**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Aplicado a los electropaneles de poliestireno expandido, el detalle del refuerzo para uniones de muro losa es el siguiente

Figura 14. **Unión muro con losa**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

3.2. Esfuerzos en las uniones

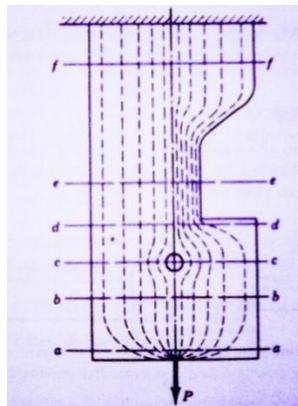
Se puede llamar esfuerzo a la fuerza por unidad de área que soporta un material. Matemáticamente se puede definir como:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde σ es el esfuerzo, P la carga aplicada y A, el área de la sección transversal. Esta ecuación es aplicable a esfuerzos simples, es decir a aquellos donde las fuerzas aplicadas pasan exactamente por el centroide de la sección. Esto sucede cuando la geometría de un elemento es regular y uniforme.

Cuando un elemento no posee una sección transversal uniforme, se obtienen resultados diferentes. Entre la línea de acción de la fuerza aplicada y el centroide de cada sección por la que pasa, existen cambios violentos en los tramos intermedios. La consecuencia de este fenómeno es que los esfuerzos se acumulan en ciertos puntos.

Figura 15. **Distribución de esfuerzos**

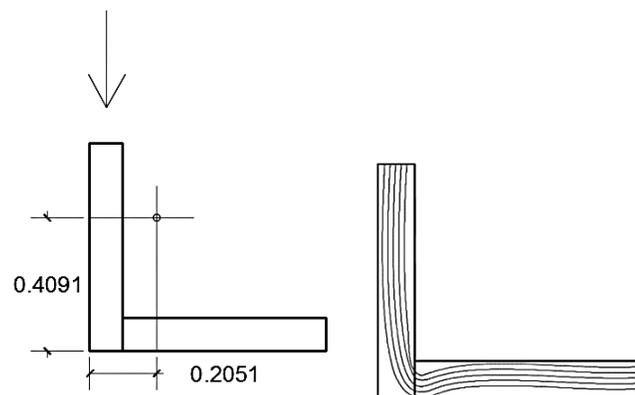


Fuente: PYTEL, Andrew; SINGER, Ferdinand L. *Resistencia de materiales*. p. 6.

En la figura anterior se muestra cómo en las secciones a-a, c-c y d-d, la distribución de esfuerzos no es la misma. Además, el agujero que se forma en c-c denota una concentración de esfuerzos.

Para el caso de las uniones que forman los paneles prefabricados, un cambio en la sección, provoca que se concentren esfuerzos, principalmente en las uniones. A continuación se presenta un ejemplo de la distribución de esfuerzos para uno de los casos investigados.

Figura 16. **Distribución de esfuerzos en perfil de esquina de unión muro-muro**



(a) Ubicación del centroide de la sección (b) distribución de esfuerzos

Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Los esfuerzos a los que están sometidas las uniones entre los paneles, están determinados por diversas acciones de carga. Además del peso propio, los paneles se ven sometidos en algunos casos a la flexión y fuerzas laterales. Estas últimas ocasionadas principalmente por viento y sismos.

3.2.1. Fenómeno de corte

El esfuerzo de corte, principalmente el cizallamiento, se produce por fuerzas paralelas al plano que las resiste. Esto significa que el esfuerzo cortante se presenta de manera tangencial. La forma de determinar el esfuerzo cortante es mediante la expresión.

$$\tau = \frac{V}{A}$$

La ecuación anterior se idealiza para esfuerzos uniformemente distribuidos, y cuyo centroide pasa por el la línea de acción de aplicación de la fuerza. Sin embargo, este valor se puede considerar como cortante medio en una sección

Para otros materiales como el concreto, el cortante se puede calcular en función de la resistencia del concreto f'_c . El ACI318 capítulo 11 establece las siguientes expresiones para calcular el cortante según las condiciones del elemento:

Para elementos sometidos a compresión axial (sistema internacional)

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \Delta \sqrt{f'_c} b_w d$$

Para elementos sometidos únicamente a cortante y flexión (sistema internacional)

$$V_c = \left(0,16 \Delta \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d^2$$

⁵ ACI 318-08. 11.2.2 y 11.2.2.1.

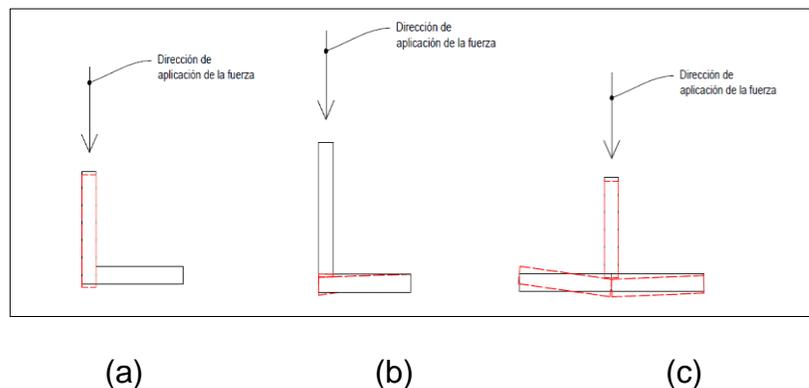
3.2.2. Fenómeno de deslizamiento

Los materiales pueden exhibir dos tipos de falla mecánica, según el material que se examine. Los casos son la deformación permanente y la rotura. Para materiales dúctiles el fallo se produce por deformación permanente, en este caso la resistencia al deslizamiento interno es inferior a la de la resistencia de separación de sus elementos. Para materiales frágiles se da el caso contrario. La resistencia al deslizamiento es mayor que la resistencia a la separación de fibras internas. En esta situación se habla de una falla por rotura.

El deslizamiento se da cuando las fuerzas externas, tienden a correr dos secciones planas paralelas. El resultado de dicho corrimiento es una magnitud llamada deslizamiento absoluto. En elementos integrados, como el sistema de electropaneles de poliestireno, el deslizamiento no solo se determina por la cualidad de los materiales, sino por disposición de los mismos y de cada panel.

Las siguientes imágenes muestran los casos posibles de deslizamiento de los paneles. La línea discontinua muestra la posición final de los paneles después de sufrir desplazamientos.

Figura 17. Desplazamientos por aplicación de carga



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Las figuras (a) y (b) representan cómo la disposición de los paneles, influye en el tipo de deslizamiento que se presente en la unión de muros en esquina. Mientras que la figura (c) muestra la reacción para una combinación de muro-muro o muro-losa.

Ante la acción de cargas externas, los elementos sufren deformaciones que son inevitables. Sin embargo, debe diseñarse un refuerzo para el cual exista una deformación máxima. De esta manera se asegurará que el sistema estructural permanezca integrado.

3.2.3. Efecto producido por un muro en un muro

La acción que se presenta ante un evento sísmico, puede desarrollarse de dos formas: en un sentido imaginario “x” o “y” de la estructura o bien en un sentido diagonal, en cuyo caso se obtendrían las componentes de la fuerza de sismo. Ante la acción de carga sísmica existe un desplazamiento relativo a la rigidez que posea cada uno de los muros. Para mantener un equilibrio se recomienda que las rigideces entre muros no varíen en más de un 20 %.

Cuando un muro excede el desplazamiento, restringido por el muro contiguo, provoca un empuje generando una concentración de esfuerzos en el muro con mayor rigidez. En este caso pueden ocurrir fallas o colapsos en los muros afectados. La forma de controlar los efectos negativos de un muro sobre otro muro, es analizando las rigideces y los posibles escenarios en los que un sismo puede afectar.

Los efectos en las uniones paralelas están totalmente ligados a las rigideces de los muros y los desplazamientos en una misma dirección. Por otro lado, en las uniones ortogonales de muros, además del desplazamiento, el

muro perpendicular puede generar un empuje que ocasione punzonamiento. Dicha acción puede generar efectos de momentos fuera del plano.

Para analizar las uniones de muros, uno de los problemas es que no se puede predecir con exactitud la dirección en que se presentará un sismo. Lo que sí es seguro es que en las uniones se presentan las mayores concentraciones de esfuerzos, debido a al vaivén del sismo. Estas razones dejan ver que las uniones no deben dejarse al azar y debe tenerse especial cuidado en el refuerzo de anclaje, con el fin de mantener la integridad de la estructura.

3.2.4. Efecto producido por un muro en una losa

En una estructura las losas son placas que pueden actuar como diafragmas que dan integridad y estabilidad. Además, absorben los efectos laterales causados por sismo o viento y los transmiten a los elementos portantes en este caso los muros.

La relación entre una losa y un muro más obvia es que la losa transmite cargas y el muro las resiste y las transmite a otro elemento, como la cimentación. Sin embargo, hay un efecto adicional, que es el que produce un muro en una losa.

Un muro recibe carga y al mismo tiempo genera una reacción para que el sistema de fuerzas esté equilibrado. En el caso de tener muros de poco espesor, la reacción del mismo actúa sobre la losa con un efecto de punzonamiento. Con un aumento significativo de carga en la región de la losa, el efecto del muro será más evidente y podrá generar efectos de corte y deslizamiento en la losa.

3.3. Fallas

Todos los materiales tienen la propiedad de resistir esfuerzos, ya sea de compresión, tensión, torsión, entre otros. Cuando se llega a un esfuerzo máximo el material se deforma permanentemente, puede romperse, agrietarse, estallar, dependiendo de los elementos y propiedades que lo constituyan. La consecuencia es la pérdida de la capacidad de resistencia. Cuando esto sucede, el material ya no es funcional según el diseño para el cuál fue creado. A este fenómeno se le llama falla.

Las fallas se pueden identificar según varíe la deformación con la aplicación de esfuerzos. Una falla dúctil es aquella que presenta deformaciones detectables durante cierto tiempo antes de llegar a la ruptura. Un ejemplo de falla dúctil se presenta en el acero que se estira lo suficiente, antes de la estricción. Por otro lado se encuentran las fallas frágiles, las cuales se presentan de manera súbita. Estas fallas se reflejan en materiales como el concreto, que tienden a agrietarse, aplastarse, y en ocasiones hasta presentan fallas de tipo explosivo. Cuando se trata de concreto armado esta falla se debe a la ausencia o poca cantidad de refuerzo.

3.3.1. Fallas superficiales

Cuando un elemento compuesto, como los paneles de poliestireno expandido, se someten a ensayos de resistencia, estos presentan múltiples casos de fallas. Los indicios de falla más evidentes se dan en la superficie, donde la señal perceptible se da con la aparición de grietas.

Es recomendable antes de realizar algún tipo de ensayo marcar las grietas ya existentes, producto de los defectos que se producen por la manipulación y

reacción de los materiales. Por ejemplo el concreto puede presentar grietas, en algunas ocasiones casi imperceptibles, debido al flujo plástico, o bien a la contracción por temperatura; efecto de un mal proceso de curado.

La combinación del concreto y el acero, ofrece ventajas en el aumento de resistencia de un elemento. Sin embargo, fuera de los límites que puedan soportar los materiales constitutivos, se dan ciertos inconvenientes. La resistencia se incrementa proporcionalmente, pero "las altas deformaciones unitarias que se provocan por altos esfuerzos dan como resultado altas deformaciones y deflexiones bajo condiciones normales de carga."⁶

Figura 18. **Deformación de losa**



Fuente: Área de estructuras CII.

Las grandes deformaciones unitarias del acero de alta resistencia, induce amplias grietas en el concreto. Este efecto se produce por la baja resistencia a la tensión que posee el concreto. Dicha tensión es inducida al someter un elemento a flexión, esfuerzos de corte, torsión, entre otras acciones.

⁶ NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto*. p. 43.

La existencia de las grietas no solo provoca poca estética sino que expone el acero de refuerzo a la corrosión por humedad y otros materiales que pudieran introducirse dentro de las mismas.

Figura 19. **Grietas en zona de tensión**



Fuente: Área de estructuras CII.

Otros fenómenos externos que se pueden apreciar en los electropaneles, son el descascaramiento y deslizamiento. El primero se produce cuando hay esfuerzos de torsión que tienen a forzar el desprendimiento de partículas. Por otro lado, el deslizamiento se observa cuando dos piezas inicialmente unidas se separan. La causa de este se da por esfuerzos de corte.

Figura 20. **Desprendimiento de material por torsión**



Fuente: Área de estructuras CII.

Figura 21. **Fallas por deslizamiento**



Fuente: Área de estructuras CII.

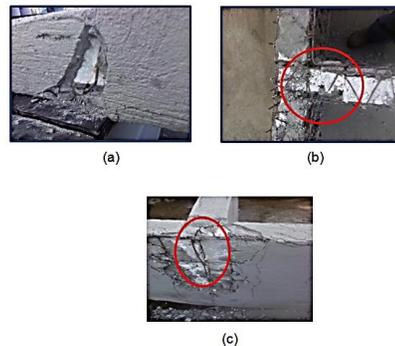
3.3.2. Fallas internas

Cuando se realiza un ensayo para un elemento compuesto por concreto, acero y otros materiales, las fallas internas son perceptibles de varias maneras. Existe aparición de grietas, deformaciones en el acero, desintegración, entre otros dependiendo del tipo de ensayo y las características de los materiales.

En el caso del acero, las propiedades y cantidad, definen su tipo de falla. En la mayoría de casos el acero no se fractura en la resistencia a flexión, a menos que la cuantía de acero sea sumamente pequeña. También sucede cuando el contenido de carbono del acero de refuerzo es elevado. Cuando el acero no fluye lo suficiente, presenta fallas frágiles que se dan súbitamente y se quiebra. Mientras se realiza el ensayo se puede determinar que existió una falla interna por el sonido característico de esta situación. Las grietas se hacen prominentes y cuando el acero ha cedido completamente, aunque se siga aplicando carga, ya no se registran valores más elevados.

A continuación se presenta un resumen de las fallas internas y evaluación que mostraron los ensayos de los electropaneles.

Figura 22. **Deformación del acero**

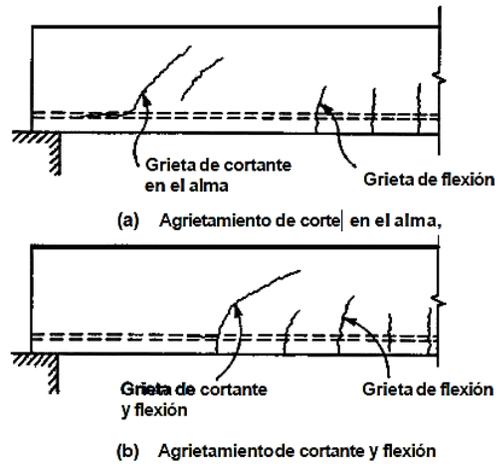


Fuente: Área de estructuras CII.

En general la electromalla mantuvo su forma original. Sin embargo, en zonas cercanas a la unión, donde se concentraron los esfuerzos, el acero se distorsionó al iniciar su punto de cedencia. En la figura 22(a) se puede observar cómo el mismo esfuerzo que deformó el acero también provocó las grietas y desprendimiento de material en la misma zona. En la figura 22 (b) se aprecia cómo el *joist* presenta aberturas mayores cercanas al nudo. Por último en la figura 22 (c) una de las barras de la electromalla que ha quedado paralela a la aplicación de la carga en la parte inferior del nudo, presenta una mayor deformación. Esto confirma que en el punto de unión fue donde se dio el esfuerzo mayor de tensión por flexión del ensayo.

Las fallas que se pueden ver en la superficie, también pueden indicar que internamente existen fallas. Un caso típico se da en las fallas por cortante, que exponen grietas a 45°, lo cual revela que falló el refuerzo a cortante o bien este no existía.

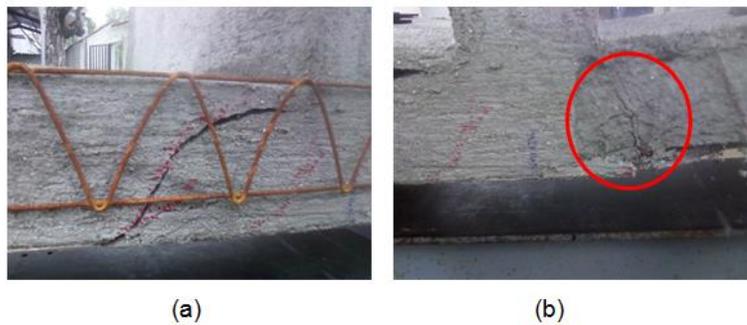
Figura 23. **Agrietamiento de tensión diagonal**



Fuente: NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto*. p. 43.

Como se puede apreciar en las siguientes imágenes, existe una falla ocasionada por cortante y flexión. Al inspeccionar en las capas internas del mortero, en la figura 24 (b) el inicio de las grietas por corte se dan precisamente en la zona cercana al nudo donde no pasa el *joist*.

Figura 24. **Falla por corte**



Fuente: Área de estructuras CII.

En el código ACI se establecen los límites de espaciamiento del refuerzo de cortante.

11.4.5.1 el espaciamiento del refuerzo de cortante colocado perpendicularmente al eje del elemento no debe exceder de $d/2$ en elementos de concreto no preesforzado, de $0,75 h$ en elementos preesforzados, ni de 600 mm.

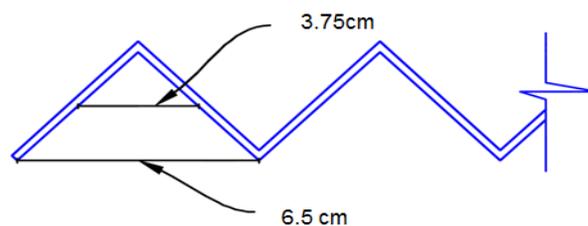
11.4.5.2 los estribos inclinados y el refuerzo longitudinal doblado deben estar espaciados de manera tal que cada línea a 45° , que se extienda hacia la reacción desde la mitad de la altura del elemento, $d/2$, hasta el refuerzo longitudinal de reacción, debe estar cruzada por lo menos por una línea de refuerzo cortante.⁷

Para el caso de los paneles el valor $d/2$ es igual a

$$\frac{d}{2} = \frac{10 \text{ cm} - 2,5 \text{ cm}}{2} = \frac{7,5 \text{ cm}}{2} = 3,75 \text{ cm}$$

En la realidad la distancia entre dos porciones del *joist* con dirección opuesta es de 3,75 cm y al centro entre dos con dirección paralela es de 6,5 cm, cumpliendo de esta manera con el requerimiento.

Figura 25. **Espaciamiento de refuerzo a corte**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

⁷ ACI 318-08. 11.4.5.

En su estructura interna, la cohesión entre agregados y material cementante, pueden fallar. Esto depende de la calidad de los componentes y la dosificación en la mezcla de concreto que se haya diseñado. La característica de esta falla se puede distinguir mediante el efecto de dovela. El desprendimiento entre partículas genera una curvatura. En la figura 26 se aprecia el mencionado efecto observado durante la realización del ensayo.

Figura 26. **Efecto de dovela**



Fuente: Área de estructuras CII.

Parte de la evaluación realizada en los electropaneles, fue hacer un reconocimiento interno, de aquellas observaciones externas que llamaron especial atención. A continuación se muestra el detalle del examen realizado y la información obtenida.

Se tomó como referencia la ubicación de grietas mayores, grietas menores y un punto que no tuviera grietas. Es destacable que las grietas de mayor dimensión se prologaron a lo largo de la unión entre los paneles y disminuyeron con forme se alejaba de dicha unión.

Figura 27. **Diagnóstico externo-interno**



Fuente: Área de estructuras CII.

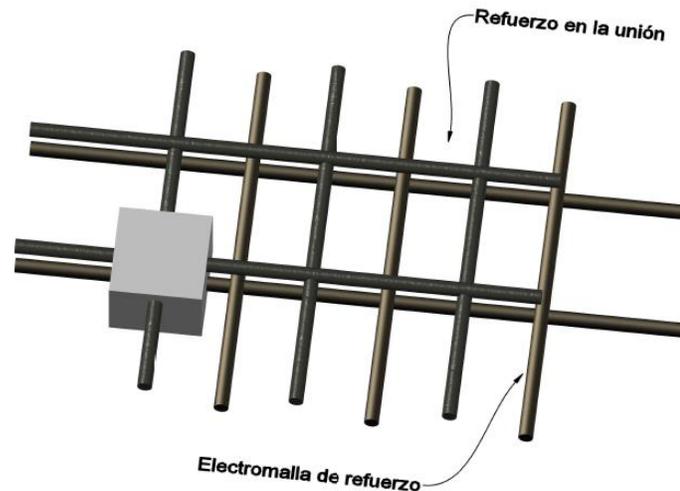
Tabla IV. **Profundidad de recubrimiento al refuerzo**

Grupo	Profundidad hasta el refuerzo
1	varilla A (horizontal) 21 mm varilla B (vertical) 17 mm
2	varilla B (vertical) 14 mm
3	varilla B (vertical) 12 mm
4	varilla B (vertical) 17 mm
5	varilla A (horizontal) 22 mm

Fuente: elaboración propia.

Las medidas de la tabla 3.1 fueron tomadas según el siguiente esquema, donde las varillas de A representan el refuerzo básico de los paneles y las varillas de B son las secciones del refuerzo adicional colocado en las uniones.

Figura 28. **Detalle de superposición de refuerzo**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

De la información obtenida se tiene que la diferencia entre el grosor de capas del mortero varía en aproximadamente un 20 %. Por otro lado en toda la sección de varillas B, la diferencia de profundidad de mortero varía entre el 14,28 % y el 29,4 %. La falta de uniformidad que presenta el mortero hace que cuando existan esfuerzos de tensión, se agriete más fácilmente en las zonas delgadas y cercanas al refuerzo.

4. ENSAYOS

4.1. Evaluación previa

Un ensayo es una prueba que permite, en el caso del presente trabajo, investigar el comportamiento de los materiales como un sistema ante ciertos esfuerzos. De esta manera se puede determinar si la muestra funciona o cumple con las expectativas deseadas.

La finalidad de realizar varios ensayos es la de encontrar las fortalezas y debilidades del sistema de los materiales ante diferentes escenarios de trabajo. Conforme se encuentran los puntos frágiles se obtiene una pauta para mejorar y hacer más eficiente un sistema. Los resultados óptimos se obtienen del cuidado especial no solo de la ejecución del ensayo, sino de las condiciones previas que influyen directamente en los efectos.

4.1.1. Estado de las uniones sin ensayar

La historia sobre un objeto de interés, sobre todo por la experiencia en cuanto a la evaluación sobre sistemas constructivos con el que se cuenta en el laboratorio de estructuras del centro de investigaciones, es un material valioso. Contar con los datos iniciales y el procedimiento que llevo a un producto final, permite entender y predecir un comportamiento. Los materiales de construcción no se excluyen de dicho concepto. La forma en que se construyen y combinan paneles, que incluye técnicas, materiales, condiciones climáticas, entre otros, dice mucho sobre la resistencia de los mismos.

La evaluación de uniones entre paneles, debe es holística. Es decir que al realizar la evaluación, no se reduce el análisis únicamente al punto de unión. El comportamiento de la unión será el resultado de la interacción de todas las propiedades que influyen en ella. Así que no basta con puntualizar, sino que hay que entender qué es lo que sucede alrededor, cuál es el resultado de todos los materiales como un solo sistema.

Para evaluar las distintas uniones de paneles, se creó una lista de cotejo. En ella se enlistan los principales defectos, que se pueden inspeccionar por simple observación antes del ensayo. Estos aspectos se enfocaron en el concreto, debido a que la exposición principal es la del mortero de recubrimiento de los paneles.

Nomenclatura:

A= demasiado **B**= mucho **C**= regular **D**= poco **E**= nulo

Tabla V. **Evaluación de uniones previo ensayo**

Defecto	Evaluación
Variación del color	B
Agrietamiento fino	D
Levantamiento de polvo	E
Astillamiento	C
Daños por lluvia	E
Eflorescencia	E
Segregación	E
Ampollas	E

Fuente: elaboración propia.

Algunas de las características anteriormente evaluadas pueden tener efectos más perjudiciales que otras. En el primer caso, la variación del color, se da cuando las condiciones de curado son disparejas o variables. Este fenómeno

se explica en el caso de los paneles debido a que la técnica de aplicación de mortero es por capas, que pudieron no tener el suficiente tiempo de fraguado entre una y otra. Además de esto algunas de las sombras presentes en los paneles, son el reflejo de la humedad que absorbieron los paneles por la exposición a la lluvia.

Figura 29. **Humedad en los paneles**



Fuente: Área de estructuras CII.

El agrietamiento fino es debido a la contracción en el concreto, por cambios de temperatura en el proceso de fraguado. Este tipo de grietas pueden ser aceptables en términos de la resistencia, pero afectan la estética del acabado, y a partir de ellas se pueden derivar otros problemas, como ingreso de humedad u otros, que dañen el mortero y el núcleo de los paneles.

Los bordes presentaron zonas de astillamiento. Existe debilidad y las esquinas tienden a agrietarse y romperse, especialmente por la manipulación de los paneles en su terminación y traslado. Otro factor que influye en el

astillamiento, es el peso propio del material. En la base de los paneles se presentan mayores secciones defectuosas.

Las condiciones anteriormente mencionadas, fueron las sobresalientes en la evaluación. Ningún panel en sus diferentes tipos de unión presento otros defectos, como: eflorescencia, daños por lluvia, segregación, ampollas o levantamiento de polvo.

4.1.2. Condiciones de construcción de las uniones

Los paneles fueron construidos durante mayo y junio de 2014 (inicio de época lluviosa en Guatemala), en el patio de trabajo del área de prefabricados. Su construcción se basó en las siguientes condiciones:

- Unión ortogonal: cada uno de los elementos que se unen forman un ángulo de noventa grados. Esta aclaración es importante en la delimitación del estudio, pues dependiendo de la arquitectura para la aplicación, existen casos especiales donde las uniones pueden formar ángulos que no sean rectos. Además, la unión ortogonal es la más típica en la construcción.
- Materiales livianos: uno de los objetivos de utilizar paneles prefabricados, es aligerar el peso por carga muerta. Para ello es indispensable que la construcción de paneles, cuente con materiales que cumplan estos requisitos. En la elaboración se utilizó un núcleo de poliestireno expandido, un mortero de concreto celular y un refuerzo de electromalla.⁸

⁸ Ver descripción detallada de los materiales en el capítulo 2.

- Escala: inicialmente los paneles se construyeron con medidas de 1,25 m de la sección más larga, 1,25 m de altura y 0,85 m de la sección que intersectaba. Sin embargo, estas se modificaron, ya que debido al peso y el tamaño, se dificultaría demasiado el traslado de los paneles al marco donde serían ensayados. Además, las dimensiones complicarían la adecuación del marco para realizar el ensayo.

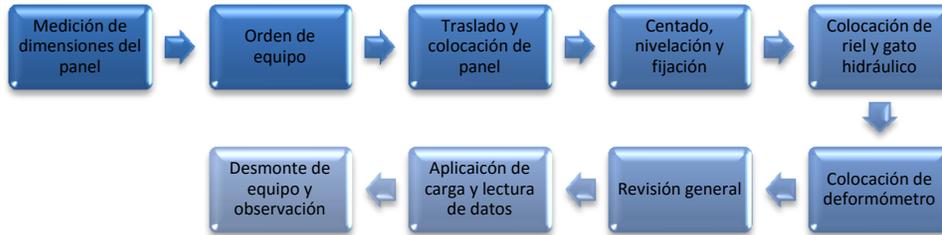
Estos peligros podrían haber ocasionado daños en los paneles antes de ser ensayados, que influirían en los resultados. Finalmente las medidas adoptadas, fueron en promedio de 1,25 m de largo, 0,70 m de altura y 0,85 m de elemento de intersección para uniones con forma de T y 0,70 m de largo, 0,82 m de alto y 0,65 cm de elemento de intersección para uniones en forma de L o de esquina.

4.2. Preparación de los ensayos

La preparación de ensayos lleva una serie de procedimientos ordenados, que deben realizarse cuidadosamente. El objetivo no es solo colocar los paneles, aplicar carga y recolectar datos, sino mantener en todo momento la seguridad del personal que realiza el ensayo. Asimismo, es necesario mantener la estabilidad e integridad de los paneles, para que la información recolectada sea la correcta. Por otro lado, la observación y vigilancia de principio a fin, es indispensable para notar cuando se presente una situación de peligro, o que pueda provocar daños en el equipo utilizado.

Para cada ensayo de las uniones entre paneles se realizó el siguiente procedimiento:

Figura 30. Pasos para realizar ensayo

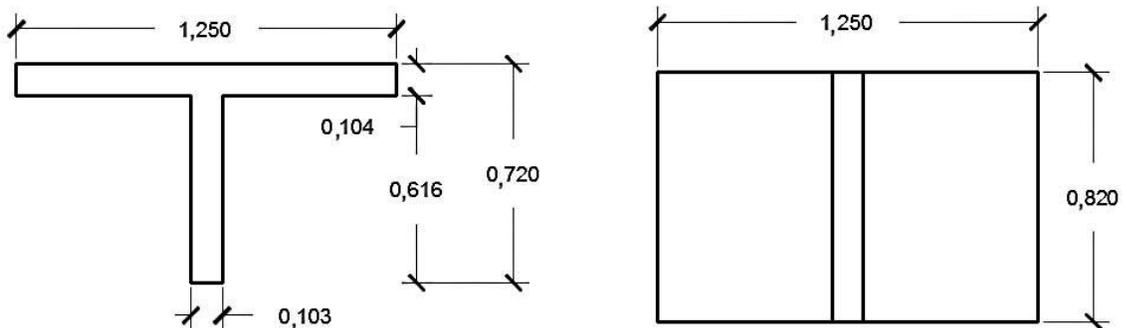


Fuente: elaboración propia.

El primer paso para llevar a cabo los ensayos consistió en observar todas las uniones de paneles y tomar las medidas correspondientes. A continuación se muestran los esquemas de cada tipo de unión, con las dimensiones en metros.

- Ensayo 1 muro-losa

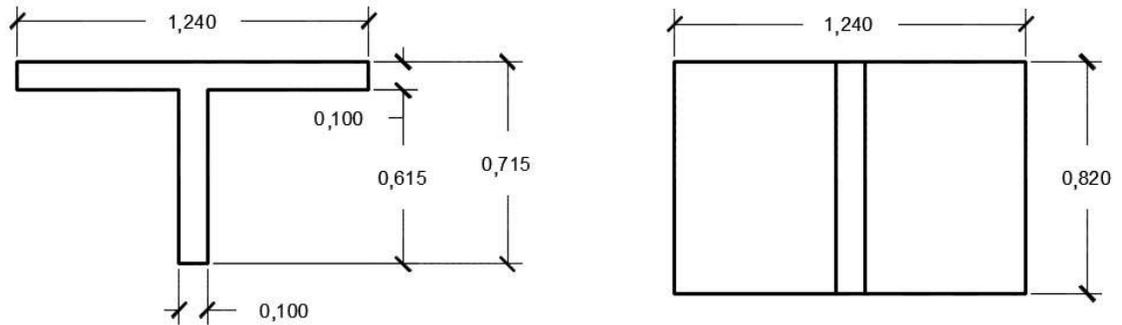
Figura 31. Dimensiones de ensayo 1



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

- Ensayo 2 muro-losa

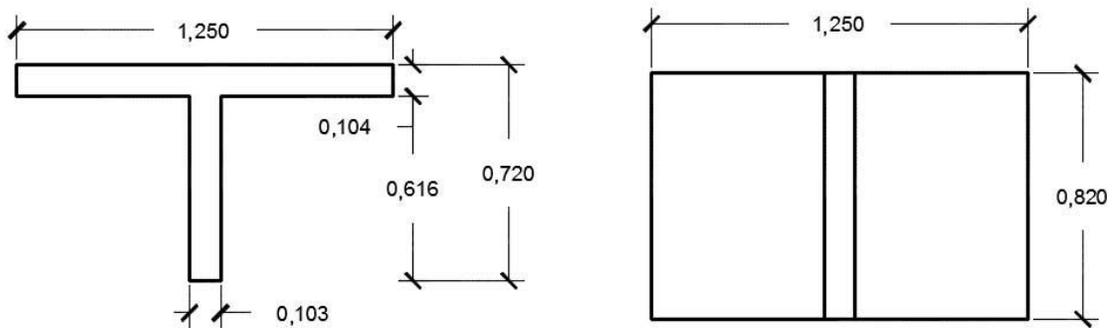
Figura 32. Dimensiones de ensayo 2



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

- Ensayo 3 muro-muro

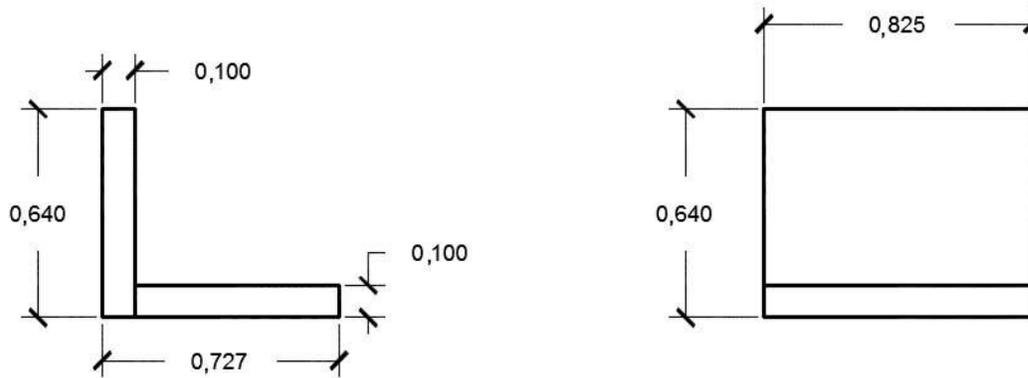
Figura 33. Dimensiones de ensayo 3



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

- Ensayo 4 muro-muro

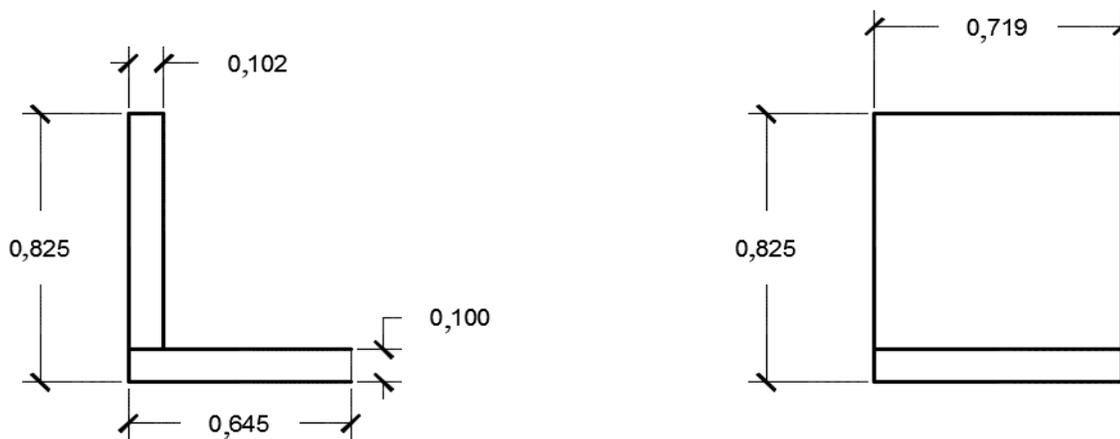
Figura 34. Dimensiones de ensayo 4



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

- Ensayo 5 muro-muro

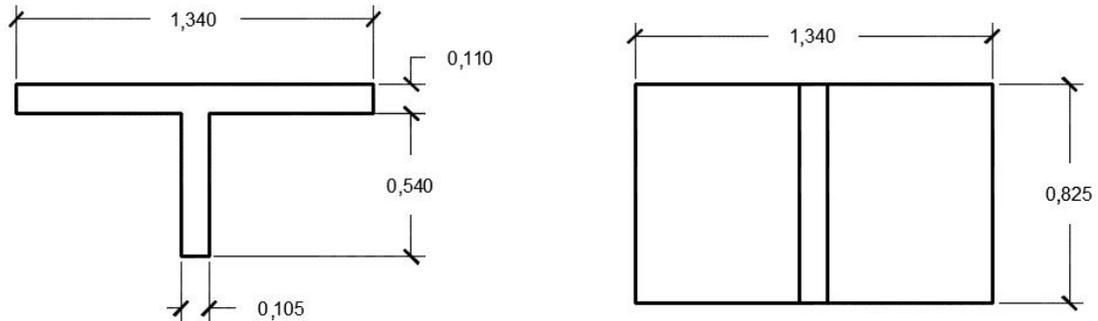
Figura 35. Dimensiones de ensayo 5



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

- Ensayo 6 muro-losa

Figura 36. Dimensiones de ensayo 6



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El siguiente paso consistió en prever el equipo necesario y organizarlo para tenerlo listo en el momento que fuese necesario. Tal es el caso de la bomba y gato hidráulico (ENERPAC modelo RC 102), que fue utilizado para la aplicación de la carga. Además de ello se utilizaron las siguientes herramientas y accesorios:

- Platinas
- Sargentos
- Neopreno
- Riel
- Deformómetro
- Nivel
- Macho
- Achuela
- Tenazas

- Cinta métrica
- Crayones
- Plomada

Con todos los implementos listos, se procedió al traslado de la unión de paneles. Esta se colocó sobre el marco y se centró, con la ayuda de crayones de cera se marcaron las grietas iniciales y se señaló los centros y dirección de aplicación de la carga. Debido a algunas imperfecciones en la superficie de los paneles, se utilizó franjas de material elastomérico (comúnmente conocido por la marca de Neopreno) para lograr allanar, se utilizó nivel y con la ayuda de una plomada se verificó la verticalidad.

Figura 37. **Avance de la colocación de uniones para ensayar**



Fuente: Área de estructuras CII.

Para evitar que ocurriera volteo o corrimientos de la unión, se colocaron cuatro sargentos, uno en cada esquina del panel inferior. Estos sirvieron de sujeción y ayudaron a crear una condición de empotramiento, similar a la que tendrían si el muro (o losa) continuara y existiera una unión próxima. Se colocó platinas entre el panel y cada sargento para evitar que estos se hundieran en el panel y lo dañaran.

Figura 38. **Sujeción con sargentos**



Fuente: Área de estructuras CII.

La aplicación de carga, lleva cuidado especial. Por esta razón se colocó un riel para que mantuviera la uniformidad de la carga a lo largo de la sección analizada. Además, debajo del gato hidráulico se colocaron piezas metálicas circulares de un tamaño mayor que el riel, de manera que los centros coincidieran. Así se logró mantener la posición y asegurar que cuando se incrementara la carga el gato hidráulico no resbalara.

Para determinar la deformación causada por la aplicación de carga, se utilizó un deformómetro que se colocó en el centro de la pieza inferior de la unión. Con todos los implementos en su lugar, se verificó que todo fuera seguro y se procedió a aplicar carga gradualmente y tomar la lectura de la deformación. Se observó cuidadosamente la aparición de grietas y el sonido del acero de la electromalla, pues eran indicios de las fallas y la capacidad del mortero y refuerzo.

Figura 39. **Observación de fallas**



Fuente: Área de estructuras CII.

Finalmente se desmontó el equipo, se retiró la unión y se hizo observaciones. Para inspeccionar mejor las fallas se retiró parte del mortero y se midieron las capas, también se dividieron las uniones y se verificó el armado.

Figura 40. **Verificación de armado**

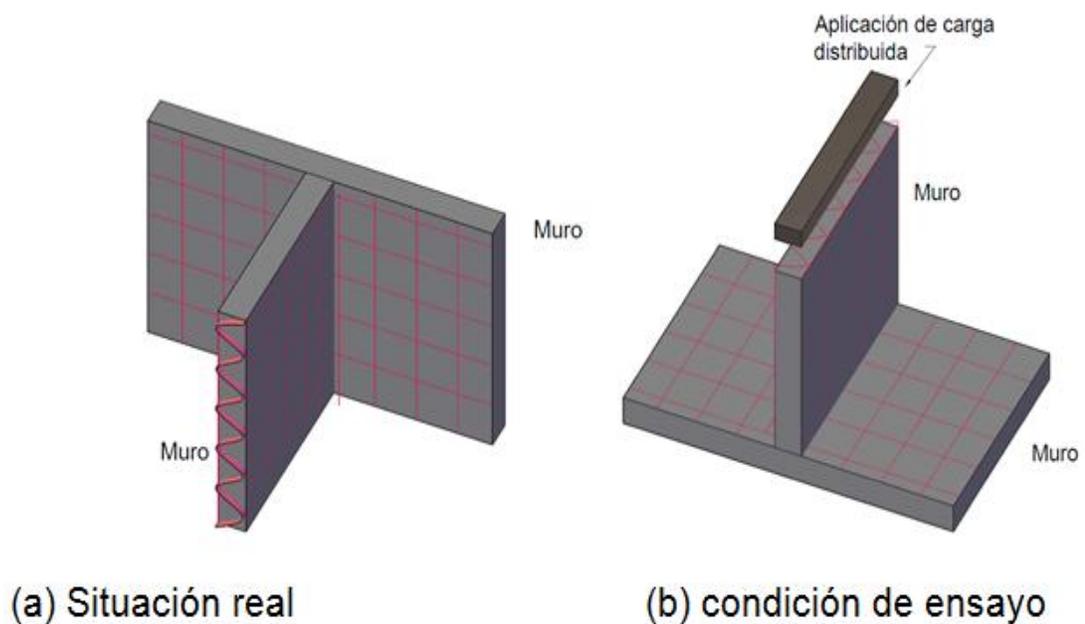


Fuente: Área de estructuras CII.

4.3. Ensayo de unión entre muros en forma de T

La unión entre muros en forma de T se da cuando hay una intersección perpendicular de un muro entre una sección intermedia de otro muro. Para ensayar este caso se realizaron según el esquema que se muestra a continuación. Se aplicó carga distribuida a uno de los muros para medir la influencia de la misma en el muro ortogonal. Los extremos del muro que resistía la carga fueron restringidos para simular la continuidad.

Figura 41. Unión entre muros en forma de T

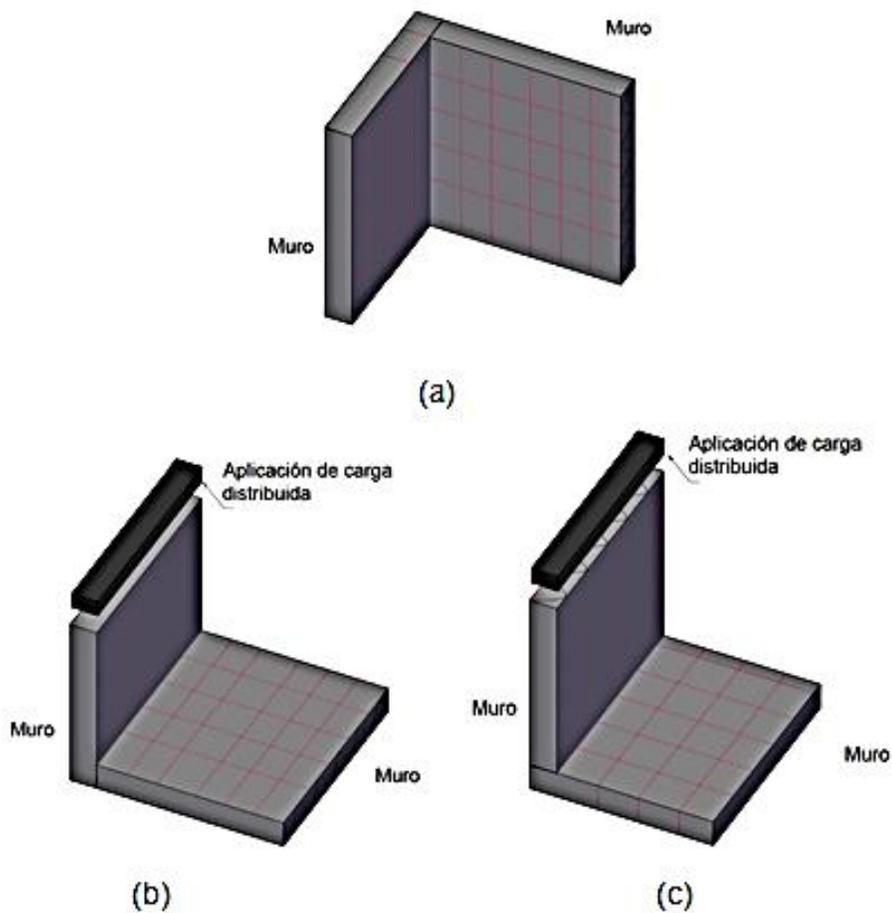


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

4.4. Ensayo de unión entre muros en forma de L o esquina

Una unión de esquina es aquella en la que un muro intersecta el inicio (o final) de otro muro. Dependiendo de la forma de aplicación de la carga se realizaron dos ensayos, que se ilustran a continuación.

Figura 42. Unión entre muros en forma de L o esquina



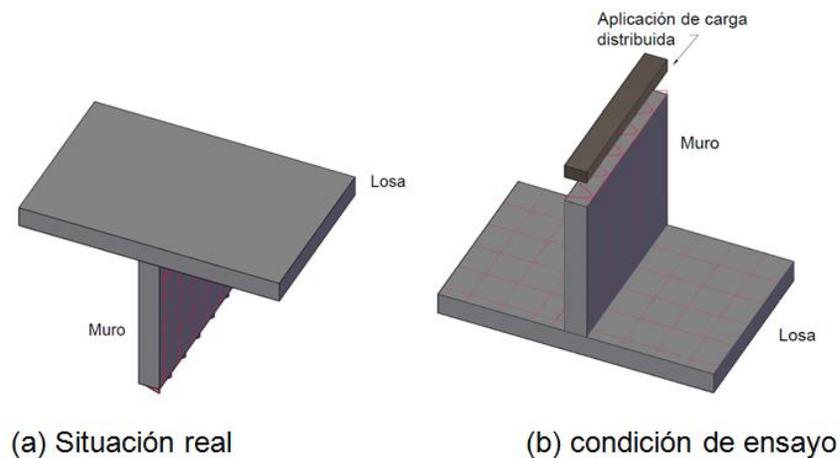
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

La figura 4. (b) es la representación de la aplicación de carga a un muro que no está directamente sobre el muro que lo resiste, mientras que en la figura 4. (c) se da el caso en el que el muro que recibe la carga esta sobre el otro muro. Se tomaron los dos casos ya que ante un evento sísmico la carga se pude dar en cualquiera de los dos sentidos.

4.5. Ensayo de unión entre muro y losa en forma de T

Se identifica como forma de T a la unión de muro-losa cuando un muro está debajo de una losa en cualquier sección intermedia de la misma. Para fines de ensayo esta situación se invirtió, dejando la losa debajo y aplicando carga al muro. Con este procedimiento se buscó ejemplificar cómo reaccionan los materiales que conforman los paneles, con sus dimensiones características al generar este tipo de unión.

Figura 43. Unión entre muro y losa en forma de T



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

4.6. Análisis de resultados

Durante la realización de las seis experiencias, se tomaron valores de deformación, carga y observaciones significativas. Los resultados fueron resumidos en tablas que sirvieron de base para generar gráficas de carga contra deformación. Los ensayos fueron analizados de forma individual, haciendo las anotaciones correspondientes al comportamiento de cada uno de los materiales que conformaron el sistema de la unión.

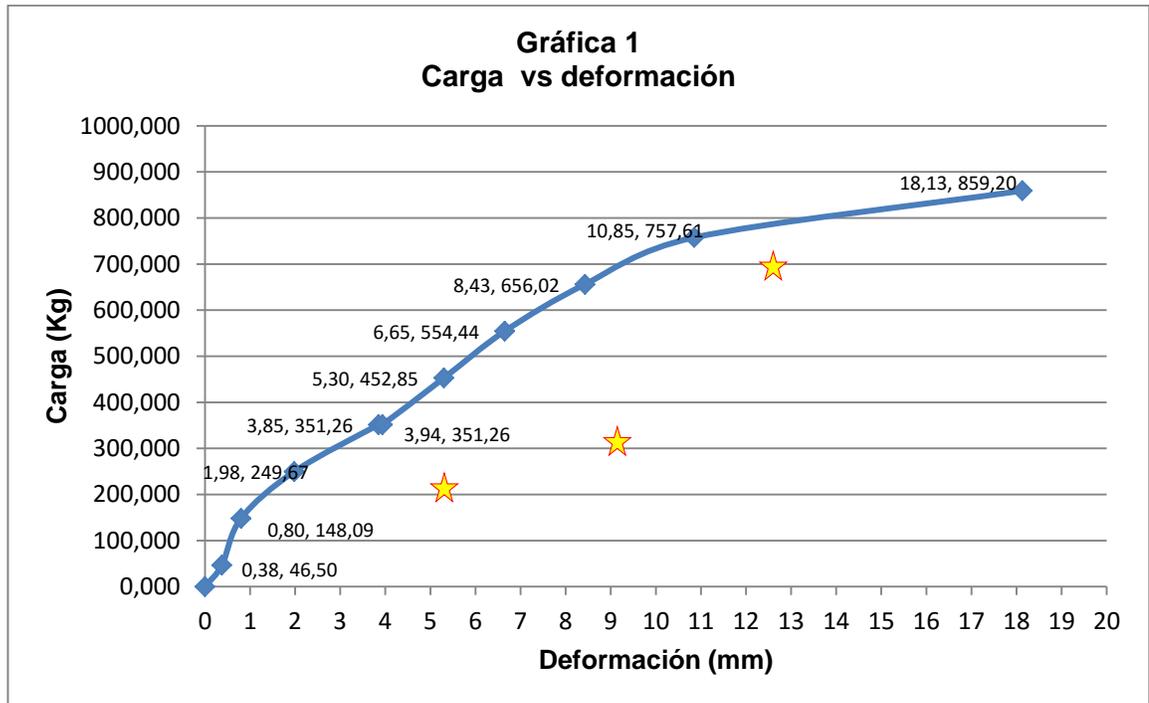
A continuación se desglosan los resultados de cada ensayo.

Tabla VI. **Ensayo 1 para unión muro-losa en forma de T**

Deformación (mm)	Carga (Kg)	Observaciones	Carga distribuida (kg/m)
0	0,00		0
0,375	46,50		56,70
0,8	148,08		180,59
1,98	249,67	falla grieta al centro	304,48
3,85	351,26	nuevas grietas	428,36
3,935	351,26	no se incrementó carga	428,36
5,3	452,85		552,25
6,65	554,44		676,14
8,43	656,02		800,02
10,85	757,61		923,91
18,13	859,20	Carga máxima	1 047,80

Fuente: elaboración propia.

Figura 44. Gráfica de carga vs. deformación ensayo 1



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

Se puede apreciar de la gráfica 1 tres puntos especiales (marcados con una ★). Estos indican los límites de trabajo de los tres materiales que configuran los electropaneles. En el primer punto con una deformación de 1,98 mm y una carga de 249,67 Kg, se presentó la primera grieta en el concreto. Lo cual indica que el concreto ha fallado y deja de trabajar dándole lugar al siguiente material: la electromalla para resistir los esfuerzos.

El segundo punto mostró un interesante comportamiento. La electromalla tiene un punto de fluencia y entra en su zona plástica de endurecimiento por estricción. Existe una deformación mínima (0,09 mm) y la carga no se incrementa. Esto demuestra la poca fluencia del acero en ese punto, por su alta

resistencia. Luego la carga sigue aumentando debido al trabajo que resiste el *joist* y parte de lo que queda de la electromalla, hasta llegar al punto de carga máxima.

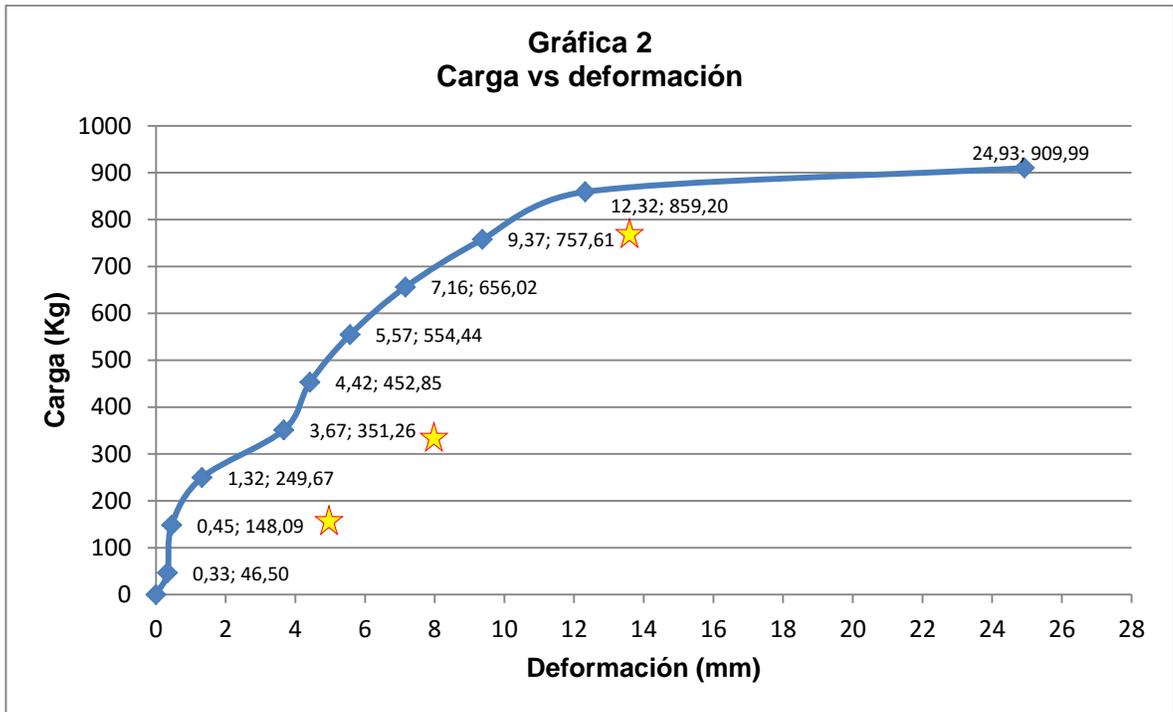
En todo el proceso el concreto jugó un papel importante. A pesar de haber disminuido su resistencia, ayuda a mantener la integridad de la electromalla y el *joist* alrededor del núcleo de poliestireno.

Tabla VII. **Ensayo 2 para unión muro-losa en forma de T**

Deformación en mm	Carga en kg	Observaciones	Carga distribuida Kg/m
0	0		0
0,33	46,50		56,71
0,45	148,09		180,59
1,32	249,67	primeras grietas	304,48
3,67	351,26		428,37
4,42	452,85		552,26
5,57	554,44		676,14
7,16	656,02		800,03
9,37	757,61		923,92
12,32	859,20		1 047,80
24,93	909,99	Carga máxima	1 109,75

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Gráfica de carga vs. deformación ensayo 2**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

La gráfica 2 representa el comportamiento mecánico de la unión entre un muro y una losa en forma de T, similar a la gráfica 1. Es destacable que la primer marca de la gráfica 1 donde se presenta la falla del mortero, es de 1,98 mm de deformación y 249,67 Kg de carga, mientras que para la gráfica 2 los valores son de 1,32 mm y 249,67 Kg respectivamente. La diferencia de deformación entre ambas muestras fue de 0,66 mm, en el mismo valor de carga. Este fenómeno se debe a la forma de la colocación del recubrimiento.

La segunda marca muestra el fin del trabajo exclusivo para la electromalla para una deformación de 3,67 mm y una carga de 351,26 Kg. Valor que en la gráfica 1 representa una deformación entre 3,94 mm y 3,85 mm para el mismo

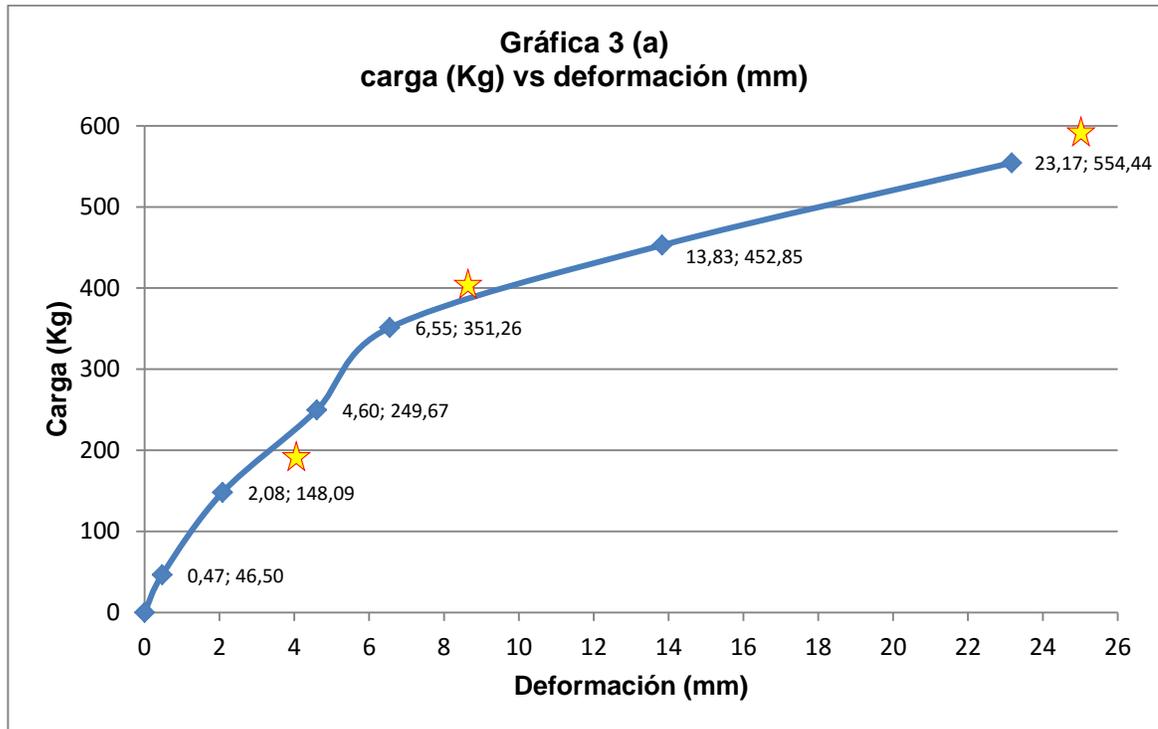
valor de carga. Entre la segunda y tercera marca, se da el rango en el que trabajan juntos joist y electromalla para resistir los esfuerzos. La tercera marca está conformada por una deformación de 9,37 mm y una carga de 757,61 Kg. (En la gráfica 1 los valores en dicha marca son de 10,85 mm y 757,61 Kg.) Después de estos valores se da un aumento de carga hasta la ruptura del sistema en el punto 24,939 mm, 909,99 Kg.

Tabla VIII. **Ensayo 3 para unión muro-muro en forma de T**

Deformación (mm)	Carga (Kg)	Observaciones	Carga distribuida (kg/m)
0	0		0
0,47	46,50		56,70
2,08	148,08	pequeñas fisuras	180,59
4,6	249,67		304,48
6,55	351,26	Aparición de grietas	428,36
13,83	452,84		552,25
23,17	554,43		676,14

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Gráfica de carga vs. deformación ensayo 3 (a)

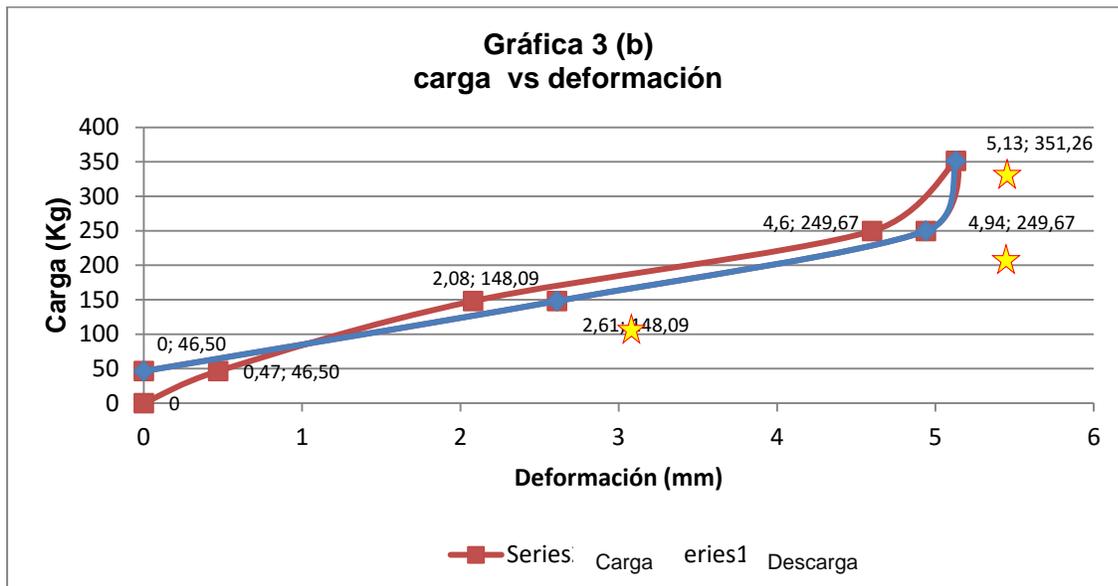


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

En esta gráfica se registraron los valores para el ensayo de una unión entre muros en forma de T. Los datos están seccionados en tres partes, que ejemplifican el trabajo realizado por cada uno de los materiales: mortero, electromalla y *joist*. El primer punto de fluencia se da para una carga de 148,09 Kg y una deformación de 2,08 mm. La aparición de grietas a partir de ese punto indica que el mortero ha fallado y se inicia el trabajo de la electromalla hasta una carga de 351,26 Kg con una deformación de 6,55 mm. En el último tramo de carga el trabajo es realizado por parte de la electromalla y ayudado por el *joist*.

En este procedimiento se evaluó el comportamiento del sistema al retirar la carga. Los resultados se muestran en la siguiente gráfica.

Figura 47. **Gráfica de histéresis de carga y descarga vs. deformación ensayo 3 (b)**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

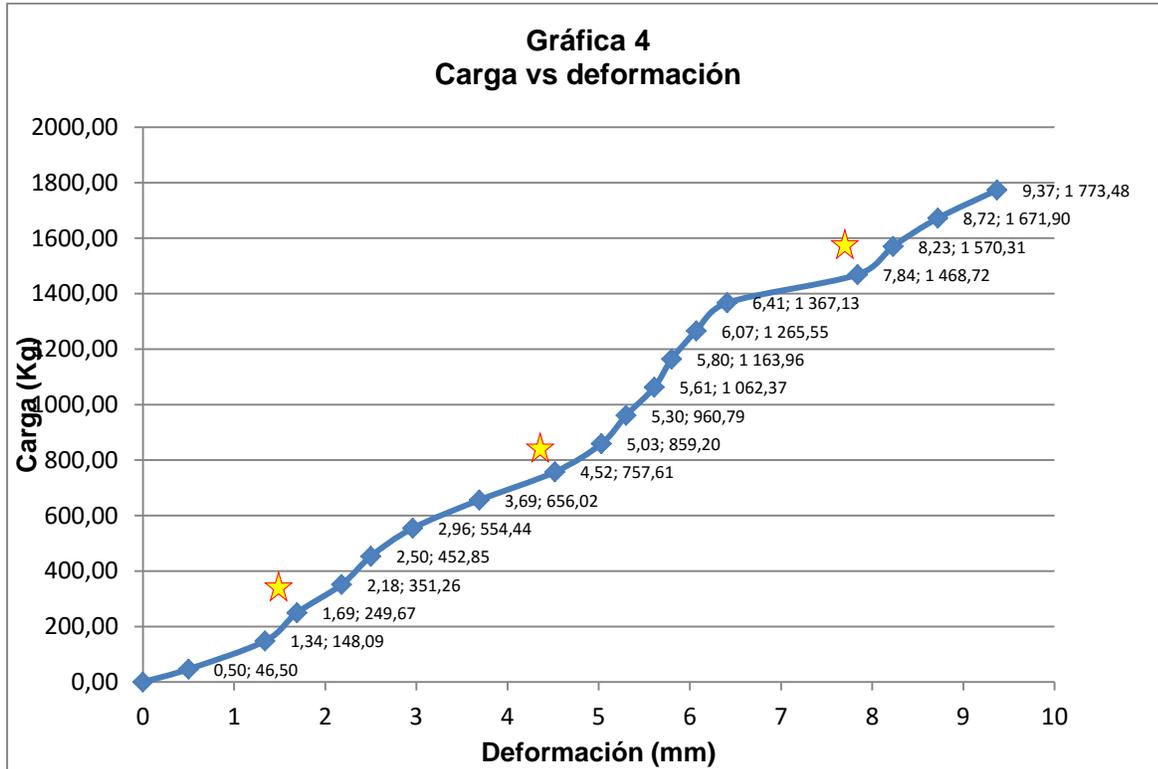
Esta gráfica muestra cómo al descargar la unión, esta regresa a su posición inicial con una deformación de 0 mm. La similitud de cambio de pendiente entre los tres puntos establecidos inicialmente, denota la elasticidad del sistema y la capacidad de los materiales de regresar a su estado inicial. El punto (0, 46,50) correspondiente a la zona de trabajo del mortero, significa que aunque el sistema tenía una carga de 46,50 Kg, ya había retornado completamente.

Tabla IX. **Ensayo 4 para unión muro-muro en forma de L**

Deformación (mm)	Carga (Kg)	Observaciones	Carga distribuida (kg/m)
0	0,00		0,00
0,5	46,50		56,36
1,34	148,09		179,50
1,69	249,67	fisuras	302,64
2,18	351,26		425,77
2,5	452,85		548,91
2,96	554,44		672,04
3,69	656,02		795,18
4,52	757,61		918,32
5,03	859,20		1 041,45
5,3	960,79		1 164,59
5,61	1 062,37		1 287,72
5,8	1 163,96		1 410,86
6,07	1 265,55		1 534,00
6,41	1 367,13		1 657,13
7,84	1 468,72		1 780,27
8,23	1 570,31		1 903,41
8,72	1 671,90		2 026,54
9,37	1 773,48		2 149,68
	1 875,07		2 272,81
	1 976,66		2 395,95
	2 078,25		2 519,09
	2 179,83		2 642,22
	2 281,42		2 765,36
	2 433,80	Carga máxima	2 950,06

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Gráfica de carga vs. deformación ensayo 4**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

El ensayo 4 se realizó para una unión de muros de esquina o en forma de L. La principal observación es que comparado con el ensayo 3 (unión de muros en forma de T), se registraron valores de carga mayores para deformaciones similares. Por ejemplo en el ensayo 3 para una deformación de 6,55 mm se tuvo una carga de 351,26 Kg, mientras que para el ensayo 4 para una deformación de 6,41 mm la carga fue de 1 367,13 Kg, aproximadamente 4 veces la carga de la unión en forma de T. Esta diferencia se debe a la geometría y posición de carga de los elementos. En este caso por ser un elemento de menores dimensiones, fue más rígido y resistió mayores esfuerzos con menor deformación.

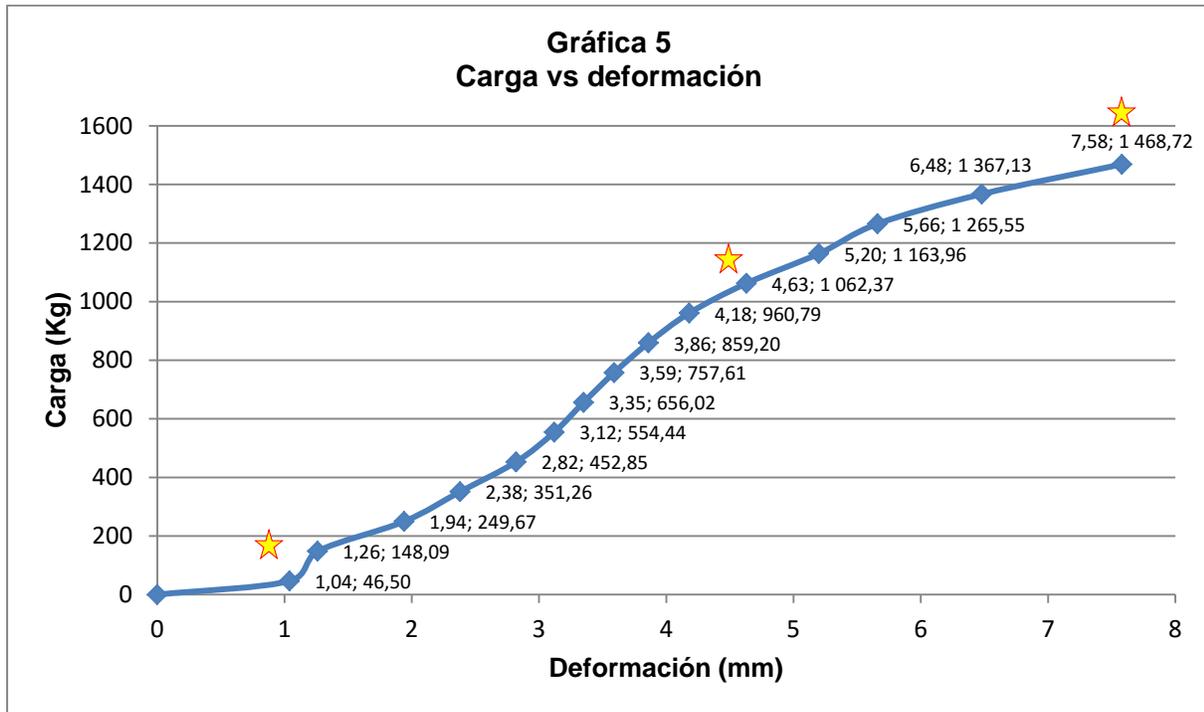
Por otro lado, la tendencia de trabajo de los materiales se mantiene. Existe una segmentación de la gráfica por el trabajo de los tres materiales que aportan la mayor resistencia a los paneles, tal como se observa en las gráficas anteriores.

Tabla X. **Ensayo 5 para unión muro-muro en forma de L**

Deformación (mm)	Carga (Kg)	Carga distribuida (Kg/m)
0	0	0
1,04	46,5	64,67
1,26	148,08	205,96
1,94	249,674	347,25
2,38	351,26	488,54
2,82	452,84	629,83
3,12	554,43	771,12
3,35	656,02	912,41
3,59	757,61	1 053,70
3,86	859,19	1 194,99
4,18	960,78	1 336,28
4,63	1 062,37	1 477,57
5,20	1 163,96	1 618,85
5,66	1 265,54	1 760,14
6,48	1 367,13	1 901,43
7,58	1 468,72	2 042,72

Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Gráfica de carga vs. deformación ensayo 5**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

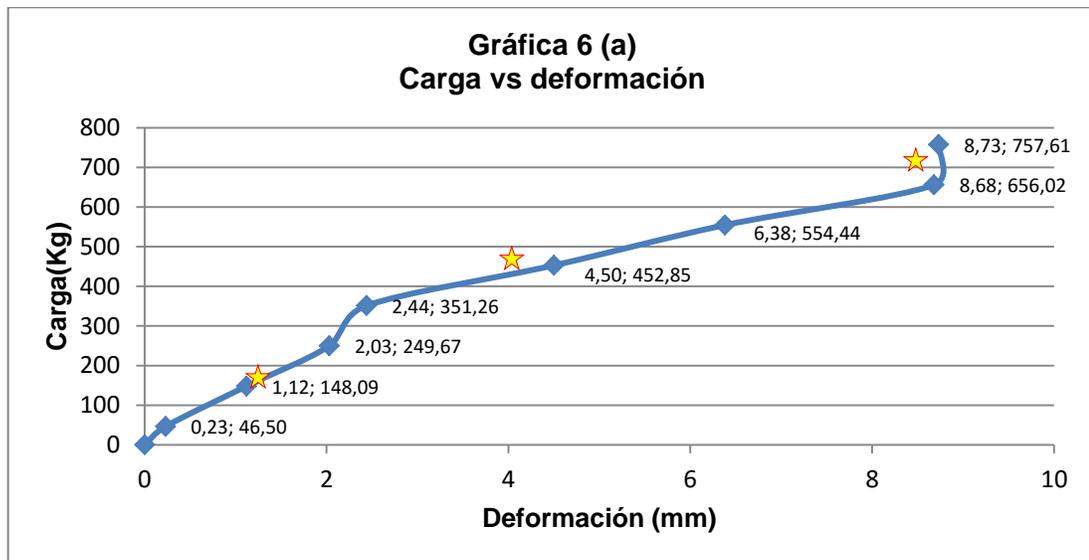
El ensayo 5 fue también una evaluación para una unión de esquina, con la variante de la posición de la junta de la unión, tal como se muestra en el esquema de dimensiones anterior. La gráfica 5 refleja una concordancia entre el ensayo 4 y ensayo 5 con deformaciones y valores de carga similares. Esto indica que el comportamiento de resistencia es el mismo. La diferencia al cambiar la posición en la que se aplicó la carga, es la forma de falla de los elementos. En este ensayo la falla por deslizamiento y corte directo no fue tan crítica y evidente como fue para el ensayo 4.

Tabla XI. **Ensayo 6 para unión muro-losa en forma de T**

Deformación (mm)	Carga (Kg)	Observaciones	Carga distribuida (kg/m)
0	0		0
0,23	46,5		56,36
1,12	148,08	con su propio peso ya presenta fallas	179,49
2,03	249,67		302,63
2,44	351,26		425,77
4,5	452,84	salieron grietas a 45°	548,90
6,38	554,43		672,04
8,68	656,02		795,18
8,73	757,61	carga última	918,31

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Gráfica de carga vs. deformación ensayo 6 (a)**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

El ensayo 6 fue realizado en una unión muro-losa en forma de T sin restricciones en los extremos. Este procedimiento se hizo con el fin de comparar cómo la continuidad de los muros mediante la restricción y rigidez que provee la unión, garantiza mejores resultados. En el ensayo 2 para una carga de 249,67 Kg la deformación fue de 1,32 mm mientras que para este ensayo y para la misma carga, la deformación fue de 2,03 mm (1,5 veces la deformación del ensayo 2).

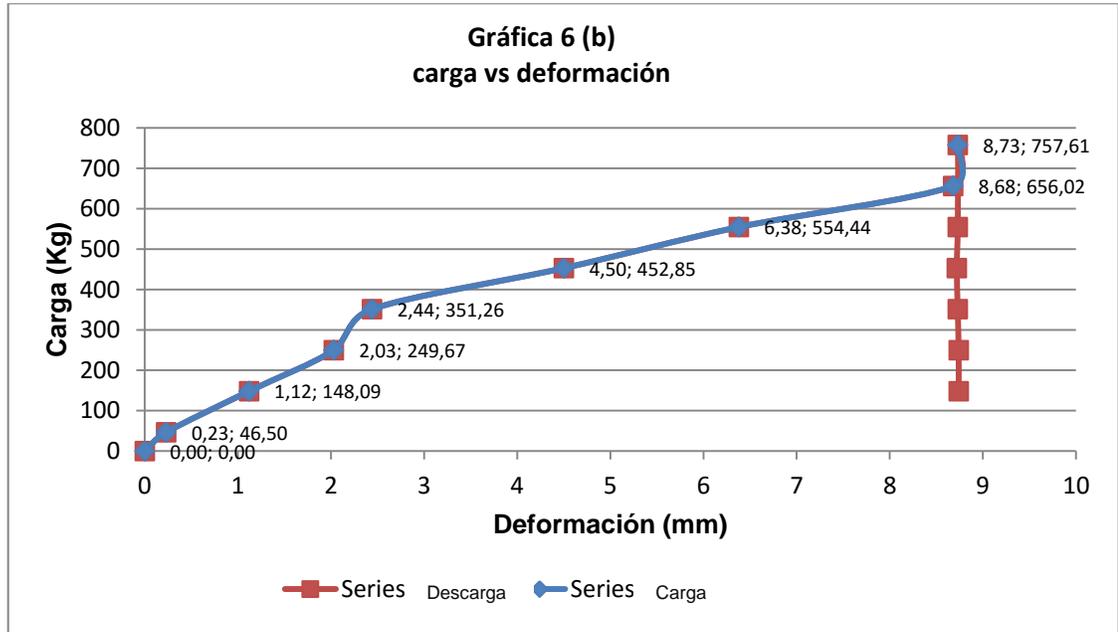
Esta experiencia muestra que la rigidez es inversamente proporcional a la deformación. Si las uniones contiguas son poco rígidas, se deformarán más y este efecto incidirá directamente en las otras uniones. Además de ello, se tomaron datos de descarga, los cuales se registran en la tabla siguiente.

Tabla XII. **Ensayo 6 (b) de descarga**

Deformación (mm)	Carga (Kg)	Carga distribuida (kg/m)
8,73	554,43	672,04
8,72	452,84	548,90
8,73	351,26	425,77
8,74	249,67	302,63
8.74	148,08	179,49

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Gráfica de histéresis de carga y descarga vs. deformación ensayo 6 (b)**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

Como puede apreciarse en la gráfica, las grandes deformaciones sufridas sin restricciones, generan que el sistema completo salga de su zona elástica. Al no regresar a su posición inicial en ninguno de los puntos, la unión ha quedado permanente deformado. Este caso es crítico, ya que en una construcción real se espera que después de una aplicación de carga (dentro de los parámetros de diseño), los elementos estructurales regresen a su estado habitual.

Con el fin de tener una pauta de comparación se realizó una aplicación de cálculo de diseño de mampostería (véase apéndice). Con los resultados teóricos obtenidos se determinó una deriva teórica para los muros que determinan valores críticos en las uniones ortogonales. A continuación se

detalla un ejemplo de dicha determinación de la deriva con una ecuación basada en la consideración del efecto P- Δ (carga y deformación).

$$\Delta f = \frac{P}{Em * t} \left[\left(\frac{h}{d} \right)^3 + 3 \left(\frac{h}{d} \right) \right]$$

Donde Δf es la deriva del muro, P la carga lateral que actúa sobre dicho muro, Em el módulo de elasticidad del material en Kg/cm², t el espesor del muro en cm, h la altura en m y d la longitud del muro en m.

Para determinar Δf_A se calcula de la siguiente manera

$$\Delta f_A = \frac{811,64}{57,42 * 10} \left[\left(\frac{2,44}{5,9} \right)^3 + 3 \left(\frac{2,44}{5,9} \right) \right] = 1,85 \text{ cm} = 18,5 \text{ mm}$$

La deriva real se obtuvo de los ensayos realizados. El muro A corresponde a un tipo de unión en forma de L, por lo que el ensayo correspondiente para comparar fue el número 4. Para el mismo valor de carga teórica distribuida, se interpolaron datos de la tabla para encontrar la deriva real como sigue:

$$x_2 = \frac{(y_2 - y_1)(x_3 - x_1)}{(y_3 - y_1)} + x_1$$

$$\text{Carga distribuida } \frac{811,64 \text{ Kg}}{2,44 \text{ m}} = 332,64 \text{ Kg/m}$$

$$x_2 = \frac{(332,64 - 302,64)(2,18 - 1,69)}{(425,77 - 302,64)} + 1,69 = 1,8 \text{ mm}$$

En la siguiente tabla se hace un resumen comparativo de las derivas teóricas, reales y máxima.

Tabla XIII. **Comparación de deriva teórica, real y máxima**

DELTA	Teórico (mm)	Real (mm)	Diferencia (mm)	Porcentaje real respecto a teórico (%)	Delta máxima (mm)
A	18,53	1,8	16,73	9,71	30,8
B	7,89	0,46	7,43	5,83	30,8
C	7,89	0,46	7,43	5,83	30,8
1	30,76	0,53	30,23	1,73	11,0
4	21,96	0,72	21,24	3,28	16,2
6	14,8	2,02	12,78	13,65	69,5
			PROMEDIO	8,00	

Fuente: elaboración propia.

El porcentaje promedio indica que para un mismo valor de carga analizado, la deformación real es apenas un 8,00 % del valor esperado. En otras palabras para que los muros (con las propiedades de los paneles) logren una determinada deformación teórica, la carga podrá ser mayor que la carga teórica, siempre y cuando la deformación no sobrepase el valor máximo establecido. Según el código IBC 2003 $\Delta f_{max} = \frac{l}{120}$ para muros flexibles.

CONCLUSIONES

1. La resistencia a esfuerzos de corte entre las uniones ortogonales entre muros y muro-losa fue mayor de los valores esperados.
2. Las uniones entre muros y muro-losa tienen su mayor debilidad en el mortero, ya que este se agrieta fácilmente en presencia de esfuerzos de corte y deslizamiento.
3. La carga máxima promedio experimental que resiste una unión muro-losa es de 1 025 kilogramos por metro lineal con una deflexión de 24,93 milímetros.
4. La carga máxima promedio de una unión muro-muro en forma de T es de 676,14 kilogramos por metro lineal con una deflexión de 23,17 milímetros.
5. La carga máxima promedio de una unión muro-muro en forma de L es de 2 496,40 kilogramos por metro lineal con una deflexión de 9,37 milímetros.
6. Las uniones entre muros de esquina poseen mayor rigidez que las uniones tipo T, pues son más capaces de resistir esfuerzos producidos por de carga lateral con menor deformación.

7. El sistema de uniones entre paneles presenta un patrón ordenado en el cual el primer material en resistir esfuerzos es el concreto, seguido por la electromalla y por último existe un aporte del *joist* de confinamiento.
8. Para la resistencia de la electromalla grado 70, el espaciamiento cumple con los requerimientos para momentos. El valor teórico de la aplicación da como resultado una electromalla con un espaciamiento de 15 cm por 15 cm y el real fue de 7,5 cm (horizontal) por 15 cm (vertical).
9. La deformación real de las uniones de paneles representan un 8,00 % de la deformación teórica que debería sufrir al aplicársele una carga lateral. Esto significa que las uniones resisten más capacidad de carga para lograr una deformación teórica.
10. La correcta unión entre paneles garantiza que estos se comporten adecuadamente de forma dúctil ante la aplicación de cargas.
11. La falla más crítica que sufre una losa del espesor del panel, es el punzonamiento generado por la reacción del muro que la porta.
12. El poliestireno expandido, además de servir de núcleo para los paneles, ayuda a mantener la integridad del sistema, la estabilidad y disipa la energía generada por excitación de cargas.
13. El *joist* aporta tenacidad al sistema de paneles, le provee rigidez y hace que tenga la capacidad absorber la energía de deformación.

RECOMENDACIONES

1. Colocar un anclaje entre las uniones con un refuerzo de varillas de acero con dobleces a 90 grados, de tal forma que sujeten los paneles. Con ello se busca mejorar la integridad del sistema de paneles y proveer de una mayor seguridad.
2. Colocar un espesor mayor de recubrimiento en las losas, de tal forma que se pueda proveer un refuerzo adicional a la tensión sin que existan problemas de agrietamiento.
3. Considerar el aporte del *joist* y proponer una mejor distribución del espaciamiento de la electromalla para disminuir cuantías de acero.
4. En un próximo trabajo de graduación, evaluar el aporte mecánico del poliestireno expandido, especialmente la resistencia a la compresión.

BIBLIOGRAFÍA

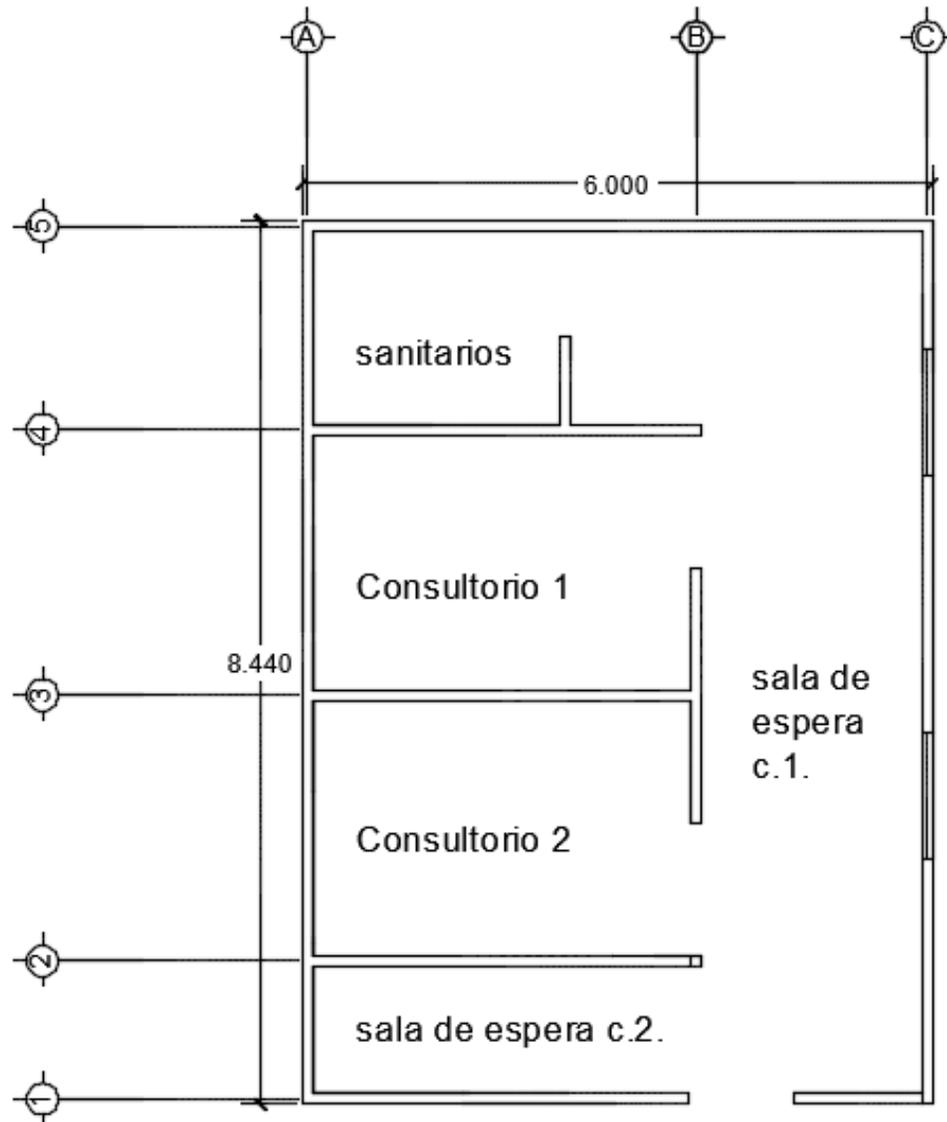
1. American Concrete Institute. *Manual de práctica de concreto parte 5*. Estados Unidos: ACI, 1989. 732 p.
2. ARCHILA ALFARO, Patricia Yesenia. *Métodos para construcción de vivienda, utilizando materiales tecnológicos actuales: electropanel, tabla yeso, fibrocemento y fibroyeso*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 156 p.
3. BARRERA RIVERA, Luis Fernando. *Validación del sistema constructivo prefabricado tipo poste pretensado placa ensamblada*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 154 p.
4. CERVANTES ABARCA, Alejandro. *Nuevas tecnologías en concretos: concreto celular, concreto reforzado con fibra, concreto ligero estructural*. Trabajo de recopilación de memorias del Congreso Nacional de Administración y Tecnología para la Arquitectura, Ingeniería y Diseño. Universidad Nacional Autónoma de México, 2008. 24 p.
5. Comité ACI 318 American Concrete Institute. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-08) y Comentario (ACI 318SR-08)*. Estados Unidos: ACI, 2008. 520 p.

6. FLORIÁN RAMÍREZ, Elida Yesenia. *Recomendaciones para el diseño de mampostería de viviendas mínimas, menores a 50 m²*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 182 p.
7. GRUPO MONOLIT. *Catálogo de productos*. [en línea]. <
<http://www.grupomonolit.com/> [Consulta: 2 de febrero de 2015].
8. KEYSER, Carl A. *Ciencia de materiales para ingeniería*. México: Limusa, 1993. 460 p.
9. LÓPEZ RIVERA, Juan Borman Emanuel. *Evaluación del uso de sistemas constructivos, basados en electropanel de poliestireno expandidos, ondulado y reforzado con electromalla de acero galvanizado reticulado*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 143 p.
10. NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto*. 12a ed. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 1999. 722 p.
11. PYTEL, Andrew; SINGER, Ferdinand L. *Resistencia de materiales*. 4a ed. México: Alfaomega, 1994. 585 p.

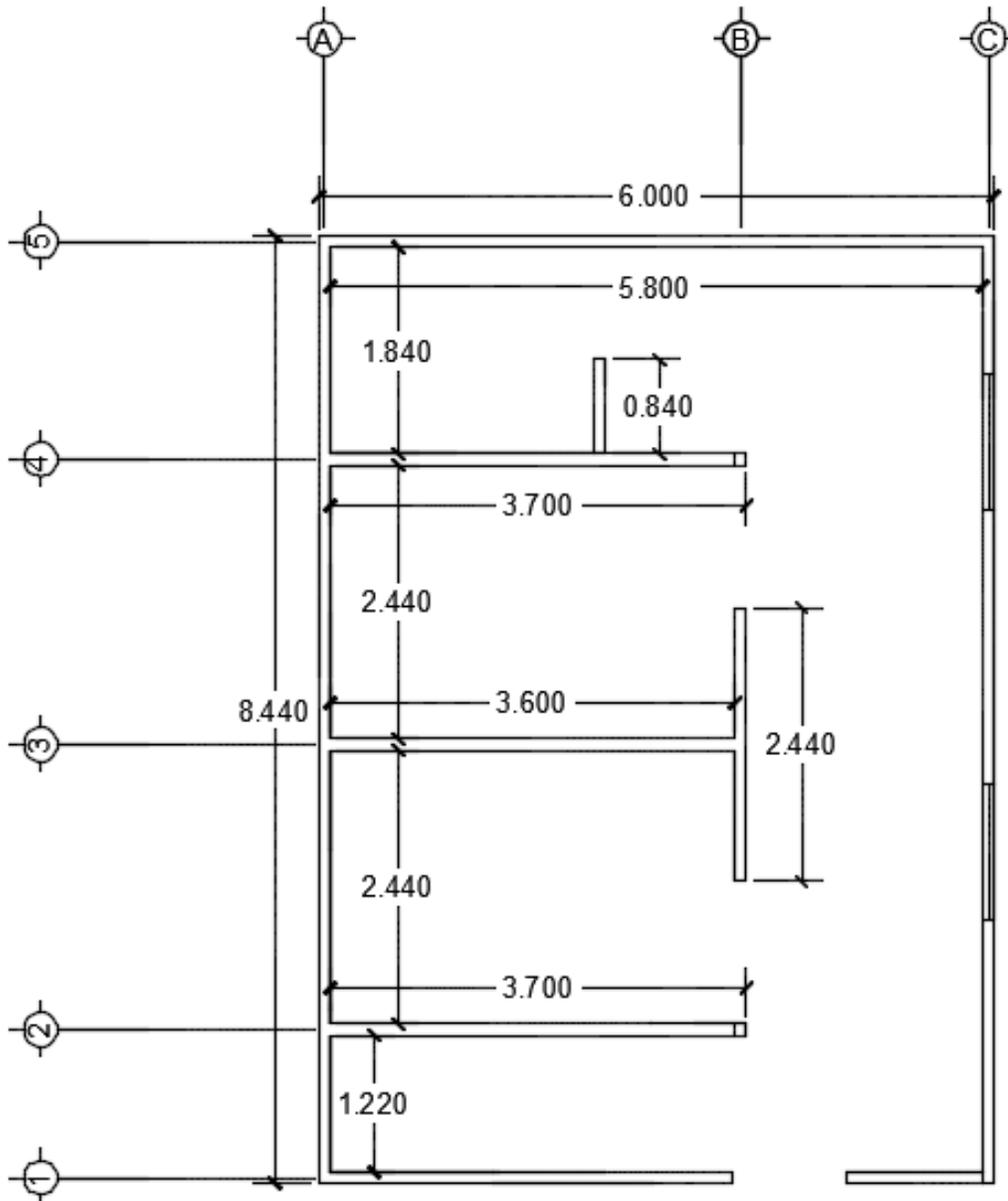
APÉNDICES

EJEMPLO DE DISEÑO CON BASE EN MAMPOSTERÍA

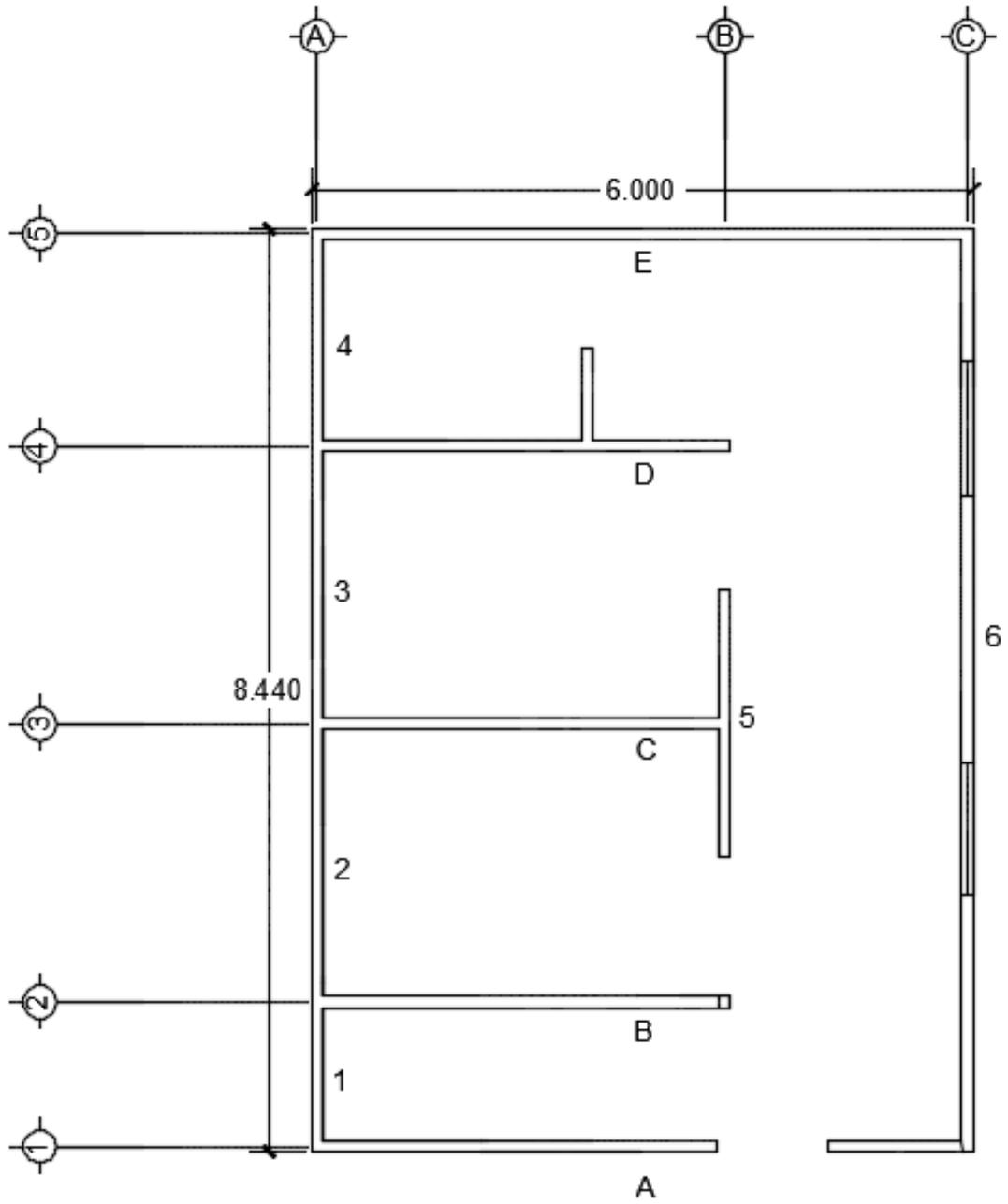
Apéndice 1. Distribución en planta de consultorios médicos



Apéndice 2. Dimensiones de muros en m



Apéndice 3. **Nomenclatura de muros**



Los cálculos fueron realizados con una hoja de cálculo en el programa Excel. A continuación se resumen los pasos, criterios y ecuaciones utilizadas. Al finalizar los mismos se encuentran las tablas que resumen los resultados.

Propiedades de los paneles

$$f_y = 4\,922 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f'_m = 0,076 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_m = 57,42 \text{ Kg/cm}^2$$

Paso 1: verificación de muros

$$\text{Área en planta} = 6 \times 8,44 = 50,64 \text{ m}^2$$

$$\text{Longitud mínima de muros de carga} = 0,4A_m = 0,4 \times 50,64 = 20,26 \text{ m}$$

Existen 41,22 m; la longitud mínima cumple.

Paso 2: verificación de porcentaje de aberturas

Si el porcentaje de aberturas es menor al 20 % del área del muro que las contiene, se considera que el muro está lleno. Para este ejemplo todos los muros poseen áreas de aberturas menores al 20 %.

Paso 3: peso de los muros

$$\text{Peso} = \frac{97,8 \text{ Kg}}{\text{m}^2} \times h \times \text{longitud del muro}$$

Paso 4: determinación de centro de masa

$$\text{CM} = \frac{\sum \text{peso del muro} \times \text{centro geométrico}}{\sum \text{peso de muros}}$$

CMX	2,70 m
CMY	3,46 m

Paso 5: peso de losa

$$\text{peso de losa} = \frac{160 \text{ Kg}}{\text{m}^2} \times \text{área de techo} = \frac{160 \text{ Kg}}{\text{m}^2} \times (6\text{m} \times 8,44 \text{ m}) = 8\,102,4 \text{ Kg}$$

Paso 6: centro de masa combinando techo y muros

$$CM = \frac{\text{peso del techo} \times CM + \text{peso del muro} \times CM}{\text{peso del techo} + \text{peso del muro}}$$

CMXtecho+muro	2,84 m
CMYtecho+muro	3,80 m

Paso 7: cálculo de la rigidez relativa

$$K = \frac{I}{H} \qquad I = \frac{1}{12} bh^3$$

Paso 8: centro de rigidez

$$CR = \frac{\sum \text{rigidez} \times \text{centro geométrico}}{\sum \text{rigidez}}$$

CRX	3,46 m
CRY	4,14 m

Paso 9: cálculo de excentricidades

- Excentricidad de configuración $e = CM - CR$
- Excentricidad de diseño $e_{dis} = |CM - CR| + 5\% \text{ longitud}$
- Excentricidad máxima $e_{max} = 15\% \text{ longitud}$

ex	0,63
ey	0,34
edisx	0,93
edisy	0,76
emaxx	0,92
emaxy	1,27

Paso 10: cálculo de corte basal, con base en método de diseño del código UBC 1997.

- Factor de importancia $I=1$
- Sistema de muros de albañilería (tabla 16-n UBC 97) $R=4,5$
- Tipo de suelo (tabla 16-j UBC 97)=SD
- Coeficiente sísmico (tabla 16-q UBC 97) $C_a= 0,44$
- Factor NA (tabla 16-s UBC 97) $N_a= 1$
- Clasificación de zona sísmica $Z=0,4$
- Coeficiente por zona y tipo de suelo (tabla 16-r UBC 97) $C_v=0,768$
- Factor $N_V= 1,2$
- Periodo fundamental de estructura $T=0,104$
- Factor $C_t=0,0488$
- Altura de nivel considerado: 2,44m
- Peso total= Carga muerta +0,25*Carga viva= 19 395,72 Kg

El corte basal se calcula según las ecuaciones del UBC

El corte basal debe ser

Ec. 30-4 UBC 87

$$V = \frac{c_v I}{RT} W = 31\ 828,87 \text{ Kg}$$

Pero no mayor que

Ec. 30-5 UBC 87

$$V = \frac{2,5c_a I}{R} W = 4\,741,17 \text{ Kg}$$

No menor que

Ec. 30-7 UBC 87

$$V = \frac{0,8N_v I}{R} W = 1\,379,25 \text{ Kg}$$

El valor a utilizar es de 4 741,17 Kg.

Paso 11: cálculo de refuerzo por muro

Momento actuante= $V_t \times h$

Factor K
$$K = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{n f_b}} = 0,272$$

$f_s = 1/2(1/2f_y)$	2450 Kg/cm ²
$f_b = 1/2(1/3 * f'_m)$	2,55 Kg/cm ²
$n = E_s/E_m$	35614,03

Momento polar de inercia

$$J = 1 - \frac{K}{3}$$

Cuantía horizontal
$$\rho = \frac{M}{f_s J b d^2}$$

Según el ACI 318-08 en la sección 7.12.2.1 la cuantía mínima para elementos reforzados con electromalla la cuantía mínima es $\rho_{min} = \frac{0,0018 \times 420}{f_y}$ que para las propiedades de la electromalla es $\rho_{min} = 0,00154$.

Apéndice 4. Tablas de procedimiento de hoja de cálculo

Clasificación	Coordenadas		m	Kg	Peso por centro geométrico		Rigidez relativa	
	X	Y	LONGITUD	Peso del muro	X	Y	X (dentro deplano)	Y (fuera)
A	2,95	0	5,9	1 407,93	4 153,39	0,00	0,701431	0,000202
B	1,85	1,85	3,7	882,94	1 633,44	1 165,48	0,172995	0,000126
C	1,85	3,86	3,7	882,94	1 633,44	3 408,14	0,172995	0,000126
D	1,85	6,4	3,7	882,94	1 633,44	6 550,81	0,172995	0,000126
E	2,95	8,34	5,9	1 407,93	4 153,39	1 1742,13	0,701431	0,000202
1	0	0,66	1,32	314,99	0,00	207,90	0,007855	0,000045
2	0	1,27	2,54	606,13	0,00	769,78	0,055967	0,000087
3	0	1,27	2,54	606,13	0,00	769,78	0,055967	0,000087
4	0	0,97	1,94	462,95	0,00	449,06	0,024936	0,000066
5	3,7	3,86	2,44	582,26	2 154,37	2 247,53	0,049613	0,000083
6	5,9	4,17	8,34	1 990,19	11 742,43	8299,10	1,981194	0,000285
			Σ	1 0027,32	27 103,58	34 709,69	4,097380	0,001435

Clasificación	Centro de rigidez		Carga lateral por muro		Centro de rigidez		Distancia al centro de rigidez	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
A	2,0692215	0	881,64	665,70	3,46	4,14	-0,51	-4,14
B	0,3200412	0,000166809	200,18	417,48	3,46	4,14	-1,61	-2,82
C	0,3200412	0,000487773	200,18	417,48	3,46	4,14	-1,61	-0,28
D	0,3200412	0,000808743	200,18	417,48	3,46	4,14	-1,61	2,26
E	2,0692215	0,001680533	811,64	665,70	3,46	4,14	-0,51	4,20
1	0	2,97541E-05	9,09	148,94	3,46	4,14	-3,46	-3,48
2	0	0,000110171	64,76	286,59	3,46	4,14	-3,46	-2,87
3	0	0,000110171	64,76	286,59	3,46	4,14	-3,46	-2,87
4	0,1835693	6,42691E-05	28,85	218,89	3,46	4,14	-3,46	-3,17
5	11,689047	0,000321667	57,41	275,31	3,46	4,14	0,24	-0,28
6	11,680947	0,001187766	2 292,48	941,01	3,46	4,14	2,44	0,33
	16,971182	0,00496765	4 741,17	4 741,17				

Clasificación	Momento polar de inercia		Carga por torsion		Carga por sismo total		Momento actuante	
	X	Y	Delta Vx	Delta Vy	Vtx	Vty	X	Y
A	12,033629	0,000053	-0,02	-568,23	811,64	665,700	1 980,41	1 624,32
B	1,377639	0,000328	-0,04	-95,48	200,18	665,70	488,43	1 018,64
C	0,013753	0,000328	-0,04	-9,54	200,18	417,48	488,43	1 018,64
D	0,882059	0,000328	-0,04	76,40	200,18	417,48	488,43	1 205,06
E	12,361702	0,000053	-0,02	575,92	811,64	417,48	1 980,41	3 029,57
1	0,095235	0,000054	-0,03	-5,35	9,09	665,70	22,18	363,41
2	0,461622	0,001039	-0,06	-31,44	64,76	148,94	158,02	699,41
3	0,461622	0,001039	-0,06	-31,44	64,76	286,59	158,02	699,41
4	0,250893	0,000794	-0,04	-15,47	28,85	28,85	158,02	534,10
5	0,003944	0,000005	-0,00	-2,74	57,41	57,41	70,40	671,75
6	0,001558	0,001694	0,14	10,874	2 292,62	951,88	140,09	2332,58
	27,943657	0,006201						

Continuación de apéndice 4.

Clasificación	Cuantía horizontal		Cuantía según ACI 7.12.2.1 0,0018*420/fy		Cuantía a utilizar	
	X	Y	X	Y	X	Y
A	2,0692215	0	881,64	665,70	3,46	4,14
B	0,3200412	0,000166809	200,18	417,48	3,46	4,14
C	0,3200412	0,000487773	200,18	417,48	3,46	4,14
D	0,3200412	0,000808743	200,18	417,48	3,46	4,14
E	2,0692215	0,001680533	811,64	665,70	3,46	4,14
1	0	2,97541E-05	9,09	148,94	3,46	4,14
2	0	0,000110171	64,76	286,59	3,46	4,14
3	0	0,000110171	64,76	286,59	3,46	4,14
4	0,1835693	6,42691E-05	28,85	218,89	3,46	4,14
5	11,689047	0,000321667	57,41	275,31	3,46	4,14
6	11,680947	0,001187766	2 292,48	941,01	3,46	4,14

Clasificación	Asc	cm ²	AsH	cm ²	Núm. de varrilla vertical		Núm. de varrilla horizontal	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
A	2,0692215	0	881,64	665,70	3,46	4,14	-0,51	-4,14
B	0,3200412	0,000166809	200,18	417,48	3,46	4,14	-1,61	-2,82
C	0,3200412	0,000487773	200,18	417,48	3,46	4,14	-1,61	-0,28
D	0,3200412	0,000808743	200,18	417,48	3,46	4,14	-1,61	2,26
E	2,0692215	0,001680533	811,64	665,70	3,46	4,14	-0,51	4,20
1	0	2,97541E-05	9,09	148,94	3,46	4,14	-3,46	-3,48
2	0	0,000110171	64,76	286,59	3,46	4,14	-3,46	-2,87
3	0	0,000110171	64,76	286,59	3,46	4,14	-3,46	-2,87
4	0,1835693	6,42691E-05	28,85	218,89	3,46	4,14	-3,46	-3,17
5	11,689047	0,000321667	57,41	275,31	3,46	4,14	0,24	-0,28
6	11,680947	0,001187766	2 292,48	941,01	3,46	4,14	2,44	0,33

Clasificación	Espaciamiento vertical cm		Espaciamiento horizontal cm		Espaciamiento considerando el joist cm	
	X	Y	X	Y	X	Y
A	2,0692215	0	881,64	665,70	3,46	4,14
B	0,3200412	0,000166809	200,18	417,48	3,46	4,14
C	0,3200412	0,000487773	200,18	417,48	3,46	4,14
D	0,3200412	0,000808743	200,18	417,48	3,46	4,14
E	2,0692215	0,001680533	811,64	665,70	3,46	4,14
1	0	2,97541E-05	9,09	148,94	3,46	4,14
2	0	0,000110171	64,76	286,59	3,46	4,14
3	0	0,000110171	64,76	286,59	3,46	4,14
4	0,1835693	6,42691E-05	28,85	218,89	3,46	4,14
5	11,689047	0,000321667	57,41	275,31	3,46	4,14
6	11,680947	0,001187766	2 292,48	941,01	3,46	4,14

Fuente: elaboración propia.

