



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

**OPTIMIZACIÓN DE PANEL ECOLÓGICO DE 0,80 METROS POR 2,40 METROS, PARA  
ACOPLAR ENTRE COLUMNAS PREFABRICADAS EN VIVIENDA RURAL**

**Julio Héctor Martínez Letona**

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, febrero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DE PANEL ECOLÓGICO DE 0,80 METROS POR 2,40 METROS, PARA  
ACOPLAR ENTRE COLUMNAS PREFABRICADAS EN VIVIENDA RURAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JULIO HÉCTOR MARTÍNEZ LETONA**

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
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. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Veliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Crescencio Benjamín Cifuentes
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
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:

**OPTIMIZACIÓN DE PANEL ECOLÓGICO DE 0,80 METROS POR 2,40 METROS, PARA  
ACOPLAR ENTRE COLUMNAS PREFABRICADAS EN VIVIENDA RURAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 24 de agosto de 2012.



**Julio Héctor Martínez Letona**

Guatemala, noviembre del 2014

Ingeniero

Guillermo Mellini

Coordinador del Área de Materiales y

Construcciones Civiles

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Ingeniero Mellini:

Por medio de la presente, le informo que he asesorado y revisado el trabajo de graduación, con título: OPTIMIZACIÓN DE PANEL ECOLÓGICO DE 0,80 METROS POR 2,40 METROS, PARA ACOPLAR ENTRE COLUMNAS PREFABRICADAS EN VIVIENDA RURAL, desarrollado por el estudiante Julio Héctor Martínez Letona, con carné: 9812132. El cual satisface los objetivos del mismo.

Al agradecer su amable atención y colaboración, me suscribo atentamente.

  
Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

No. De colegiado: 2089

Jefe de la Sección de Estructuras

  
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,  
20 de enero 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 OPTIMIZACIÓN DE PANEL ECOLÓGICO DE 0.80 METROS POR 2.40 METROS, PARA ACOPLAR ENTRE COLUMNAS PREFABRICADAS EN VIVIENDA RURAL, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Julio Héctor Martínez Letona, 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 Guillermo Francisco Melini Salguera~~  
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 Jefe del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Julio Héctor Martínez Letona, titulado **OPTIMIZACIÓN DE PANEL ECOLÓGICO DE 0.80 METROS POR 2.40 METROS, PARA ACOPLAR ENTRE COLUMNAS PREFABRICADAS EN VIVIENDA RURAL**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, febrero 2015

/bbdeb.

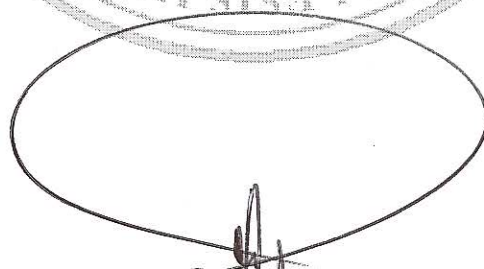
Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





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: **OPTIMIZACIÓN DE PANEL ECOLÓGICO DE 0.80 METROS POR 2.40 METROS, PARA ACOPLAR ENTRE COLUMNAS PREFABRICADAS EN VIVIENDA RURAL**, presentado por el estudiante universitario: **Julio Héctor Martínez Letona**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 20 de febrero de 2015

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por brindarme la oportunidad de vivir y darme la sabiduría para concluir el presente trabajo.
<b>Mis padres</b>	Ya que gracias a su esfuerzo y sacrificio tuve la oportunidad de estudiar y concluir esta carrera.
<b>La Facultad de Ingeniería</b>	Por todos los conocimientos y experiencias adquiridos durante mi vida universitaria.
<b>Mi asesor</b>	Por todos los consejos y ayuda prestados en la elaboración de este trabajo.
<b>Mis amigos y compañeros de la Facultad de Ingeniería</b>	Por su apoyo y colaboración incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por brindarme siempre lo necesario para desarrollarme como persona y por darme el conocimiento para realizar este trabajo.
<b>Mis padres</b>	Quienes con sus ejemplos me han instruido desde pequeño para ser un buen ciudadano.
<b>Mi familia</b>	Por brindarme todo su apoyo y colaboración incondicionalmente.
<b>Todos mis maestros y catedráticos</b>	Por compartirme sus valiosos conocimientos.
<b>Mis amigos</b>	Por todos los buenos momentos compartidos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. CONCEPTO GENERAL DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO.....	1
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO .....	3
2.1. Fundamentos del sistema constructivo.....	3
2.2. Composición del sistema constructivo.....	4
2.2.1. Núcleo central de botellas tipo PET (polietileno tereftalato).....	5
2.2.2. Residuos sólidos inorgánicos compresibles .....	8
2.2.3. Ferromalla.....	9
2.2.4. Concreto liviano .....	11
2.2.5. Ferrocemento .....	13
3. PROPIEDADES FÍSICAS.....	15
4. PROCEDIMIENTO DE ARMADO Y ENSAMBLAJE .....	19
5. VENTAJAS Y NOBLEZA DEL SISTEMA .....	25

6.	CLASIFICACIÓN DE PANELES DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO .....	29
6.1.	Panel ecológico sistema constructivo.....	31
7.	CARACTERÍSTICAS DE ACERO DE REFUERZO Y PIN ACOPLADOR .....	33
8.	TIPOLOGÍA DE LOS PANELES DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO .....	37
9.	ENSAYOS DE LABORATORIO .....	41
9.1.	Pruebas de compresión sobre muros.....	42
9.2.	Pruebas de mortero.....	52
9.3.	Pruebas de flexión vertical sobre muros .....	54
9.4.	Pruebas de corte sobre muros .....	59
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	63
10.1.	Procedimiento y secuencia de los cálculos obtenidos en laboratorio .....	63
10.1.1.	Ensayo compresión, deformometro 1 a h/2 y deformometro 2 a h/3 .....	63
10.1.2.	Ensayo flexión vertical, deformometro a h/2 (1.20 metros de altura) .....	64
10.1.3.	Ensayo a corte .....	68
10.2.	Determinación de la carga de diseño de muros .....	71
10.2.1.	Determinación de la carga de diseño a compresión.....	71
10.2.2.	Determinación de la carga de diseño a flexión vertical .....	73
10.2.3.	Determinación de la carga de diseño a corte .....	74
10.2.4.	Evaluación resultados de flexocompresión .....	75

11.	ANÁLISIS COMPARATIVO Y DE RENDIMIENTO CON OTROS	
	SISTEMAS .....	85
11.1.	Sistema electropanel .....	85
11.2.	Sistema pared de concreto prefabricada .....	86
11.3.	Sistema tabla de yeso .....	86
11.4.	Sistema panel ecológico.....	87
	CONCLUSIONES .....	89
	RECOMENDACIONES .....	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	ANEXO .....	95



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Panel ecológico de botellas tipo PET .....	7
2.	Estructura química del polietileno .....	8
3.	Ferromalla o malla de gallinero .....	10
4.	Ferrocemento en funcionamiento.....	14
5.	Elaboración del mortero para panel ecológico .....	18
6.	Armadura de marco rectangular.....	21
7.	Armadura de acero de refuerzo transversal .....	22
8.	Ensamblaje de microcolumnas de botellas tipo PET .....	22
9.	Fundición con mortero de panel ecológico.....	23
10.	Fundición con mortero de segundo panel ecológico .....	23
11.	Relación de esbeltez de panel ecológico $h/e = 24 \geq 20$ .....	28
12.	Detalle de pin acoplador para columna.....	34
13.	Detalle de pin acoplador para solera de corona.....	35
14.	Vaciado del mortero y tendido del mismo .....	37
15.	Finalización de la fundición .....	39
16.	Desencofrado y forma final de paneles ecológicos .....	40
17.	Prensa hidráulica de 150 000 libras .....	42
18.	Prueba a compresión de panel ecológico .....	43
19.	Gráfica de compresión con deformometro 2 a $h/3$ .....	45
20.	Gráfica de ensayo a compresión con deformometro 1 a $h/2$ .....	47
21.	Principio de grieta en la parte inferior derecha debido a Poisson .....	48
22.	Efecto dovela del mortero envolviendo botellas PET .....	49
23.	Vacío dejado por la dovela envolviendo microcolumnas.....	49

24.	Aparición de tres grietas debido a esfuerzos de compresión.....	50
25.	Aplastamiento total de esfuerzo último al punto de ruptura .....	51
26.	Prueba de Revenimiento del mortero NORMA ASTM C 143.....	52
27.	Resultado de la prueba de Revenimiento de 3,5” .....	53
28.	Curva típica de esfuerzo-deformación .....	54
29.	Prueba a flexión vertical de panel ecológico.....	55
30.	Gráfica de ensayo a flexión vertical .....	56
31.	Principio de grieta en la parte posterior debido a la monofalla .....	57
32.	Colapso total por monofalla transversal única por esbeltez.....	58
33.	Prueba a corte de panel ecológico .....	59
34.	Datos del ensayo a corte .....	60
35.	Gráfica de ensayo a corte.....	60
36.	Aparecimiento de primera grieta en lado inferior izquierdo.....	61
37.	Falla por aplastamiento presentando 3 grietas en paralelo a la vertical.....	62
38.	Efecto de carga lateral de sismo (lateral) y viento (perpendicular) .....	77
39.	Efecto de carga P .....	82
40.	Carga equivalente P sobre panel ecológico en ensayo flexión vertical .....	83

## TABLAS

I.	Datos de propiedades físicas y mecánicas de botellas tipo PET .....	17
II.	Datos de ensayo a compresión deformometro 2 a h/3 .....	44
III.	Datos de ensayo a compresión con deformometro 1 a h/2.....	46
IV.	Datos de ensayo a flexión vertical .....	56
V.	Resumen de ensayos realizados.....	71
VI.	Datos comparativos varios entre cuatro sistemas similares .....	82
VII.	Datos comparativos varios entre cuatro sistemas similares y costos ..	88



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$A'''$	Acero acoplador (Pin)
$A'$	Acero longitudinal
$A''$	Acero transversal
$A$	Área
$P$	Carga puntual
$cm$	Centímetro
$cm^2$	Centímetro cuadrado
$a$	Constante para el cálculo de módulo elástico
$\rho$	Cuantía de acero
$\Delta$	Deformación admisible
$\epsilon$	Deformación unitaria
$\emptyset$	Diámetro
$\sigma_c$	Esfuerzo a compresión
$\sigma_v$	Esfuerzo a corte
$\sigma_F$	Esfuerzo a flexión
$\sigma_{Fc}$	Esfuerzo a flexión de columna
$f_{tk}$	Esfuerzo a tensión de rotura
$F_y$	Esfuerzo de deformación a tensión
$f_{yk}$	Esfuerzo de tensión a fluencia
$\sigma_t$	Esfuerzo de trabajo
$\sigma_x$	Esfuerzo en eje x
$\sigma_y$	Esfuerzo en eje y

$\sigma_z$	Esfuerzo en eje z
$\sigma'_{Fv}$	Esfuerzo resultante a flexión vertical
$\sigma_u$	Esfuerzo último
$\sigma$	Esfuerzo unitario
L	Longitud
$\bar{\delta}$	Longitud patrón
$\rho'$	Mayor cuantía de acero
E	Módulo elástico
M	Momento
I	Momento de inercia
%	Porcentaje
h/e	Relación de esbeltez
$\mu$	Relación de Poisson
$F'_c$	Resistencia a compresión del concreto
$f'_m$	Resistencia a compresión de la mampostería
$\sigma'_{Fc}$	Transferencia de resistencia a flexión

## GLOSARIO

<b>Absorción</b>	Refiere a la absorción de agua.
<b>ACI</b>	American Concrete Institute.
<b>Área</b>	Área total del panel.
<b>ASTM</b>	American Standard of Testing and Materials.
<b>Cemento</b>	Sustancia de polvo fino hecha de argamasa de yeso capaz de formar una pasta blanda al mezclarse con agua.
<b>Columna</b>	Soporte vertical que transmite carga hacia la cimentación.
<b>Concreto</b>	Mezcla de cemento Portland, agua y aglomerante finos y gruesos.
<b>Curado</b>	Período en el cual un elemento gana resistencia.
<b>Deformometro</b>	Dispositivo que mide y registra deformaciones.
<b>Elongación</b>	Aumento de longitud de un elemento.
<b>Ensayo</b>	Prueba de las propiedades de un elemento.

<b>Esfuerzo</b>	El producto de la aplicación de una fuerza sobre un área.
<b>Eslabón</b>	Pin o estructura extrema que sirve de apoyo a la superestructura.
<b>Fluencia</b>	Límite donde un elemento sometido a esfuerzo pierde su proporcionalidad, esfuerzo deformación lineal y comienza a tener comportamiento plástico.
<b>Fraguar</b>	Proceso de endurecimiento del concreto.
<b>Fuerza</b>	Energía que se aplica a un elemento.
<b>IBC</b>	International Building Code.
<b>Mampostería</b>	Sistema constructivo formado por materiales simplemente acomodados o aglutinados.
<b>Mortero</b>	Mezcla de un árido fino (arena), un conglomerante (yeso, cal o cemento) y agua.
<b>Módulo de elasticidad</b>	Relación entre el esfuerzo unitario y la deformación unitaria.
<b>Panel ecológico</b>	Soporte vertical que transmite carga hacia la cimentación.
<b>Psi</b>	<i>Pounds square inch</i> (libra sobre pulgada cuadrada).

**Resiliencia**

Es la energía de deformación que puede ser recuperada de un cuerpo deformado cuando cesa el esfuerzo que causa la deformación. Dentro del límite elástico, la resiliencia es igual al trabajo externo realizado para efectuar la deformación.

**UBC**

Uniform building code.



## RESUMEN

El estudio experimental del desarrollo de resistencia a esfuerzos de compresión, flexión vertical y corte, de paneles ecológicos del presente sistema constructivo, a escala natural y que está basado en botellas plásticas rellenas de residuos sólidos inorgánicos compresibles se realiza como una alternativa segura estructural, así como los diferentes materiales de construcción que conforman un material versátil, nuevo y accesible en el área rural de Guatemala, que a su vez será un agente de mitigación de contaminación por desechos sólidos del ambiente.

El objetivo principal fue el de determinar su resistencia estructural a los diferentes esfuerzos al que será sometido y tener datos reales del comportamiento mecánico para su uso en el sector habitacional en el área rural.

Este trabajo también generó otras ideas para ir mejorando el acoplamiento de vigas-panel, uniones panel columna, unión panel-losa, trabajos que otros estudiantes llevarán a cabo en el corto tiempo.

En cada ensayo se presentó gráficas, tablas, fotografías del debido proceso, figuras y análisis de resultados; al final las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el trabajo investigativo.





## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar y proponer este sistema constructivo identificando sus características mecánicas y dinámicas por medio de ensayos estructurales de flexión y compresión utilizando los materiales que presente el sistema constructivo como el panel ecológico. Determinar por medio de las pruebas su comportamiento estructural, y así poder determinar su resistencia estructural. Con esto determinar la conveniencia de su uso para la construcción de vivienda rural, además de proponer las debidas recomendaciones técnicas para su uso en el área rural y eliminar en una buena parte los residuos sólidos inorgánicos compresibles.

### **Específicos**

1. Ensayar los paneles ecológicos a pruebas de resistencia a compresión, flexión vertical y corte.
2. Análisis e interpretación de resultados obtenidos por medio de los ensayos realizados, para determinar su factibilidad como sistema constructivo.
3. Dar una alternativa para que por medio de este sistema constructivo los habitantes del área rural puedan edificar viviendas con seguridad estructural a través de un sistema que les provea rapidez, facilidad y economía a la vez.

4. Dar una alternativa a los habitantes del área rural para que puedan reducir y mitigar los residuos sólidos inorgánicos compresibles.

## INTRODUCCIÓN

La estructura de una vivienda rural, sometida a la acción de un esfuerzo, sufre deformaciones se haya diseñado la estructura para resistir o no. Por ejemplo, el movimiento del terreno provocado por un sismo hace que la vivienda experimente asentamientos diferenciales, corte, flexión y compresión en sus elementos.

Este sistema constructivo a diferencia de los tradicionales puede usarse para construcciones de vivienda rural para disminuir el costo de construcción y aportar una función que los otros no hacen, que es la de mitigar componentes contaminantes. El núcleo del panel son de botellas tipo PET, en forma de panel de abeja vertical confinado por una ferromalla envolviendo este núcleo e interconectada entre si por varillas de acero para rigidizar y dar resistencia estructural a los esfuerzos de flexión y corte. Por último se cubrirá por un concreto liviano para darle fortaleza al esfuerzo de compresión.

Guatemala presenta vulnerabilidad sísmica en el 70 por ciento de su territorio según el Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), por lo que es importante la evaluación de este sistema constructivo como una alternativa para completar una vivienda rural, en la que se minimicen daños dejados por los sismos como una opción de seguridad, más en zonas de pobreza y extrema pobreza. A la vez el grado de contaminación que presenta el área rural según estudios realizados por la Organización Panamericana de la Salud (OPS).



## **1. CONCEPTO GENERAL DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO**

En Guatemala el uso de paredes de botellas plásticas y otras aplicaciones caseras se utilizan desde hace aproximadamente 15 años en las áreas rurales, donde existe déficit habitacional y un excedente de residuos sólidos que no tienen políticas de manejo y tratamiento de los mismos.

Estos fueron generando problemas de descarga a los habitantes al no existir vertederos o rellenos sanitarios adecuados, algunos pobladores haciendo uso de su ingenio fueron aglutinando o simplemente acomodando las botellas unas sobre otras rellenas de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos como si fuesen bloques o adobes.

De tal manera que empezaron a construir empíricamente paredes para viviendas, desconociendo totalmente sus propiedades físicas y comportamiento mecánico.

Siendo Guatemala un país con actividad sísmica es importante aplicar ingeniería a esta técnica de mampostería tan curiosa y ya investigada en el trabajo de graduación de soleras y columnas prefabricadas con tecnología de botellas plásticas y ferrocemento del señor José Carlos Trejo García llevada a cabo en la sección de estructuras del centro de investigaciones de ingeniería.

Ya pesar que a través de este periodo de tiempo han sido sensibles innumerables sismos de magnitud considerable, han resistido debido a su flexibilidad, condición liviana y comportamientos hasta ahora impredecibles.

Este material de construcción está basado en un panel ecológico formado por microcolumnas tensadas de botellas tipos (PET), rellenas de residuos sólidos inorgánicos compresibles, conocidos como ladrillos ecológicos.

Estos se sujetan a un marco rectangular de hierro de diámetro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada por todo su perímetro, reforzado transversalmente por pines acopladores a  $h/3$  (0,80 metros) y  $2h/3$  (1,60 metros) de su altura envueltos por ferromalla.

Una vez que se va a construir con dicho panel ecológico, se funde con la tradicional mezcla de cemento y arena (mortero), en dependencia de la resistencia que sea requerida. Para que finalmente puedan acoplarse los paneles ecológicos a las columnas prefabricadas (de la tesis del señor José Carlos Trejo García) y conformen una vivienda ecológica rural con servicios básicos, las dimensiones final del panel ecológico es de  $h*b*e$  ( $h$ =altura 2,40 metros\* $b$ =ancho 0,80 metros\* $e$ =espesor 0.10 metros) 0 (2,40m\*0,80m\*0,10m).

## **2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO**

### **2.1. Fundamentos del sistema constructivo**

El sistema constructivo está formado por un núcleo de botellas termoplásticas tipo PET (polietileno tereftalato) de diámetro 0,06 metros (de diámetro), una ferromalla de acero de alta resistencia, esta tiene una resistencia según proveedor de 125 000 libras por pulgada cuadrada y por último un sistema único de alambre de amarre pretensado que atraviesa los ladrillos ecológicos en su centro que en el momento del ensamblaje se pretensan para darles una mayor estabilidad y tensión adecuada para rigidizar el marco rectangular de hierro, estas condiciones permiten tener una contraflecha y flecha favorable en los momentos que generaran las solicitudes de carga.

Estos elementos se interconectan en ambos lados o caras del panel ecológico por un clip de alambre de amarre a noventa grados (o sea perpendicularmente) dando así un esqueleto heterogéneo.

El proceso de envolver esta ferromalla es que, el sistema posea mayor cuantía de acero ( $\rho$ ) y apoye al núcleo central de PET que no posee ninguna adherencia por ser una superficie totalmente lisa y sea sustituida su debilidad por la fortaleza que la ferromalla aporta; que al aplicarle un mortero poseerá una adhesión instantánea llamándose a partir de este momento ferrocemento y que también distribuye de mejor manera los esfuerzos por temperatura del mortero durante su fraguado evitando agrietamientos.

La finalidad del sistema constructivo, es proveer paneles ecológicos prefabricados, que además de ahorrar tiempo en la construcción y mano de obra, con respecto a sistemas constructivos tradicionales, logren ser agentes considerables de reducción de residuos sólidos inorgánicos compresibles.

Posteriormente se les colocó un espesor promedio de 0,02 metros en cada cara del panel ecológico, con un mortero de cemento y arena para darle el grosor adecuado. El panel ecológico ya terminado posee un grosor de 0,10 metros.

## **2.2. Composición del sistema constructivo**

Conjunto de elementos, materiales, técnicas, herramientas, procedimientos y equipos, que son característicos para un tipo de edificación en particular. El panel ecológico está compuesto por:

- Núcleo central de botella termoplástica tipo PET rellena de residuos sólidos inorgánicos compresibles (fibras sintéticas de poliéster, papel común, retazos de tela, bolsitas plásticas, papel aluminizado, cartón, ripio, plásticos en general, caucho y poliestireno expandido no tóxico, auto extingible, inerte y de densidad uniforme).
- Hierro de diámetro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada que forma el marco rectangular y los pines acopladores a las columnas prefabricadas, alambre de amarre que forma los enlaces pretensados longitudinalmente y transversalmente, ferromalla de acero entrelazada y traslapada, colocada en ambas caras del panel ecológico.



- Colocación de mortero compuesto de cemento y arena de 0,02 metros de grosor en promedio para cada cara de los muros y las aristas de los mismos.

### **2.2.1. Núcleo central de botellas tipo PET (polietileno tereftalato)**

El núcleo del panel ecológico es un conjunto de botellas termoplásticas tipo PET (polietileno tereftalato) que unidas y vistas desde una sección transversal es ver un panal de abeja que al modularse de una manera ordenada se desea lograr el efecto bóveda.

Las botellas termoplásticas se puede clasificarlas de una manera general como polímeros orgánicos y los polímeros son materiales moleculares constituidos por átomos de carbón e hidrógeno.

La característica distintiva de un polímero es que cada molécula es una cadena larga o una red de unidades repetitivas, lo que incide en su alta capacidad a la presión intersticial (presión hidrostática) que ejercen las bebidas gaseosas, jugos carbonatados y fuertes enlaces para resistir esfuerzos a compresión cuando se estiban las cajas de botellas una sobre otra.

Esto se aprecia mejor considerando el polietileno *polythene* que es uno de los polímeros más sencillos que existen; los polímeros termoplásticos son fáciles de moldear o extruir debido a la ausencia de enlaces cruzados.

Un termoplástico se hace bastante plástico si se eleva la temperatura ambiente pero ya que el panel ecológico está revestido por un mortero, éste

crea una temperatura inferior internamente en comparación a la de la exterior y ayuda a la acción de dilatación térmica.

El polietileno tereftalato o tereftalato de polietileno es un polímero conocido como Terlenka o Dacrón y es un material especialmente versátil ya que puede variar considerablemente el grado de cristalinidad. La forma altamente cristalina llamada polietileno de alta densidad tiene mucha mayor rigidez que otros polímeros normales para fabricar botellas para bebidas.

El polietileno tereftalato químicamente describiéndolo es un polímero resina producto de la reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol cuyo resultado es el de un termoplástico lineal de alta cristalinidad.

La rigidez original de la botella tipo PET tiene una característica versátil ante los requerimientos de esta nueva aplicación que es la de formar los ladrillos ecológicos, cuya función es ser el material de mampostería para el relleno del panel ecológico.

La alta resistencia a la deformación del ladrillo ecológico (botella tipo PET) sumado el módulo de resiliencia que posee le permite adaptarse a la fácil modulación y mampuesto dentro del marco rectangular de acero grado 40 del panel, ya que en el momento del proceso de maquilación en el relleno de RSIC, éste confina y densifica excelentemente los RSIC sin sufrir deformación alguna durante su manipulación.

Algunas propiedades de las botellas tipo PET son:

- Resistencia al desgaste y a la corrosión
- Resistencia térmica y química

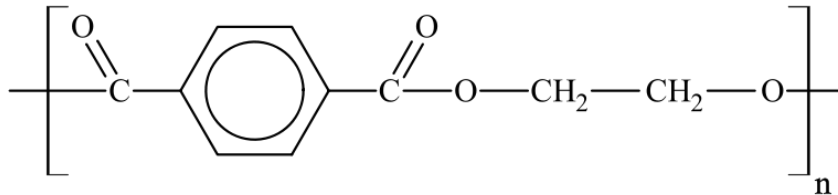
- Alto coeficiente de deslizamiento interior y exterior
- 3 R (reciclable, reutilizable, reducible)
- Inerte al contacto con el mortero de recubrimiento
- Resistencia a esfuerzos varios por su alta rigidez y dureza
- Resistencia al interperismo
- Buenas propiedades físicas y mecánicas
- Resistencia a la deformación térmica  $\geq 75$  grados centígrados

Figura 1. **Panel ecológico de botellas tipo PET**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 2. **Estructura química del polietileno**



Fuente: *Ciencia de los materiales*. J.C Anderson-K.D Leaver, J.M Alexander, R.D Rawlings: Editorial Limusa, 1978. 331p.

### **2.2.2. Residuos sólidos inorgánicos compresibles**

Los residuos sólidos inorgánicos compresibles por su definición y clasificación se puede decir que son materiales que no representan una utilidad o un valor económico para el dueño. Él se convierte por ende en generador de residuos, estos están compuestos por diferentes materiales y se pueden clasificar de varias formas, tanto por estado, origen como por características.

La composición de los residuos como lo es la materia orgánica y la materia inorgánica; la característica de los residuos como lo son el peso, volumen y densidad; la clasificación por estado como los sólidos, líquidos y gaseosos.

La clasificación por su origen como domiciliarios, comerciales, industriales y construcción o demolición; la clasificación por tipo de manejo como peligrosos, no peligrosos, inerte; la generación de residuos sólidos como la producción per cápita ( PPC en kg/hab/día); el ciclo de los residuos sólidos tales como generación, gestión, recolección, transporte, tratamiento intermedio y disposición final.

En el caso particular de este trabajo de graduación, se concentra específicamente en los residuos sólidos inorgánicos compresibles, que según las características y definiciones son aquellos que son elaborados de materiales que no se descomponen o sea que no tienen agentes biológicos degradables o que tardan demasiado tiempo en hacerlo por envejecimiento molecular, como es el caso de las botellas termoplásticas tipo PET ( polietileno tereftalato), pero dentro de nuestro material de construcción como es el panel ecológico el proceso de envejecimiento se reduce significativamente.

El proceso de envejecimiento de las botellas termoplásticas se debe por efecto del ambiente en detrimento de las propiedades elásticas de la botella sobre los enlaces covalentes ya que los polímeros son de origen orgánico (petróleo). Es un fenómeno bastante conocido así como el de los hules corrientes que sufren una pérdida semejante de la flexibilidad con el tiempo.

### **2.2.3. Ferromalla**

La ferromalla o malla de gallinero como se conoce en nuestro medio tiene la característica de ser un elemento altamente moldeable ante las formas geométricas que se le quiera dar.

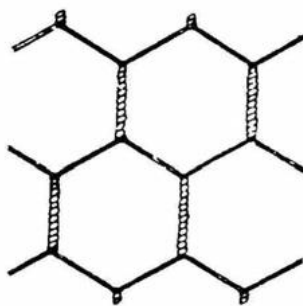
El nombre técnico de la ferromalla o vulgarmente malla de gallinero que se utilizó para la manufacturación de los paneles ecológicos es el de malla tejida cincada hexagonal de alta resistencia. La malla tejida cincada está conformada por alambres de alta tensión galvanizados, el motivo del cual estos sean galvanizados es porque en las tantas aplicaciones que se le da a la ferromalla, la mayor parte del tiempo estará expuesta al interperismo.

La ferromalla tiene alambres de refuerzo que son fabricadas con alambre de acero galvanizado de alta resistencia, ( $F_y = 125\ 000$  libras/pulgada cuadrada), en forma de hexágono alargado que le da más resistencia; este alambre de refuerzo se encuentra a cada 30 centímetros excepto en aberturas de 13 y 20 milímetros. La tela de ferromalla está formada por los dobleces de sus propios alambres.

La función principal del refuerzo de acero (ferromalla) en el ferrocemento es conformar y soportar el mortero fresco que aún no ha fraguado; seguidamente absorbe los esfuerzos de tensión que el mortero por sí solo no sería capaz de soportar y finalmente contribuye a distribuir y reducir el tamaño y número de las fisuras.

Se deben colocar adicionalmente para reforzar vanos de ventanas, puertas, esquinas o uniones en ángulo, produciendo continuidad al marco rectangular de hierro (esqueleto estructural) la malla. Se fijan al panel ecológico con amarres realizados con alambre de amarre como acción equivalente a las grapas.

Figura 3. **Ferromalla o malla de gallinero**



Fuente: muestra gráfica del proveedor.

#### **2.2.4. Concreto liviano**

Es un concreto especialmente diseñado a partir de los materiales tradicionales, cemento, arena y grava o piedra pómez de  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{3}{4}$  de pulgada de diámetro, más agua, para mantener una consistencia plástica y un peso por unidad de volumen que garantice su cualidad de liviano.

El concreto liviano tiene aplicaciones que se requieren cuando es necesario un bajo peso en materiales como rellenos y recubrimientos, paneles, elementos prefabricados, losas de entrepiso, muros divisorios fundidos en sitio, prefabricados livianos.

Las ventajas y beneficios que posee el concreto liviano es la reducción del peso de la estructura, mejor rendimiento en el tiempo de ejecución de acabados, dado su bajo peso y fácil colocación; mejora las propiedades termo acústicas de la estructura, disminuye la transmisión de vibraciones y la estabilidad en el rendimiento volumétrico en estado plástico, así como las mejores condiciones de acabado.

En el caso de este panel ecológico se dispuso utilizar un mortero como recubrimiento principal, ya que teniendo en consideración el aspecto económico, es muy difícil que la grava de  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{3}{4}$  de pulgada de diámetro sea adquirida a los que está dirigido el sistema constructivo, ya que su costo varía entre Q220, 00 a Q320, 00 el metro cúbico de grava, haciendo inaccesible su coste.

El cemento para este mortero debe ser tipo Portland de 4 000 libras por pulgada cuadrada, este debe mantenerse en un lugar seco y libre de humedad, estibado en no más de 10 sacos, para evitar compactación de sus partículas; la

arena como otro producto principal para la elaboración de este mortero, debe estar libre de materia orgánica y otras impurezas y una buena gradación de finos y gruesos, se procedió a tamizarla en un tamizador de diámetro 1/8 de pulgada.

El agua debe cumplir al menos la Norma COGUANOR 29 001 ya que es un requisito para la durabilidad y resistencia del mortero.

La relación de arena/cemento (volumen) para este mortero fue de 1:2 (1 bolsa de cemento tipo Portland 4 000 libras por pulgada cuadrada y 2 pies cúbicos de arena de río tamizada), para tener una resistencia adecuada y a la vez trabajabilidad que se obtuvo al agregar un porcentaje del 15 por ciento de cal hidratada, y evitar la fisuración por retracción.

La relación agua/cemento (peso) para este mortero fue de 1:6 (1 bolsa de cemento tipo Portland 4 000 libras por pulgada cuadrada y 6 galones de agua) para tener una buena relación entre resistencia y trabajabilidad, ya que el efecto de retracción puede aparecer si la mezcla está demasiado saturada y automáticamente disminuye la resistencia a la compresión del mortero para el panel ecológico.

El efecto o fenómeno de la retracción tiene relación directa con pérdida de humedad que posee intersticialmente la mezcla. Esta variación produce un gradiente de volumen dentro de la masa del mortero ya que se contrae y también en el aumento de agua en la mezcla puede incrementar su volumen, aunque es poco usual este último. La retracción es un fenómeno pérdida-intercambio de agua con el exterior.



En el fenómeno de la retracción del mortero para panel ecológico intervienen factores tales como:

- Humedad relativa y temperatura
- Relación agua/cemento y relación arena/cemento
- Hidratación y curado
- Relación volumen/ área expuesta

Todo esto le da valor al proceso de fabricación del panel en forma horizontal.

### **2.2.5. Ferrocemento**

El ferrocemento es la unión de ferromalla más el revestimiento o recubrimiento de un mortero, el cual es el caso de este trabajo de graduación. Este consiste en una serie de mallas muy juntas de forma hexagonal completamente envueltas en la matriz del mortero diseñado para el panel ecológico, generando así un material compuesto que nos permite tener buen comportamiento mecánico (resistencia, deformaciones) con aplicaciones de forma geométrica variadas.

La palabra ferrocemento es una combinación de un material ferroso, generalmente acero de diámetro muy pequeño en comparación al acero de refuerzo en varillas comerciales, y una matriz de mortero como el material de envoltorio.

El concepto del ACI ( American Concrete Institute) es el siguiente: El ferrocemento es un tipo de hormigón armado que se construye en secciones de pared delgada habitualmente utilizado con mortero de cemento hidráulico

reforzado con capas muy juntas de malla de alambre continuas y de diámetro relativamente pequeño. La malla puede ser de acero u otro material que resulte ser adecuado.

Los principales componentes del ferrocemento son el mortero, la malla de gallinero o malla de acero galvanizado y el alambre de amarre que une los traslapes del envoltorio que nos da una integridad estructural como sistema.

**Figura 4. Ferrocemento en funcionamiento**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

### 3. PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas y comportamientos mecánicos de todos los elementos que conforman este sistema constructivo reflejan la versatilidad de acoplarse a un fin último, que es formar paneles para uso en viviendas de bajo costo.

Tomando en consideración que la botella tipo PET y los residuos sólidos inorgánicos tienen funciones, aplicaciones y comportamientos mecánicos diferentes a los de la ferromalla, hierro y mortero; el ingenio humano puede concatenarlos de una manera lógica, bien modulada, ordenada, con un análisis profundo de todos los eventos a que se verá sometido de cargas y esfuerzos para que puedan llegar a construir una vivienda de bajo costo.

Los 6 materiales son:

- Botella tipo PET: propiedad física, alta densidad y volumen bien definido; propiedad mecánica, elevada resistencia estructural y resistencia en relación a su peso muerto.
- Residuos sólidos inorgánicos compresibles: propiedad física, baja densidad y no biodegradable; propiedad mecánica, alta compresibilidad y ahorro en relleno por partes estructurales por ser más livianos.
- Ferromalla: propiedad física, bajo peso y bajo volumen en el envuelto; propiedad mecánica, alta capacidad a la tensión, esfuerzos cortantes y torsionantes. 125 000 libras por pulgada cuadrada.

- Hierro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro grado 40: propiedad física, alta densidad y bajo volumen y peso respecto a su longitud; propiedad mecánica, alta resistencia a la fluencia  $F_y = 2\ 810$  libras por pulgada cuadrada y resistencia a los esfuerzos cortantes. Debido a su alta capacidad de resistir esfuerzos a la tensión, la varilla de hierro grado 40 es ideal para el panel ecológico como un material ingenieril, a su vez como refuerzo vertical, horizontal o como elemento de acople, es eficiente para la mampostería reforzada y confinada que son bases fundamentales para este panel ecológico. Capacidad de carga de 890 kilogramos. Norma ASTM A 615.
- Alambre de amarre: propiedad física, bajo volumen y peso respecto a su longitud; propiedad mecánica, alta resistencia a la fluencia ya que es un trefilado calibre 16 BWG con un diámetro de 1,6 milímetros el cual es recocido en un horno eléctrico con el objetivo de darle la maleabilidad requerida. En este caso los amarres especiales del panel ecológico.
- Mortero: propiedad física, alta densidad y dureza considerable; propiedad mecánica principal, alta resistencia al esfuerzo de compresión  $f'_c = 180$  kilogramos por centímetro cuadrado, alta resistencia al interperismo y trabajabilidad por su componente de cal hidratada que se utilizó en la mezcla del panel ecológico. Tipo M, que es el especificado para levantar muros con un grosor de 0,02 metros.

Es importante observar la compatibilidad de estos materiales que mejoran en su conjunto la calidad en las botellas tipo PET, y por lo tanto permiten una gama amplia de posibilidades de uso en otras aplicaciones constructivas, en este caso particular la elaboración de un nuevo material de construcción en el mundo de la mampostería que es el panel ecológico.

Tabla I. Datos de propiedades físicas y mecánicas de botellas tipo PET



**PROPIEDADES FISICAS POLITEREFTARATO DE ETILENO (PET)**

PROPIEDADES	Metodos de ensayo ISO/(IEC)	Unidades	Valores
Color		Natural	BL/Ne
Densidad	1183	g/cm <sup>3</sup>	1,39
<b>Absorcion de agua:</b>			
despues de estar 24/96 h sumergido en agua a 23°C	62	mg	jun-13
hasta la saturacion en aire a 23°C / 50% HR	62	%	0,07/0,16
hasta la saturacion en aire a 23°C		%	0,25
			0,5
<b>PROPIEDADES TERMICAS</b>			
Temperatura de Fusion		°C	255
Conductividad termica a 23°C		W/(K·m)	0,29
<b>Coefficiente de dilatacion termica lineal:</b>			
-Valor medio entre 23 y 60 °C		m/(m·K)	60·10 <sup>-6</sup>
-Valor medio entre 23 y 100°C		m/(m·K)	80·10 <sup>-6</sup>
<b>Temperatura por deformacion por carga:</b>			
-por metodo A: 1,8MPa	75	°C	75
<b>Temperatura maxima de servicio en aire:</b>			
-en periodos cortos		°C	160
-en continuo: durante 5.000/20.000 h		°C	115/100
<b>Temperatura minima de servicio</b>			-20
Inflamabilidad			
-Indice de oxigeno	4589	%	25
-con respecto a la clasificacion UL 94 (para 3/6 mm de espeso)			HB/HB
<b>PROPIEDADES MECANICAS A 23°C</b>			
<b>Ensayo de tracción</b>			
-esfuerzo de tension para fluencia	527	MPa	90
-elongacion a la rotura			15
-modulo de elasticidad			3.700
<b>Ensayo de compresion</b>			
-esfuerzo al 1/2/5% de deformación	604	MPa	26/51/103
<b>Ensayo de fluencia a traccion</b>			
-esfuerzo necesario para producir un 1% de deformación las 1.000h	899	Mpa	26
Resistencia al impacto Charpy-sin entalla	179/1eU	kJ/m2	≥50
Resistencia al impacto Charpy-con entalla	179/1eU	kJ/m2	2
Resistencia al impacto Izod- con entalla	180/2A	kJ/m2	2
Dureza con bola	2039-1	N/mm2	170
Dureza Rockwell	2039-2		M96
<b>PROPIEDADES ELECTRICAS A 23°C</b>			
Resistencia dielectrica	60243	KV/mm	22
Resistividad volumetrica	60093	Ω·cm	>10 <sup>15</sup>
Resistividad superficial		Ω	>10 <sup>15</sup>
<b>Permeabilidad relativa</b>			
-a 100 Hz	60250		3,4
-a 1 Hz	60250		3,2
<b>Factor de perdidas dielectricas a</b>			
-a 100 Hz	60250		0,001
-a 1 MHz	60250		0,014
Indice comparativo de la resistencia a la descarga superficial (CTI)	60112		600

C/ de la Creu, 89-B St. Just Desvern ( Barcelona ) Tel. 93/473-35-87 Fax. 93/473-35-87 Email: info@elaplas.es

Fuente: ELAPLAS [en línea]. [Ref. 25 de enero 2014]. Disponible en Web: <<http://www.elaplas.com.es.html>>.

Figura 5. **Elaboración del mortero para panel ecológico**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

El tipo de mortero que se diseñó para el recubrimiento mínimo de 0,02 metros para el panel ecológico fue el tipo M, que es un mortero de resistencia de 2 500 libras por pulgada cuadrada.

Es importante mencionar que el mortero se ensayó a compresión para cilindros según Norma NTG – 41017 h1 (ASTM C-39) en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para comparar la resistencia del diseño del mortero con 2 testigos de la fundición.

#### **4. PROCEDIMIENTO DE ARMADO Y ENSAMBLAJE**

El procedimiento del proceso de armado y ensamblaje está en función del lugar en donde se va a llevar a cabo el proyecto de vivienda, ya que se supone que es el beneficiado el que se encargará de los previos, que incluyen la compra de algunos materiales y la recolección de las botellas y los residuos sólidos inorgánicos compresibles.

Recordando que es un proceso puramente artesanal y no de producción masiva como es el caso de una industria que se dedica a producir paneles en serie para la construcción de viviendas.

La primera actividad para desarrollar la evaluación estructural del sistema consisten en recolectar 20 libras de residuos sólidos inorgánicos compresibles, recolectar 200 botellas tipo PET con tapitas respectivas, comprar 3 libras de alambre de amarre, comprar 1,5 varillas de hierro de  $\frac{1}{4}$  pulgada de diámetro, 6 yardas de ferromalla de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, 2 sacos de cemento 4 000 libras por pulgada cuadrada, 15 libras de cal para el control de la plasticidad, 4 carretilladas de arena de río (de preferencia) y un marco de madera rectangular de 4 pulgadas de peralte como formaleta y herramientas sencillas tales como, arco de sierra, tenaza, metro, martillo, pinza y guantes de piel.

El procedimiento de armado y ensamblaje de un panel ecológico se conforma de la siguiente manera:

- Armar un marco rectangular con el hierro de  $\frac{1}{4}$  pulgada de diámetro de base 0,80 metros por altura de 2,40 metros.
- Armar refuerzo transversal (pin acoplador) a  $h/3$  y  $2h/3$  de su altura con hierro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro.
- Perforar la base en el eje central y la tapita de la botella.
- Amarrar con alambre la base del marco rectangular e introducir la primera botella.
- Introducir hasta llenar en la primera botella (ladrillo ecológico) residuos sólidos inorgánicos compresibles y proceder a densificarlos (comprimirlos) con una varilla de apisonamiento o cualquier varilla de hierro.
- Cerrar la botella con la tapita y proceder a tensar el alambre.
- De manera continua proceder a llenar ladrillos ecológicos hasta formar la primera microcolumna y mantener tenso el alambre para proceder a amarrarlo en su otra base.
- Secuencialmente repetir todo el procedimiento de armado de microcolumnas hasta tener las 12 unidades totalmente amarradas a los extremos del marco rectangular de hierro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro, siempre en el sentido vertical.
- Teniendo armado el esqueleto principal armado se procede a ensamblar los pines acopladores en todos los vértices del marco rectangular, tanto los pines que se acoplarán a la solera de humedad y de corona (4 unidades) como los pines acopladores a las columnas o mochetas (8 unidades).
- Como paso siguiente se envuelve la ferromalla alrededor del esqueleto ya armado y ensamblado debidamente, de tal manera que sirva como el elemento de adherencia entre el esqueleto y el mortero de recubrimiento.
- En el paso siguiente se procede a reforzar con alambre de amarre con 6 tiras transversalmente el panel a cada  $h/3$  (en el traslape de ferromalla) y



se colocan los clips para que puedan amarrar los dos rostros del panel y a partir de ese momento se coloca dentro de la formaleta para su posterior fundición con mortero.

- El mortero a utilizar debe tener una proporción de relación agua-cemento de 1:2 (1 bolsa de cemento de 4 000 libras por pulgada cuadrada y dos carretillas de arena más 12 galones de agua potable).
- Finalmente se funde y se recomienda dejar fraguar el elemento a los 21 días cuando alcance el 90 por ciento de su resistencia a la compresión, para poder utilizarlo como un panel ecológico en la construcción de vivienda rural.

**Figura 6. Armadura de marco rectangular**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 7. **Armadura de acero de refuerzo transversal**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 8. **Ensamblaje de microcolumnas de botellas tipo PET**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 9. **Fundición con mortero de panel ecológico**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 10. **Fundición con mortero de segundo panel ecológico**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.



## 5. VENTAJAS Y NOBLEZA DEL SISTEMA

Las ventajas que presenta el sistema constructivo basado en el panel ecológico son tan amplias como son sus materiales esenciales. Son tan variadas las aplicaciones de sus elementos que hacen que el sistema constructivo posea una gama interesante entre sus ventajas y esto radica en el comportamiento estructural dentro de las obra de construcción.

En general las ventajas del uso de la mampostería ofrece mayor capacidad de deformación, un patrón de agrietamiento más uniforme, disminución de grietas para mismos niveles de desplazamiento horizontal sobre la altura del muro; capacidad de tomar esfuerzos por temperatura, disminución de fisuras ante cargas de servicio y mayor capacidad ante la presencia de asentamientos diferenciales.

En particular para este sistema constructivo las ventajas son:

- La configuración geométrica del panel ecológico permite realizarle cualquier tipo de ensayo con los equipos de evaluación y modularlo a cualquier diseño arquitectónico.
- Elevada resistencia estructural y resistencia en relación a su peso muerto.
- Ahorro en cimientos por partes estructurales, por ser más liviana la obra terminada.
- Uso secuencial repetitivo en el proceso de la construcción de la vivienda rural siguiendo el mismo patrón.

- La superficie que da la ferromalla permite la adherencia de un mortero inmediatamente en el proceso de su aplicación.
- La recolección de residuos sólidos inorgánicos compresibles esta al alcance de la población.
- Capacidad estructural y poco peso.
- Simplifica la cuantificación de materiales y durabilidad.

Es muy importante que al panel ecológico se le ensaye para verificar el comportamiento estructural bajo ciertas solicitudes de carga.

Los ensayos a los paneles ecológicos fueron realizados a escala natural, a compresión, a flexión vertical y finalmente a corte.

Las muestras ensayadas se realizaron con un fraguado del mortero de 21 días, según se reporta específicamente en cada ensayo. La prueba fue en un panel ecológico sólido y con un recubrimiento no menor de 0,02 metros en sus aristas.

El panel ecológico fue sometido a esfuerzo de compresión, por medio de una prensa hidráulica con capacidad de 150 000 libras. La carga se aplicó gradualmente en ellos, tomando lecturas de pandeo perpendicular al centro respecto de su altura y ancho, todo esto con la finalidad de observar el comportamiento, en la relación al esfuerzo-deformación en el elemento estructural.

En el ensayo de flexión vertical se ensayó un panel ecológico sólido de igual medida 2,4 metros de largo x 0,80 metros de ancho x 0,10 metros de espesor, fraguado a 21 días. El gato hidráulico usado fue de 10 toneladas con un área de 2,25 pulgadas cuadradas.

Para este ensayo de corte se desarrolló en la prensa hidráulica, las medidas de este panel ecológico es la misma que la de los otros 2 anteriores, de 2,40 metros por 0,80 metros por 0,10 metros de espesor, pero colocado de una manera diagonal.

Siendo los paneles ecológicos obras verticales para el apoyo de cargas, pueden estar formados por botellas plásticas que no posean grandes resistencias a la tracción.

Un panel ecológico, estáticamente, trabaja como una losa de canto. Bajo la acción de carga horizontal (viento,  $w$ ) perpendiculares al panel corre el peligro de vuelco, y bajo la acción de cargas verticales puede sufrir pandeo. Tanto el peligro de sufrir pandeo y vuelco aumentan al crecer la esbeltez  $h/e$  de la sección del panel ecológico.

La capacidad de carga de los paneles ecológicos se halla limitado por la resistencia a la compresión de la obra empleada y por el peligro de pandeo. Decrece al aumentar la esbeltez  $h/e$  de la sección del panel.

La relación de esbeltez de nuestro panel es  $h/e = 2,40 \text{ metros} / 0,10 \text{ metros} = 24$ , por lo que se puede afirmar que es un panel esbelto de acuerdo a la experiencia del asesor, que dice que al pasar de 20 ya es un elemento esbelto.

En general se puede afirmar que la nobleza y simpleza del panel ecológico descansa sobre la compatibilidad entre todos sus elementos que mejoran en su conjunto la calidad barrera en las botellas y por lo tanto permiten infinitas posibilidades de uso en la construcción de viviendas rurales.

La gran ventaja que se puede visualizar en este panel, en el momento que se integre al refuerzo vertical y horizontal (columnas y soleras) independiente a los resultados que se obtuvieron en el laboratorio, es que sus capacidades serán magnificadas por el mismo refuerzo de confinamiento al que serán integradas, y la capacidad de respuesta del panel mejorará.

Figura 11. **Relación de esbeltez de panel ecológico  $h/e= 24 \geq 20$**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.



## **6. CLASIFICACIÓN DE PANELES DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO**

Para poder clasificar los paneles ecológicos dentro de un sistema constructivo se debe desarrollar los conceptos generales y específicos para poder enmarcar debidamente con fundamento; se debe ver los paneles ecológicos dentro de la mampostería como un elemento estructural.

Las estructuras de mampostería pueden estar sometidas a diferentes solicitudes de fuerza, cargas y eventos durante su funcionamiento, que están en función de su durabilidad en el tiempo útil de servicio.

Algunas de estas solicitudes pueden ser:

- Cargas verticales o axiales (propio peso y cargas vivas).
- Esfuerzos cortantes y momentos de flexión (sismos y vientos).

Dentro de una clasificación práctica de la mampostería podemos mencionar tres, la primera, la mampostería simple; la segunda, la mampostería confinada y la tercera, la mampostería reforzada.

La mampostería simple, está formada por cualquier tipo de materiales colocados artesanalmente sin ningún tipo de refuerzo interno o externo. Presentan fallas y colapsos al no estar confinados o reforzados adecuadamente, es la mampostería más rudimentaria que existe.

La mampostería confinada es la que sus materiales de construcción mampuestos, están confinados a lo largo de su perímetro por un sistema de columnas, costillas o mochetas (elementos de refuerzo vertical a los lados del panel) y soleras (elementos de refuerzo horizontal, arriba y abajo del panel ecológico); es muy importante que no poseen solera intermedia (elemento de refuerzo horizontal intermedio a  $h/2$  de la altura), o sea que el panel desarrolla su altura total entre solera de humedad hasta solera de corona.

El comportamiento estructural de la mampostería confinada no depende totalmente del marco confinante (columnas, costillas y soleras), ya que el panel ecológico debe tener capacidad de disipar los esfuerzos que actúan sobre el (esfuerzos de compresión y esfuerzos de corte) y los momentos de flexión previo al agrietamiento diagonal, y después de este agrietamiento si ayuda el confinamiento para detener el cortante en las esquinas del panel, para evitar el transporte de una grieta a otro panel ecológico.

La mampostería reforzada está formada por materiales de construcción huecos, ya sean bloques de pómez, bloques de concreto y ladrillos tubulares que internamente están reforzadas en su interior con acero de refuerzo, y que comúnmente se le conoce como pines.

Este acero de refuerzo se coloca de forma vertical y horizontal (entre la sisa), para posteriormente vaciarle concreto, mortero o *grout*, para dejar confinado el hueco.

Pero la característica más importante y especial que posee esta mampostería es que posee a  $h/2$  de su altura una solera intermedia, por lo que refuerza el lienzo de pared, muro o paneles, y lo hace más resistente que la mampostería confinada ya que tiene no solo mayor capacidad de carga

(compresión) sino que también disminuye los esfuerzos cortantes en el mortero de las sisas, no se diga el efecto de momentos flexionantes.

El acero de refuerzo interior estará constituido por barras o varillas lisas (pines acoplador y estribos), mallas de acero, malla de gallinero, alambre de acero, varillas de hierro grado 40 límite de fluencia  $F_y = 2\ 810$  kilogramos por centímetro cuadrado.

### **6.1. Panel ecológico sistema constructivo**

El panel ecológico se acopla a columnas prefabricadas y llega a convertirse en un sistema constructivo de características propias y únicas. No puede clasificarse como uno de los tres anteriores sistemas estructurales de mampostería, ya que posee características mixtas. Se podría decir que es un sistema híbrido de la mampostería confinada y la mampostería reforzada.

La mampostería es un conjunto de dos fases de materiales, estos son: unidades y mortero, que se integran manualmente de forma ordenada y repetitiva. Existen diferentes tipos de unidades y morteros como es el caso del panel, los cuales poseen un rango amplio de propiedades físicas, propiedades mecánicas y diferentes geometrías.

El material resultante es un panel ecológico, un novedoso material ingenieril de mampostería híbrida, capaz de soportar acciones gravitatorias y demás solicitudes de cargas tales como viento, sismo y cargas vivas.

¿Por qué un sistema híbrido? Porque al comparar las características de la confinada y reforzada este nuevo sistema tiene similitudes de ambos sistemas.

Este panel ecológico viene a formar parte de un sistema de muro para viviendas equivalente o similar al llamado placa-poste. Con las diferencias de que este panel es más económico y amigable con el medio ambiente, debido a su núcleo de RSIC y cuyas caras exteriores pueden adoptar acabados arquitectónicos con mimetismo por la versatilidad del mortero de moldearse al entorno ambiental.

## **7. CARACTERÍSTICAS DE ACERO DE REFUERZO Y PIN ACOPLADOR**

El acero de refuerzo como elemento estructural de apoyo dentro de todo sistema constructivo de mampostería es de vital importancia ya que mejora el comportamiento del panel ecológico ante esfuerzos cortantes y sea mucho más eficiente para evitar la falla en el mortero de revestimiento (falla frágil).

El uso en este sistema constructivo del acero de refuerzo, visto como un marco rectangular de varillas de poco diámetro como refuerzo vertical y horizontal, permite ocupar poco espacio respecto al espesor del panel ecológico terminado, y que se pueda aprovechar en este, más área de recubrimiento de mortero (que le dará la capacidad de resistirse a los esfuerzos de compresión), formando microcolumnas o el efecto dovela; permite ser más eficiente para soportar las fuerzas de tensión que provocan los momentos de volteo.

En general la cuantía de acero ( $\rho$ ) del panel ecológico es de 5 706 centímetros cuadrados lo que corresponde a las varillas de  $\frac{1}{4}$  pulgada de diámetro grado 40 legítimo del esqueleto y los pines acopladores que son 12 unidades, sumado a eso se tiene un área de acero del alambre de amarre más la ferromalla de 1 204 centímetros cuadrados haciendo un área de acero total de  $A_s = 6,91$  centímetros cuadrados.

Para el uso estructural de este panel ecológico se considera un espesor de mortero promedio mínimo de 0,02 metros en ambas caras del panel, formando paneles terminados de 0,10 metros de grosor en general.

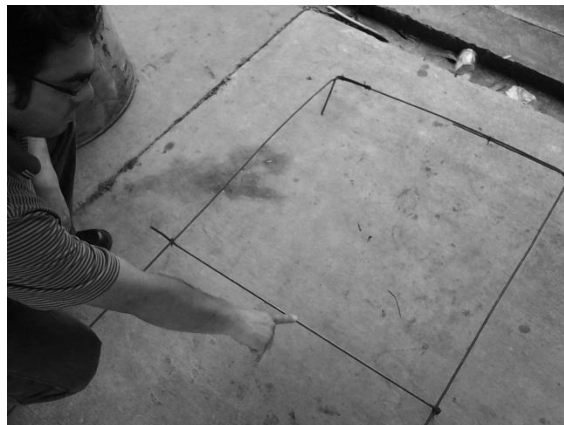
El panel ecológico trae las siguientes características estructurales:

Acero longitudinal A'	$\varnothing \frac{1}{4}$ " (de diámetro) grado 40 legítimo
Acero transversal A''	$\varnothing \frac{1}{4}$ " (de diámetro) grado 40 legítimo
Acero acoplador (Pin) A'''	$\varnothing \frac{1}{4}$ " (de diámetro) grado 40 legítimo

Características del acero:

Tensión característica de fluencia:	$f_{yk} > 500 \text{ N/mm}^2$
Tensión característica de rotura:	$f_{tk} > 580 \text{ N/mm}^2$
Densidad de las botellas tipo PET:	$8 \text{ kg/m}^3$
Espesor de las botellas tipo PET:	0,06 metros
Espesor de la pared terminada:	0,10 metros

Figura 12. **Detalle de pin acoplador para columna**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Es muy importante mencionar que adicional a la función del acero de refuerzo de aumentar la resistencia del panel ante fuerzas de compresión, corte y flexión es mantener los elementos unidos; una vez agrietado el panel

ecológico, el refuerzo en este panel evita el colapso total en el mortero (falla frágil).

El pin acoplador, es un elemento importante dentro de todos los materiales que se modularon para el panel ecológico, ya que el es la parte medular dentro del sistema constructivo, y por su ausencia no se podría integrar el panel ecológico a ninguna columna prefabricada y solera para formar el muro. El pin acoplador es el elemento que engancha las caras y donde se sujeta la ferromalla, éste genera la longitud de desarrollo total  $l^d$  y básico  $l^{db}$ .

Figura 13. **Detalle de pin acoplador para solera de corona**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Dentro del panel se modularon los siguientes pines acopladores:

- 2 pines verticales superiores ( se acoplan a la solera de corona)
- 2 pines verticales inferiores ( se acoplan a la solera de humedad)
- 4 pines horizontales izquierdos ( se acoplan a una columna)
- 4 pines horizontales derechos ( se acoplan a otra columna)

Para garantizar la continuidad de los elementos, los paneles ecológicos contienen en todos sus extremos pines acopladores que permiten unir cada uno de los paneles, a la columna o costilla del panel adyacente. En esta etapa se debe cuidar la verticalidad y la alineación de los paneles para evitar cualquier tipo de desplome. Los eventuales desplomes constituirán elementos de debilidad estructural. Los espacios vacíos entre los empalmes (entre varillas verticales o entre otros pines) producen filtraciones por agrietamiento prematuro por lo que es necesario que la barra quede debidamente embebida en mortero o *grout*.

Los vanos deben ser tenidos en cuenta al momento de realizar las operaciones de montaje, ya que disminuye su capacidad.

Las características técnicas que presentan las varillas del sistema son: el grado 40 en las varillas de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro usadas para este sistema constructivo significa que tiene un límite de fluencia de,  $F_y = 2\ 810$  kilogramos por centímetro cuadrado con una capacidad de carga de 890 kilogramos según Norma ASTM A 615; un área de acero de  $A_s = 0,317$  centímetros cuadrados y un peso de 0,187 kilogramos por metro.



## 8. TIPOLOGÍA DE LOS PANELES DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO

El cálculo de los elementos mecánicos y los desplazamientos, es parte integral del proceso de diseño de una estructura, e interesan los esfuerzos internos de las estructuras producidas por las cargas actuantes, donde los esfuerzos no excedan los valores límites de seguridad establecidos por el Código ACI-318 08 capítulo 09.

Antes de vaciar el mortero en las capas, se debe colocar la formaleta en un área nivelada totalmente plana y libre de obstáculos, para que no genere flechas y/o contraflechas no deseadas (ligero aumento de altura de centímetros por cada metro lineal, hasta el centro de la luz de panel).

Figura 14. **Vaciado del mortero y tendido del mismo**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

En el caso del presente sistema constructivo, se procedió a colocar la mano de mortero en la base inferior del panel (suelo-formaleta) antes del vaciado del mortero de la capa superior.

Para el vaciado del mortero con el sistema constructivo, los encargados de la construcción deben tener cuidado al caminar, colocando tablones de madera entre apoyos, evitando de esa manera cualquier tipo de aplastamiento.

El mortero debe ser de 180 kilogramos por centímetros cuadrados con una granulometría máxima del agregado de 2 milímetros y un espesor de 0,02 metros.

Ya fraguado el mortero de cubierta, se retiran las formaletas, desde un extremo vertical hacia los extremos horizontales, de manera que no se agriete el panel ecológico por manipuleo en sus aristas.

El proceso correcto de fraguado es esencial para obtener la resistencia necesaria de los elementos estructurales. Para evitar la evaporación violenta de humedad del mortero, se debe mantener hidratada los rostros, por dos días a partir de la última capa de mortero aplicado, como mínimo, y variará dependiendo de los efectos del clima.

Todo lo anterior, permite que el cemento se hidrate por un proceso natural, garantizando el fraguado del mortero y limitando los fenómenos debidos a su retracción. Por lo que es importante el control en la aplicación del mismo para que aumente su homogeneidad y su capacidad estructural.

La aplicación del revestimiento sobre el mortero se deberá realizar lo más tarde posible. Mientras mayor sea el tiempo transcurrido entre el curado de las capas de mortero y la colocación de revestimientos, mayor habrá sido la retracción del mortero y mayor seguridad existirá de que el revestimiento quede bien adherido.

Y por último es menester no sobrecargar un rostro del panel ecológico cuando está acostado, para no dañar el proceso de endurecimiento.

Figura 15. **Finalización de la fundición**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

El orden de actividades para la construcción de una vivienda propuesta con el presente sistema constructivo, debe ser ordenado. Las fases de construcción son:

- Construcción del panel ecológico e introducción de anclajes.
- Montaje de paneles con pines acopladores de acero en correspondencia con los ángulos, aberturas.

- Colocación vertical de los paneles con ayuda de guías y puntales.
- Trazado e instalación de tuberías y accesorios eléctricos y sanitarios.
- Fundición de columnas y costillas (refuerzos verticales).
- Retiro de puntales, después de por lo menos 8 días.
- Aplicación de acabados protegiéndolos y humedeciéndolos constantemente para obtener un buen curado.

Figura 16. **Desencofrado y forma final de paneles ecológicos**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

## 9. ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo en el centro de investigaciones de ingeniería, específicamente en la sección de estructuras. Los ensayos se realizaron con un tiempo de fraguado de los paneles ecológicos a 21 días calendario.

La finalidad de los ensayos de laboratorio es para comprobar las condiciones estructurales de los paneles, sometiéndolos a tres diferentes requisitos de carga.

Los ensayos de paneles ecológicos fueron realizados a escala natural, se inició con la prueba de compresión, posteriormente la prueba de flexión vertical y finalmente la prueba a corte; por último se agregó el informe de ensayo a compresión de dos testigos para cilindros de concreto y mortero NORMA NTG – 41017 h1 (ASTM C - 39).

Los ensayos a compresión, corte y flexión fueron realizados a escala natural y con un fraguado de 21 días. Las pruebas se llevaron a cabo con paneles totalmente sólidos, sin ningún tipo de abertura o vacío en si, y con un recubrimiento no menor a 0,02 metros en sus aristas.

Los ensayos de los dos cilindros de mortero se llevaron a cabo directamente por el personal calificado del Centro de Investigaciones de Ingeniería con 15 días de fraguado. A su vez en campo se llevó a cabo la prueba del cono de Abrahams para el revenimiento según Norma ASTM C-143.

Figura 17. Prensa hidráulica de 150 000 libras



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

### 9.1. Pruebas de compresión sobre muros

Los resultados del proceso de análisis del comportamiento individual y general de los muros sometidos al ensayo de compresión diagonal, permiten identificar la variación del esfuerzo cortante, esta prueba se llevó a cabo con un panel ecológico con medidas de 0,80 metros \* 2,40 metros \* 0,10 metros. Datos generales del ensayo a compresión:

- Fecha de fundición: 24 de octubre del 2013
- Fecha de ensayo: 14 de noviembre del 2013
- Días de fraguado: 21 días
- Proporción del mortero 1:2
- Relación agua-cemento 1:6
- Prensa hidráulica de 150 000 libras
- Deformometro 1 a  $h/2$
- Deformometro 2 a  $h/3$

Figura 18. **Prueba a compresión de panel ecológico**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

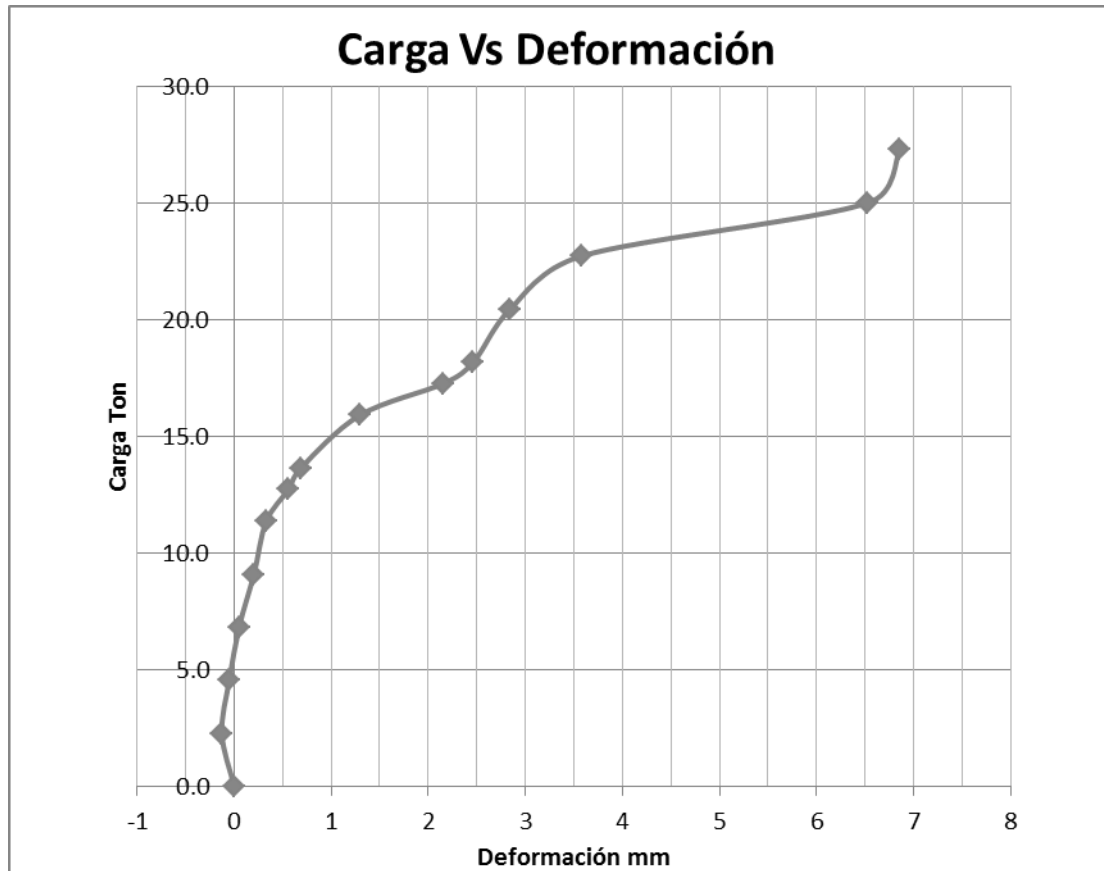
Tabla II. **Datos de ensayo a compresión deformometro 2 a h/3**

Deformometro 2: h/3										
AXIAL		0.1	0.001	plg		plg	plg	plg	plg	mm
Carga	Carga	LECTURA		LECTURA		Lectura Total	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación
Lb	Ton	Pequeña	Grande	Pequeña	Grande					
0	0.0	4	28	0.4	0.028	0.428	0	0	0	0
5000	2.3	4	23	0.4	0.023	0.423	-0.005	-0.005	-0.127	-0.127
10000	4.5	4	26	0.4	0.026	0.426	-0.002	-0.002	-0.0508	-0.0508
15000	6.8	4	30	0.4	0.03	0.43	0.002	0.002	0.0508	0.0508
20000	9.1	4	36	0.4	0.036	0.436	0.008	0.008	0.2032	0.2032
25000	11.4	4	41	0.4	0.041	0.441	0.013	0.013	0.3302	0.3302
28000	12.7	4	50	0.4	0.05	0.45	0.022	0.022	0.5588	0.5588
30000	13.6	4	55	0.4	0.055	0.455	0.027	0.027	0.6858	0.6858
35000	15.9	4	79	0.4	0.079	0.479	0.051	0.051	1.2954	1.2954
38000	17.3	5	13	0.5	0.013	0.513	0.085	0.085	2.159	2.159
40000	18.2	5	25	0.5	0.025	0.525	0.097	0.097	2.4638	2.4638
45000	20.5	5	40	0.5	0.04	0.54	0.112	0.112	2.8448	2.8448
50000	22.7	5	69	0.5	0.069	0.569	0.141	0.141	3.5814	3.5814
55000	25.0	6	85	0.6	0.085	0.685	0.257	0.257	6.5278	6.5278
60000	27.3	6	98	0.6	0.098	0.698	0.27	0.27	6.858	6.858

Fuente: elaboración propia.



Figura 19. Gráfica de compresión con deformometro 2 a h/3



Fuente: elaboración propia.

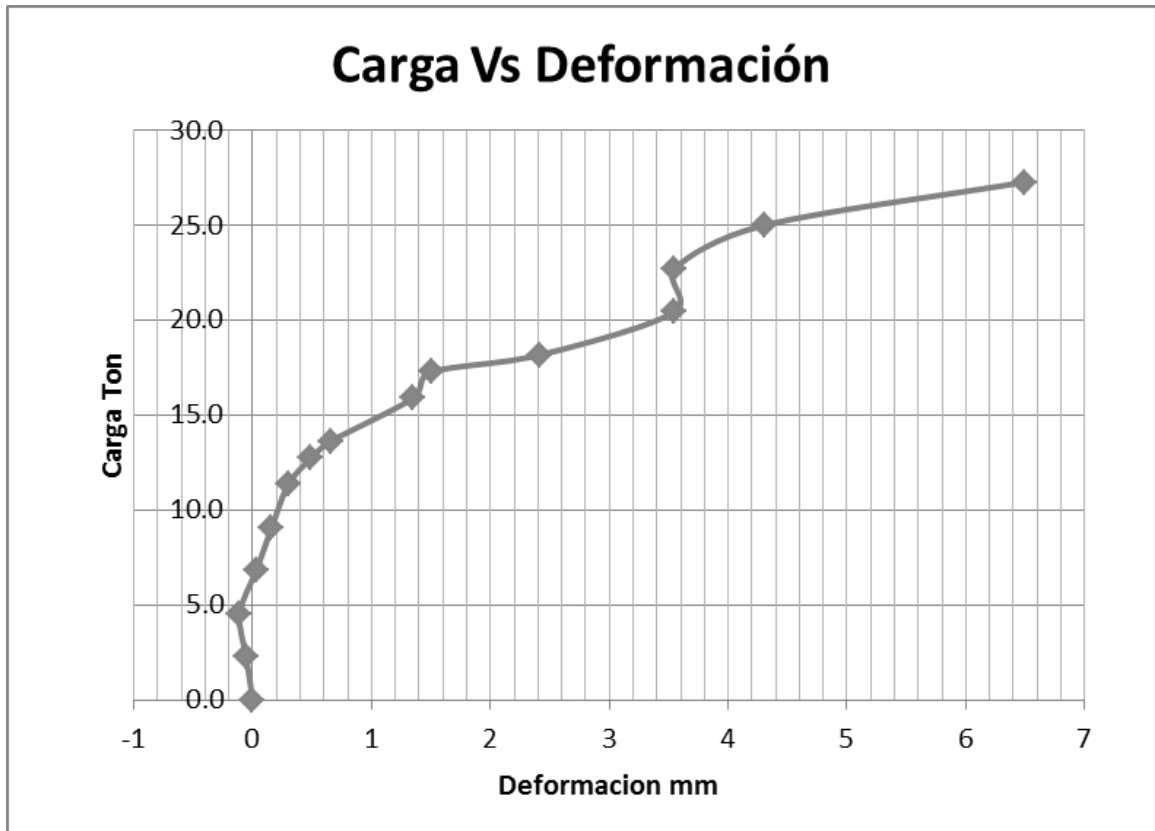
La carga que corresponde a la resistencia de compresión del sistema es de 15 694,29 kilogramos (17,3 toneladas) 19 kilogramos por centímetro cuadrado (ver capítulo 10, página 77 y 80).

Tabla III. Datos de ensayo a compresión con deformometro 1 a h/2

AXIAL		Deformometro 1: h/2									
Carga Lb	Carga Ton	1		0.01		mm		mm	mm	Deformación	
		Pequeña	Grande	LECTURA	LECTURA	Pequeña	Grande				
0	0.0	46	95	46	95	46	95	46.95	46.95	0	
5000	2.3	46	89.5	46	89.5	46	89.5	46.895	46.895	-0.055	
10000	4.5	46	84	46	84	46	84	46.84	46.84	-0.11	
15000	6.8	46	98	46	98	46	98	46.98	46.98	0.03	
20000	9.1	47	11	47	11	47	11	47.11	47.11	0.16	
25000	11.4	47	25	47	25	47	25	47.25	47.25	0.3	
28000	12.7	47	44	47	44	47	44	47.44	47.44	0.49	
30000	13.6	47	61	47	61	47	61	47.61	47.61	0.66	
35000	15.9	48	30	48	30	48	30	48.3	48.3	1.35	
38000	17.3	48	45	48	45	48	45	48.45	48.45	1.5	
40000	18.2	49	37	49	37	49	37	49.37	49.37	2.42	
45000	20.5	50	50	50	50	50	50	50.5	50.5	3.55	
50000	22.7	50	50	50	50	50	50	50.5	50.5	3.55	
55000	25.0	51	25	51	25	51	25	51.25	51.25	4.3	
60000	27.3	53	44	53	44	53	44	53.44	53.44	6.49	

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Gráfica de ensayo a compresión con deformómetro 1 a h/2



Fuente elaboración propia.

Figura 21. **Principio de grieta en la parte inferior derecha debido a Poisson**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Durante el proceso de la aplicación de la carga de compresión a 30 000 libras o 13,6 toneladas se presentó una grieta en la parte inferior derecha, (Poisson) acomodamiento del elemento en su base de apoyo. En la zona de transición elastoplástica al llegar a las 38 000 libras o 17,3 toneladas se presentan dos grietas importantes, la primera en el extremo inferior izquierdo y la segunda en el extremo superior izquierdo.

Figura 22. **Efecto dovela del mortero envolviendo botellas PET**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

La gran capacidad del panel para resistir los esfuerzos a compresión se debe también al efecto de dovela que genera el mortero al confinar el entorno de la botella PET.

Figura 23. **Vacío dejado por la dovela envolviendo microcolumnas**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 24. **Aparición de tres grietas debido a esfuerzos de compresión**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Al observar las gráficas anteriores se aprecia un valle que es generado por la zona de transición elastoplástica, que el panel experimenta un abatimiento de 1 500 libras debido al cambio de zonas, e inicia súbitamente el endurecimiento de la zona plástica. La falla a compresión se observó en las grietas que se propagaron verticalmente de abajo hacia arriba. Estas grietas se forman a través de los planos de debilidad que conforman la interface botellas PET-mortero (ver figura 22 y 23). Se puede prever que el colapso final será una combinación de fallas múltiples en forma de (X) o diagonales por la configuración de la ferromalla.

Figura 25. **Aplastamiento total de esfuerzo último al punto de ruptura**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Finalmente se generó la falla por aplastamiento en las 60 000 libras o 27,3 toneladas. Este es el punto de ruptura del panel ecológico, visualmente se ve una grieta transversal a una altura de 2,10 metros ( $7h/8$ ). Que es provocada por el aplastamiento del efecto biela o gonce.

## 9.2. Pruebas de mortero

Los morteros son una mezcla de materiales de cemento, agua agregada, y aditivos. Adhiere unidades de mampostería y es un ingrediente fundamental en el concreto.

Figura 26. Prueba de Revenimiento del mortero NORMA ASTM C 143



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

El revenimiento o *slump* es la medida de fluidez o movilidad relativa de un mortero o *grout*. Un revenimiento de 4 pulgadas de asentamiento es producto de una relación agua-cemento adecuada en promedio.

Un revenimiento  $\geq \frac{1}{2}$  pulgada no es adecuadamente plástico (muy rígido), y un revenimiento  $\leq 9$  pulgadas no es adecuadamente cohesivo (muy fluido) por lo tanto sí es muy fluido es malo y sí es más consistente es bueno, según Norma ASTM C- 143.



En el caso del mortero de los paneles el revenimiento que presentó el ensayo fue de 3,5 pulgadas por lo que está en el rango de lo debidamente adecuado, su relación agua-cemento es óptima. Por lo que se puede comprobar en la siguiente figura.

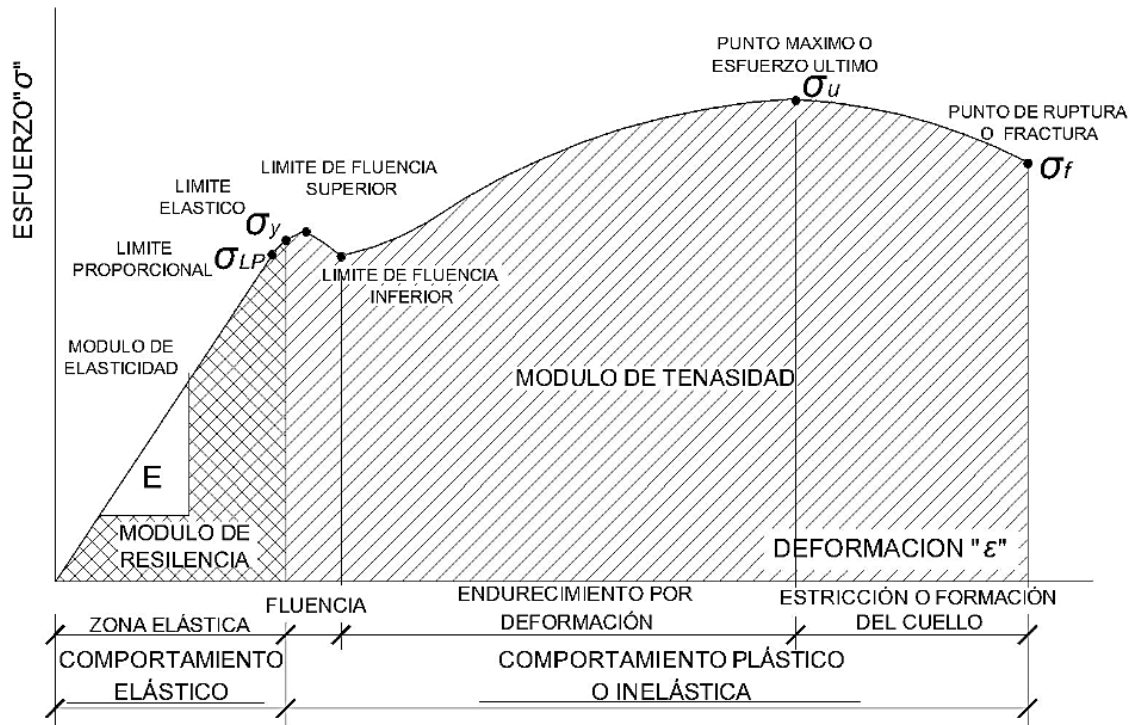
Figura 27. **Resultado de la prueba de Revenimiento de 3,5”**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

El módulo de tenacidad es un valor que determina la cantidad de energía que se necesita para romper un material, se le puede medir por la cantidad de trabajo por volumen unitario requerida para llevar el material a la falla bajo carga estática. Se determina como el área bajo el diagrama de esfuerzo-deformación completo, ver figura 4, (Ing. Carlos E. Zeceña Girón. Laboratorio de Resistencia de Materiales 1. p. 2-5).

Figura 28. Curva típica de esfuerzo-deformación



Fuente: Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila. Notas de concreto armado 2, Sabandija sin fronteras. p. 2.

### 9.3. Pruebas de flexión vertical sobre muros

Esta prueba se llevó a cabo con un panel ecológico con medidas de 0,80 \* 2,40 \* 0,10 metros. Datos generales del ensayo a flexión vertical:

- Fecha de fundición: 24 de octubre del 2013
- Fecha de ensayo: 14 de noviembre del 2013
- Días de fraguado: 21 días
- Proporción del mortero 1:2

- Relación agua-cemento 1:6
- Gato Hidráulico RC 1010 Capacidad Máxima 10 toneladas, Área 2,25 pulgadas cuadradas.
- Deformometro 1 a  $h/2$

Figura 29. **Prueba a flexión vertical de panel ecológico**



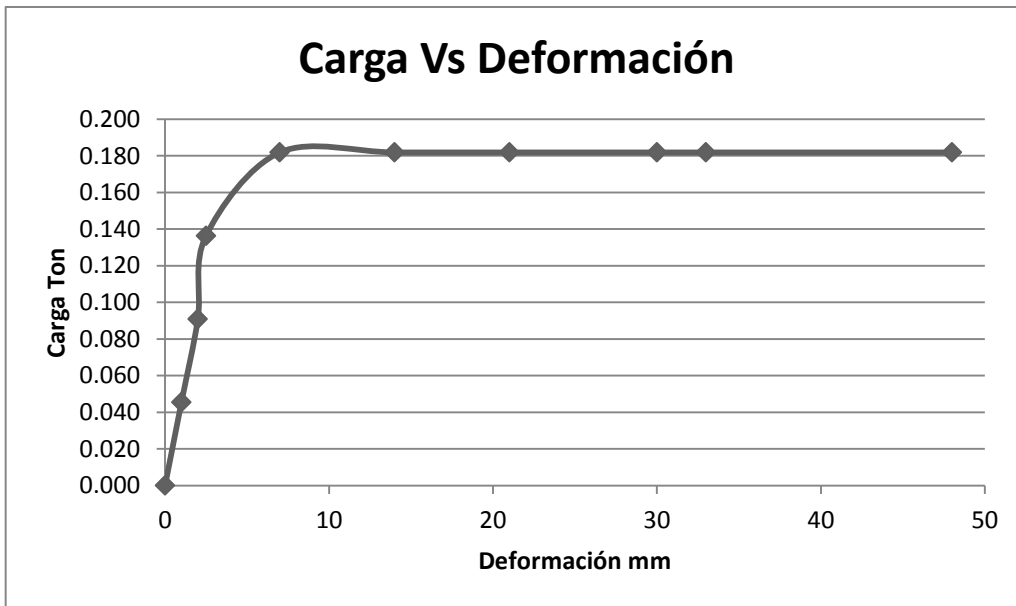
Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla IV. **Datos de ensayo a flexión vertical**

Deformometro 1: h/2						
FLEXIÓN						
Carga	Area	Carga	Carga	cm	mm	mm
Psi	In2	lb	Ton	LECTURA	LECTURA	Deformacion
0	2.24	0	0.00E+00	12.7	127	0
100.00	2.24	224	0.05	12.8	128	1
200	2.24	448	0.1	12.9	129	2
300	2.24	672	0.1	12.95	129.5	2.5
400	2.24	896	0.2	13.4	134	7
400	2.24	896	0.2	14.1	141	14
400	2.24	896	0.2	14.8	148	21
400	2.24	896	0.2	15.7	157	30
400	2.24	896	0.2	16	160	33
400	2.24	896	0.2	17.5	175	48

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfica de ensayo a flexión vertical**



Fuente: elaboración propia.

La carga que corresponde a la resistencia de la flexión vertical del sistema es de 140 kilogramos (0,1543 toneladas) (ver capítulo 10, página 82).

Figura 31. **Principio de grieta en la parte posterior debido a la monofalla**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

El panel entró súbitamente en endurecimiento, quiere decir que la carga flexionante atravesó la zona de transición elastoplástica en tan solo 127 kilogramos (0,14 toneladas) y deformando el panel en 2,5 milímetros, deformación suficiente para agrietar el concreto. Esto debido a su relación de esbeltez.

Figura 32. **Colapso total por monofalla transversal única por esbeltez**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Solo la cara del mortero a compresión trabajó durante el ensayo. No hubo fallas múltiples como se pudo observar en el ensayo a compresión. Solo se presentó una al centro del panel ecológico, por lo que fue una falla frágil del concreto, lo que nos dice que necesita acero en esa cara, tal como sucede en las vigas, donde se coloca acero en la zona de compresión para reforzar el momento flexionante.

#### 9.4. Pruebas de corte sobre muros

Esta prueba se llevó a cabo con un panel ecológico con medidas de 0,80 \* 2,40 \* 0,10 metros. Los datos generales del ensayo a corte se describen:

- Fecha de fundición: 24 de octubre del 2013
- Fecha de ensayo: 14 de noviembre del 2013
- Días de fraguado: 21 días
- Proporción del mortero 1:2
- Relación agua-cemento 1:6
- Prensa hidráulica de 150 000 libras

Figura 33. Prueba a corte de panel ecológico



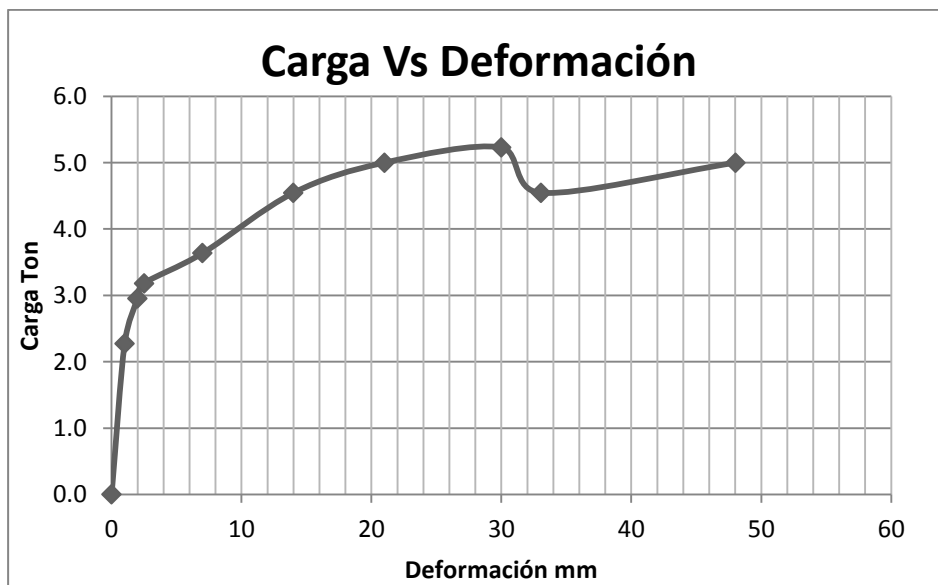
Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 34. **Datos del ensayo a corte**

AXIAL		mm
Carga Lb	Carga Ton	Deformacion
0	0.0	
5000	2.3	1.002
6500	3.0	2.003
7000	3.2	2.502
8000	3.6	7.008
10000	4.5	14.001
11000	5.0	21
11500	5.2	30.008
10000	4.5	33.052
11000	5.0	48.041

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Gráfica de ensayo a corte**

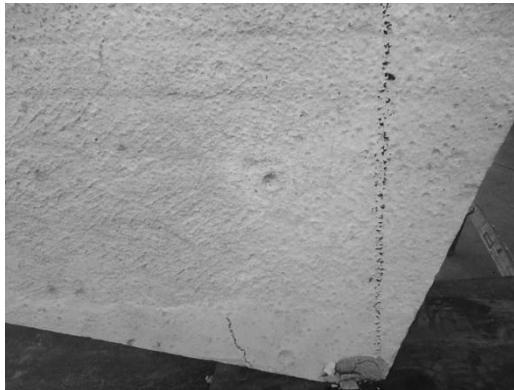


Fuente: elaboración propia.



La carga que corresponde a la resistencia al corte del sistema es de 3 181 kilogramos (3,5 toneladas) y esta corresponde a un esfuerzo último por corte de 21 kilogramos/centímetros cuadrados (ver capítulo 10, página 83)

Figura 36. **Aparecimiento de primera grieta en lado inferior izquierdo**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Al aplicar carga al panel se pudo observar algunas deformaciones de volteo en la parte baja del muro y deformaciones de movimiento lateral.

Según la gráfica, la zona de resiliencia se encuentra en la 2,3 toneladas, la zona elástica se puede observar en las 3 toneladas, la zona elastoplástica, punto donde se puede sacar la tangente y determinar la capacidad de diseño a corte está en 3,2 toneladas con una deformación de 2,502 milímetros.

Existe un valle cerca de 7,08 milímetros, donde entra a trabajar el acero y después comienza a fluir el mismo, hasta llegar a 4,5 toneladas y termina la zona de transición elastoplástica, para que finalmente se alcance la zona plástica que inicia en 4,5 toneladas y termina en 5,2 toneladas donde hay un endurecimiento del acero previo al aplastamiento.

Figura 37. **Falla por aplastamiento presentando 3 grietas en paralelo a la vertical**



Fuente: Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

## **10. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO**

### **10.1. Procedimiento y secuencia de los cálculos obtenidos en laboratorio**

El procedimiento del análisis de los resultados de los ensayos realizados a los paneles ecológicos fue en el orden de los ensayos a compresión, flexión y por último el ensayo a corte.

#### **10.1.1. Ensayo compresión, deformometro 1 a h/2 y deformometro 2 a h/3**

En ingeniería el ensayo de compresión es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión. En la mayoría de los casos se realiza con concretos y metales.

- La zona de resiliencia del elemento inicia en el rango de 0 toneladas hasta las 6 toneladas (5 443,11 kilogramos) reflejando deformaciones negativas, que son el producto del acomodamiento del panel al no tener empotramiento en sus extremos de apoyo sino que sus bases están articuladas en los extremos, este acomodamiento indica en las gráficas que a partir de este rango ya definió un sentido de ladeo.
- Al ir aumentando la carga se define su zona elástica que llega hasta las 15,9 toneladas o 14 424,24 kilogramos (ver gráficas de deformometro 1 a h/2 y deformometro 2 a h/3).

- La zona de transición elastoplástica se encuentra en las 20 toneladas (18 143,70 kilogramos) y la zona plástica inicia a partir del intervalo de 20 toneladas hasta llegar a las 22,7 toneladas (20 593,10 kilogramos). A partir de esta última carga entra a trabajar el mortero a compresión, combinando el entramado del acero de los pines acopladores, el marco rectangular de acero ( varillas de  $\varnothing 1/4$ " de diámetro) y el acero de la malla de gallinero (una cara a compresión y la otra a tensión) que es donde empieza la fluencia del acero y dentro de este rango se hace evidente el efecto de dovela.
- Sí se observa las gráficas de los dos deformómetros a h/3 y h/2 reportan un desplazamiento, una deformación similar de 3,58 milímetros.
- Es importante hacer notar que el sistema alcanzó el esfuerzo último ( $\sigma_u$ ) a la altura de las 25 toneladas (22 679,62 kilogramos) y todavía tuvo una resistencia adicional que le permitió llegar a 27,3 toneladas (24 766,14 kilogramos) que es el punto de ruptura o fractura ( $\sigma_f$ ) sin que el sistema colapsara súbitamente y se desplomara al suelo, esto evidencia que el esqueleto es confiable, ya que nunca se soltó ni puso en peligro la integridad de la modulación de la armadura interna, solo se fracturó el mortero a 2,10 metros de altura (7h/8) que es la falla de biela o gonce.

#### **10.1.2. Ensayo flexión vertical, deformómetro a h/2 (1.20 metros de altura)**

En el ensayo a flexión se desea determinar el módulo de elasticidad del panel ecológico E y determinar una constante a como factor constante, para el presente material constructivo de la ecuación  $E=f \cdot m$ .

El módulo de elasticidad es la relación entre los esfuerzos y las deformaciones unitarias en el rango elástico. El módulo de elasticidad se toma

generalmente ya sea como la pendiente de la tangente inicial a la curva o como la pendiente de una línea que une el origen y algún esfuerzo unitario arbitrario, que en general, es el esfuerzo de diseño.

Para el caso de la flexión se realizó el ensayo exclusivamente con un deformómetro a 1,20 metros de altura o nomenclatura utilizada de  $h/2$ .

- Durante el proceso de ensayo a flexión pudo inicialmente determinarse que el panel ecológico ya poseía una deflexión inicial que fue producto de la manufactura del mismo, de tal manera que cuando se colocó en la máquina de ensayo el deformómetro único a  $h/2$  detectó inmediatamente una lectura pequeña sin aplicar una carga inicial pero con deformación 0 sin que afectara el procedimiento del ensayo.
- Al aplicar una carga de flexión vertical inicial de 100 libras por pulgada cuadrada o 0,05 toneladas se tiene la primera deformación de trabajo de 1 milímetro. Esta zona de resiliencia se encuentra en el intervalo ubicado entre la carga de 0 toneladas hasta 0,05 toneladas (45 kilogramos) con una deformación de 1 milímetro en total.
- Se puede observar que la carga a flexión vertical hay un comportamiento lineal en la zona de resiliencia, manteniendo un comportamiento elástico hasta los 90 kilogramos.
- Al seguir aplicando una carga al elemento ensayado continuamente, se puede definir que la zona elástica empezó en el intervalo de la carga de 0,05 toneladas hasta terminar en 0,1 toneladas (90 kilogramos) generando una deformación de 2,5 milímetros.
- La zona de transición elastoplástica es el punto intermedio entre la zona elástica y la zona plástica; está ubicado en la intersección de la carga de 0,14 toneladas (127 kilogramos) y la deformación de 3,5 milímetros, si se observa la gráfica es evidente que este trazo se compone de una recta

vertical (90 grados) y hay una razón de cambio de la misma formando una curva y esto es debido a que el elemento empieza la fase de endurecimiento.

- La zona plástica se puede observar desde que el elemento empieza la fase de endurecimiento hasta llegar al punto máximo en la gráfica, esfuerzo último ( $\sigma_u$ ) donde está la intersección de la carga de 0,2 toneladas (180 kilogramos) y la deformación de 7 milímetros y termina en el punto intersectado por la carga siempre de 0,2 toneladas pero con una nueva deformación de 14 milímetros que es el desfase o deflexión mostrado en la gráfica. En esta zona el elemento empieza a comportarse como un plástico y procede a endurecer para entrar a la fase final.
- La fase final del panel ecológico sometido a flexión vertical debido a su alta plasticidad alcanza la zona de endurecimiento de la carga constante de 0,2 toneladas y deformación de 14 milímetros en adelante y finaliza hasta llegar al punto de ruptura o fractura ( $\sigma_f$ ) hasta la deformación de 50 milímetros.

La carga P de falla del material se encuentra ubicada en 0,14 toneladas o 127 kilogramos y la deformación para esa carga se encuentra en 2,5 milímetros.

Además se tiene la ecuación para el módulo de elasticidad E, según el código ACI para este modelo con dos cargas distribuida a L/3 donde L es la longitud del muro. La ecuación es la siguiente:

$$\Delta = \frac{0,85PL^3}{24EI}$$

De donde se despeja E para encontrar el módulo de elasticidad del sistema. Entonces la ecuación quedaría:

$$E = \frac{0,85PL^3}{24\Delta I}$$

Aquí se sustituye los valores que se obtuvieron en la prueba de donde P es la fuerza de falla, L es la longitud del muro, Δ es la deformación para esa fuerza P, e I es la inercia del muro a ensayar.

$$P = 127 \text{ kg}$$

$$L = 240 \text{ cm}$$

$$\Delta = 0,25 \text{ cm}$$

$$I = 1/12 bh^3 = 1/12(80)(10)^3 = 6\,666,00 \text{ cm}^4$$

La ecuación da como resultado:

$$E = 0,85 * 127 * \frac{240^3}{24 * 0,25 * 6\,666} = 37\,311 \text{ kg/cm}^2$$

Con este valor y con  $f'm = 30$  se puede determinar la constante a con que se debe calcular el módulo E. Entonces la ecuación quedaría:

$$a = \frac{E}{f'm} = \frac{37311}{30} = 1\,243,7 \cong 1\,200$$

Con este factor encontrado se obtiene la ecuación con que debe ser calculado el módulo elástico del sistema el cual queda de la siguiente manera:

$$E = 1\,200 f'm$$

### **10.1.3. Ensayo a corte**

La importancia de someter el panel ecológico es para verificar su comportamiento mecánico bajo requerimientos de esfuerzos de naturaleza sísmica. La resistencia al esfuerzo cortante nos permitirá conocer la capacidad del elemento bajo acción sísmica y a su vez en asentamientos diferenciales o fallas en el terreno donde se emplaza la casa rural. Verificando así las deformaciones por volteo, en la parte baja del panel y movimientos laterales.

Este ensayo fue realizado con una variable menos que en los dos ensayos anteriores. La ausencia de deformómetros estuvo presente, la razón, corroborar el principio del autor Jeans Handry que expone que la capacidad a compresión debe de ser 6 veces más que la capacidad a la corte de un mismo elemento teóricamente.

El peso específico del sistema constructivo, es de 1 080 kilogramos por metro cúbico. Lo que hace que el sistema, sea menor comparativamente con el peso del concreto que es de 2 400 kilogramos por metro cúbico. Su peso específico es aproximadamente la mitad de lo que es el concreto, lo que lo hace un material relativamente liviano, comparado con el peso del concreto.

El peso por unidad del panel ecológico es de 1,08 kilogramos por centímetro, y también el sistema debe por lo menos resistir tres veces su propio peso. Es importante considerar que el panel ecológico evaluado siempre debe considerarse como un sólido, ya que se está evaluando un elemento y no un muro o pared que en la realidad tendría los vacíos de vanos de puertas y ventanas que restarían el área total de un panel ecológico y por supuesto su capacidad a resistir el esfuerzo cortante.



- Este efecto se logró haciendo dos cortes biselados con una pulidora para concreto en dos aristas opuestas, para pararlo diagonalmente sobre la viga de apoyo de la prensa hidráulica.
- Para este ensayo no se colocaron deformómetros para medir el volteo y el desplazamiento, ya que el objetivo de este ensayo a corte es para comparar las cargas gradualmente aplicadas con las de compresión, las cargas de flexión vertical y la relación entre ellas.
- El panel ensayado a corte demostró que al aplicársele carga tuvo 3 fallas por aplastamiento en la parte inferior.
- El área de contacto de los biselados es  $A = 0,10 \text{ m} * 0,15 \text{ m} = 0,03 \text{ m}^2$ , por lo tanto el esfuerzo ( $\sigma = \text{carga}/\text{área}$ ) sobre la carga de 4,5 toneladas es de  $\sigma = 4,5 \text{ ton}/0,03 \text{ m}^2 = 150 \text{ toneladas}/\text{m}^2$ .
- En el caso de una misma carga pero en el ensayo a compresión se tiene.  $\sigma = 4,5 \text{ toneladas}/0,16 \text{ m}^2 = 28,125 \text{ ton}/\text{m}^2$ .
- El análisis de comparación entre la capacidad de corte ( $150 \text{ ton}/\text{m}^2$ ) y la capacidad de compresión ( $28,125 \text{ ton}/\text{m}^2$ ) del panel ecológico es por relación  $150/28,125 = 5,3333$ . Aproximadamente cumple el primer principio de Jeans Handry (capacidad de compresión 6 veces más que capacidad de corte). La razón porque si se observa la gráfica corte se ve que la mayor capacidad a resistir el corte se encuentra en 4,5 toneladas y la gráfica de compresión se encuentra en 24 toneladas, que es punto previo al abatimiento de aplicación de carga. ( $4,5 \text{ toneladas} * 5,3333 \text{ veces} = 23,99999 \text{ toneladas}$ ), por lo que sí cumple el principio.
- Para poder generar una gráfica de esfuerzo-deformación virtual, que pudiera simular una deformación de la carga cortante en el eje de las abscisas (x) se recurrió a el módulo o relación de Poisson ( $\mu = \text{deformación lateral} / \text{deformación axial}$ ), sabiendo también que  $\epsilon = \delta/L$  y a la ley de Hooke  $\sigma = E * \epsilon$ ; dicen que un elemento está sometido a tres

esfuerzos normales perpendiculares entre si (tres dimensiones,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ) que generan una deformación tridimensional respectivamente. Superponiendo las componentes de las deformaciones originadas por compresión y flexión vertical debida al efecto de Poisson y la ley general de Hooke, estas deben influir en las deformaciones de la carga de corte del panel ecológico.

- Matemáticamente se propuso que la carga a compresión generaba las deformaciones en el eje (y), la carga a flexión vertical generaba deformaciones en el eje (z) y la carga cortante es generada por la resultante en dos dimensiones de las deformaciones conocidas en el eje (x).

En el caso más general, el panel ecológico está sometido a tres esfuerzos perpendiculares entre sí,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , acompañadas de tres deformaciones  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$ , respectivamente. Superponiendo las componentes de la deformación originada por la contracción lateral debida al efecto de Poisson a las deformaciones directas, se obtiene el enunciado general de la ley de Hooke.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

Para el caso de este sistema se introduce la hipótesis de que en un estado de esfuerzos en un elemento, tal que se ejerce un esfuerzo  $\sigma_y$  en una dirección, puede producirse contracción lateral libremente en otra dirección (x), pero está impedida en la tercera (z), por lo que en base a este enunciado se llega a la relación del módulo de elasticidad efectivo y es aplicado a las placas que en

este caso es el ecopanel,  $E/(1 - \mu^2)$  y obteniendo la resultante por Pitágoras se generan las deformaciones para esfuerzos cortantes tabulados en la tabla No. IV.

Tabla V. **Resumen de ensayos realizados**

Descripción de ensayo	Largo (L) (mi)	Alto (A) (metros)	Relación L/A	Resiliencia del sistema (kg)	Zona elástica (kg)	Zona elastoplástica (kg)	Zona de colapso falla por aplastamiento (kg)
Compresión	0,80	2,40	0,333	4 536	7 711	10 886	18 144
Flexión	0,80	2,40	0,333	45	90	127	181
Corte	0,80	2,46	0,325	2 086	2 721	2 902	4 717

Fuente: elaboración propia.

## 10.2. Determinación de la carga de diseño de muros

La determinación de la carga o esfuerzos de diseño de los ecopaneles nos ayudará a conocer el límite de servicio dentro del rango de proporcionalidad de su comportamiento (límite elástico).

### 10.2.1. Determinación de la carga de diseño a compresión

La determinación de la carga de diseño del panel ecológico a compresión  $\sigma_c$  se determina calculando en la gráfica de h/3 la curva de capacidad de la tangente en el punto que intersecta la carga (y) de 15,9 toneladas y la deformación (x) de 1,2954 milímetros.

La capacidad del panel en el esfuerzo último  $\sigma_u$  es la tangente de 25 toneladas (22 679,62 kg) y una deformación ( $\epsilon$ ) de 6,5 milímetros. El panel ecológico trabaja a una capacidad de diseño a compresión de  $\sigma_u = P/A$ , donde;  $P = 22\ 679,62\ \text{kg}$  y  $A = 80\ \text{centímetros} \times 10\ \text{centímetros}$  (800 centímetros cuadrados).

$$\sigma_u = P/A = 22\ 679,62\ \text{kg}/800\ \text{cm}^2 \rightarrow \sigma_u = 28\ \text{kg}/\text{cm}^2$$

Este esfuerzo último se multiplica por el factor de 0,65 ( $\phi$ ) para llevarlo a esfuerzo de trabajo ( $\sigma_t$ );  $\sigma_t = \sigma_u \times 0,65$ .

$\sigma_t = 25\ \text{toneladas} \times 0,65 = 16,25\ \text{toneladas}$  (14 741,75 kg) y una deformación de ( $\epsilon$ ) 1,5 mm =  $\sigma_t = 18,42\ \text{kg}/\text{cm}^2$

Pudiendo resistir esfuerzos adicionales de hasta  $\sigma_t\ \text{máx.} = \sigma_c = 17,3$  toneladas (15 694,29 kg / 800 cm<sup>2</sup>) = 19,6178625kg/cm<sup>2</sup>,  $\rightarrow \sigma_c = 19\ \text{kg}/\text{cm}^2$ .

19 kilogramos por centímetro cuadrado es el límite de servicio dentro del rango de proporcionalidad de su comportamiento (límite elástico). Ver párrafo anterior página 80.

La capacidad de acción sísmica del panel ecológico se obtiene de los códigos IBC y UBC, que es una relación  $\sigma_t\ \text{máx.} / \sigma$  (19/28 = 0,67) que es un 67 por ciento mayor a lo que indican los códigos mencionados.

Por lo que se puede ver, la carga de diseño a compresión de 17,3 toneladas y un esfuerzo de trabajo de 19 kilogramos por centímetro cuadrado es buena. Es un hecho de que el panel tiene capacidad de soportar cargas a

compresión altas por cuatro aspectos principales: primero, núcleo bien modulado (dovela), segundo, rigidez estructural; tercero, un diseño adecuado de mortero de alta resistencia debido a su relación agua/cemento y cuarto el envoltorio del efecto ferrocemento.

### 10.2.2. Determinación de la carga de diseño a flexión vertical

La determinación de la capacidad de la carga de diseño del panel ecológico a flexión vertical  $\sigma F$  se determina calculando en la gráfica de la curva de la tangente en el punto que intersecta la carga (y) de 0,1543 toneladas y la deformación (x) de  $\epsilon=3,5$  milímetros.

La capacidad tangente del panel es de 0,1543 toneladas y 3,5 milímetros. El panel ecológico trabaja a una capacidad de diseño a flexión vertical en esfuerzo último  $\sigma_u = P/A$ , donde;  $\sigma = 0,1543$  toneladas (140 kg) y  $A = 80$  centímetros \* 80 centímetros (6 400  $\text{cm}^2$ ).

Exactamente en el punto (0,1543 toneladas, 3,5 milímetros) entró en la zona de endurecimiento súbito e inició la zona plástica, atravesando el punto de la zona de transición elastoplástica, y por lo tanto se procede a calcular el esfuerzo último de flexión vertical.

$$\sigma_u = P/A = 140 \text{ kg} / 6\,400 \text{ cm}^2, \rightarrow \sigma_u = 0,0218 \text{ kg/cm}^2.$$

Pudiendo resistir esfuerzos adicionales de hasta  $\sigma_{\text{máx.}} = 180 \text{ kg} / 6\,400 \text{ cm}^2, \rightarrow \sigma_{\text{máx.}} = 0,0220 \text{ kg/cm}^2$

Y el dato más importante en el tema a flexión vertical es  $\sigma_F = 90 \text{ kg} / 6400 \text{ cm}^2 = 0,0140625$  kilogramos por centímetro cuadrado.

$$\sigma_F = 0,0140625 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

Por lo que se puede ver, que la carga máxima es de 140 kilogramos y un esfuerzo de diseño a flexión vertical es de 0,014 kilogramos por centímetro cuadrado que es bajo con apoyos articulados, por dos aspectos principales: primero, su relación de esbeltez, que en el capítulo 5 se verificó que era demasiado esbelto según experiencia del asesor de este trabajo de graduación; y segundo, por tener apoyos articulados, recordando que se está evaluando los paneles ecológicos individualmente y no como un muro que posee soleras y columnas que confinan el panel.

### **10.2.3. Determinación de la carga de diseño a corte**

La determinación de la carga de diseño del panel ecológico a corte  $\sigma_v$  se calcula en la gráfica, la curva de capacidad tangente en el punto que intersecta la carga (y) de 3,2 toneladas y la deformación (x) de  $\epsilon = 2,502$  milímetros.

La capacidad carga última  $\sigma_u$  del panel es la tangente de 3,2 toneladas y 2,502 milímetros. El panel ecológico trabaja a una capacidad de diseño a corte de  $\sigma_v = P/A$ , donde;  $\sigma = 3,2$  toneladas (3 181,818182 kg) y  $A = 10$  centímetros \* 15 centímetros (150 centímetros cuadrados).

$$\sigma_u = P/A = 3\ 181,818182 \text{ kg} / 150 \text{ cm}^2 = 21,2121 \text{ kg/cm}^2, \rightarrow \sigma_u = 21 \text{ kg/cm}^2.$$

Pudiendo resistir esfuerzos adicionales de hasta  $\sigma_u \text{ máx.} = 4\,545,4545 \text{ kg}$  por  $150 \text{ cm}^2 = 30,30 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\rightarrow \sigma_u \text{ máx.} = 30 \text{ kg/cm}^2$ .

La capacidad de acción sísmica del panel ecológico se obtiene de los códigos IBC y UBC, que es multiplicar el factor por corte ( $\phi$ ) 0,75, que es un factor de reducción de la resistencia última, por lo que la carga de diseño final es de:  $\sigma_u \phi = 21 \text{ kg/cm}^2 * 0,75 \rightarrow \sigma_v = 16 \text{ kg/cm}^2$

Por lo que se puede ver, la carga de diseño a corte es de 3 181 kilogramos y 16 kilogramos por centímetro cuadrado es buena. Es un hecho de que el panel tiene capacidad de soportar cargas a corte medianas por dos aspectos principales: primer aspecto en contra por su esbeltez, y segundo por una cuantía de área ( $\rho$ ) de acero muy baja. También se comprobó el segundo principio de Jeans Hardy donde expone, que la capacidad al corte debe soportar al menos 3 veces su propio peso. Peso específico 1 080 kilogramos \* 3 veces = 3 240 kilogramos, y la resistencia al corte es de 3 181 kilogramos que es un valor aproximado.

#### **10.2.4. Evaluación resultados de flexocompresión**

Al compararse la deformación provocada por el ensayo a la compresión  $\epsilon = 3,56$  milímetros con la deformación del ensayo a flexión corresponde una carga de 160 kilogramos. En la figura 25 la falla de aplastamiento en la parte superior del panel aproximadamente a  $7h/8$  de altura (2,10 metros), se denota en su lectura equivalente de  $h/3$  (0,80 metros) a compresión.

Cuando se hace el análisis del módulo de tenacidad en el ensayo a flexión vertical, la gráfica que generaron los esfuerzos, en la zona de transición

elastoplástica que es alcanzado hasta los 180 kilogramos. Dentro de este rango se encuentra que la deformación  $\epsilon = 3,5$  milímetros de 140 kilogramos, se observa también en el panel a compresión a esta misma deformación  $\epsilon = 3,5$  milímetros.

Por lo que se considera que la carga de diseño a flexión corresponde a 140 kilogramos. Este valor corresponde aproximadamente a 0,75 de la carga de falla, ¿Por Qué?

Porque un elemento sometido a cargas de servicio de flexo-compresión experimenta reacciones distintas a cuando es sometido a solicitudes de carga individuales, según estudio realizado anteriormente y experiencia del asesor, indican que cuando un elemento es sometido a flexo-compresión la resistencia a la compresión absorbe la mayor parte del esfuerzo a flexión (ayudando a la resistencia a flexión).

Como es el caso del trabajo de graduación del señor José Carlos Trejo García titulada *Estudio experimental de soleras y columnas prefabricadas con tecnología de botellas plásticas y ferrocemento* desarrollada en la sección de estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Por lo que el resultado obtenido en el ensayo a flexión vertical donde la capacidad de la carga de diseño de 140 kilogramos (0,1543 toneladas), se magnifica considerablemente y mejora las condiciones de la resistencia ya bajo cargas de servicio combinadas reales de funcionamiento.

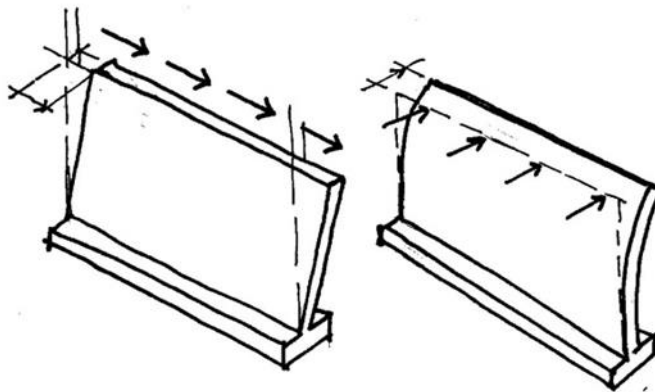
Esto lo que quiere decir es que cuando la carga a compresión se aplique sobre el eje (y) del elemento hará que la cara que es afectada en el eje (z) por



la carga de flexión vertical acorte las fibras a compresión dándole mayor resistencia a la flexión vertical del elemento y afloje las fibras en la cara a tensión.

También porque los paneles sometidos a tres ensayos; cuyas condiciones fueron con apoyos articulados o simplemente apoyados, nunca se empotraron en sus lados a un elemento que lo haya rigidizado, como lo son, la solera de humedad en su base inferior, una solera de corona en su base superior y columnas a sus laterales.

Figura 38. **Efecto de carga lateral de sismo (lateral) y viento (perpendicular)**



Fuente: manual de diseño Sismoresistente simplificado AGIES DSE 4.1 (2014).

Este es el efecto que producen las cargas o esfuerzos cortantes y flexionantes sobre el ecopanel trabajando de una manera aislada, ya que no poseen confinamiento o refuerzo vertical y horizontal, ver página 33, donde se exige que el ecopanel se integre a columnas y soleras prefabricadas, por

recomendación del asesor y también por el manual de diseño en mampostería reforzada del AGIES 4.1 (2 014).

Es importante hacer mención que la grieta provocada por el efecto biela o gonce estuvo presente en los tres ensayos, el común denominador de la altura donde se presentó el punto de ruptura ( $\sigma_f$ ) siempre fue de  $7h/8$  (2,10 metros).

Integrando el contenido a partir de este punto de la tesis del señor José Carlos Trejo García Estudio experimental de soleras y columnas prefabricadas con tecnología de botellas plásticas y ferrocemento se concatena e integra el concepto de ambos trabajos de graduación.

Al integrar el ecopanel y la columna prefabricada en un solo sistema estructural se observa la magnificación de las capacidades a resistir los esfuerzos flexocompresionantes, ya que la buena capacidad de la columna, en términos de cargas de servicio en la flexión son de:

Resultado de la columna con un diseño eficiente, con un sistema constructivo y mano de obra mejorado.

Esfuerzo en zona crítica previo a ruptura=  $65,35 \text{ kg/cm}^2$

Factor de reducción  $\phi = 0,70$

Resistencia o carga de diseño a flexión  $\sigma_F$  según ensayo=  $45,25 \text{ kg/cm}^2$   
con una  $\epsilon = 0,91 \text{ mm}$ .  $\rightarrow \sigma_F = 45,25 \text{ kg/cm}^2$

Ahora bien teniendo  $\sigma_{Fc} = 45,25 \text{ kg/cm}^2$  que es la carga o esfuerzo de diseño a flexocompresión de la columna prefabricada, nos dará una

transferencia de resistencia de la columna hacia el ecopanel, por medio de las áreas tributarias de la columna que soporta el panel en un comportamiento real (vivienda).

Esto quiere decir que la columna transfiere a su costado resistencia a la flexión al ecopanel a través de área tributaria, tomando en cuenta la relación de áreas, la columna prefabricada  $2,40 \text{ m} * 0,20 \text{ m} = 0,48 \text{ m}^2$  y el ecopanel  $2,40 * 0,80 = 1,92 \text{ m}^2$ . Pero el área tributaria de la columna hacia el ecopanel es triangular, es decir el esfuerzo se desarrolla en área triangular sobre la placa.  $A = (2,40 * 0,20) / 2 = 0,24 \text{ m}^2$ , relación de 1:8.

Por lo tanto una columna transfiere la octava parte de su resistencia al ecopanel hacia un costado. De un  $\sigma_{Fc} = 45,25 \text{ kg} / \text{cm}^2$  se pasa a tener un  $\sigma'_{Fc} = 5,6562 \text{ kg} / \text{cm}^2 * (2 \text{ columnas}) = \sigma'_{Fc} = 11,3125 \text{ kg} / \text{cm}^2$ .

Sumado a la capacidad propia de resistir la flexión del ecopanel, se tiene una resistencia o esfuerzo de diseño a flexión vertical final de  $\sigma'_{Fc} + \sigma_F = \sigma'_{Fv} = 11,3125 + 0,014 = 11,3265 \text{ kg/m}^2$ .

$\sigma'_{Fv} = 11,3265 \text{ kg/m}^2$  que es la carga de diseño final a la flexión cuya capacidad es regular. A pesar de que el comportamiento mecánico es regular, se ha obtenido una magnificación del sistema constructivo de más de 809 veces el comportamiento original como ecopanel.

Así como la columna prefabricada transfiere resistencia a flexión al ecopanel, se tiene el enunciado de columna fuerte panel débil a esta solicitud de carga; de manera inversa con el análisis comparativo de ambos trabajos de graduación, se concluye también que el ecopanel transfiere resistencia a

compresión en un rango largo a la columna prefabricada, teniendo el enunciado panel fuerte columna débil en esa solicitud de carga.

Procedo a realizar un ejemplo real de integración de cargas y solicitudes anteriormente probadas en la tesis de José Carlos Trejo García, ver página 117 del estudio experimental de soleras y columnas prefabricadas con tecnología de botellas plásticas y ferrocemento. Tomando en cuenta que el fin de estas columnas no es que trabajen aisladamente sino como parte de los ecopaneles, pero para efectos comparativos se hará uso de la suposición.

Tomando en consideración el peso del techo de lámina 6,02 kilogramos por centímetro cuadrado, presión por vientos o carga horizontal ( $w$ ) 200 kilogramos por centímetro cuadrado y carga viva extra de 100 kilogramos por centímetro cuadrado, todos los mencionados para un área tributaria de 2,5 x 2,5 equivalente a 6,25 metros cuadrados, generan 1 913 kilogramos, la consideración de carga extra se debe a posibles cambios en las condiciones de carga ya que culturalmente en Guatemala se modifican las condiciones sin considerar consecuencias.

El límite de servicio es de 40 kilogramos sobre centímetro cuadrado equivalentes a 14 400 kilogramos axiales para su sección, la carga a que se sometería la columna es de 1 913 kilogramos para las condiciones mencionadas en el párrafo anterior. De acuerdo al ACI-318-08 en su sección 21.5.1.1, las columnas se definen como miembro capaz de resistir la fuerza axial de compresión que exceda  $0.1 f'm A_g$ , donde  $14\ 400\text{ kg} > (0,1 f'm A_g)$ .

Además se debe considerar la acción de momentos y la pérdida de resistencia del concreto por lo que la carga mínima como límite es de  $0,1f'mA_g$ =

$$0,1 \cdot 40 \text{ kg/cm}^2 \cdot (19 \text{ cm})^2 = 1\,444 \text{ kilogramos.}$$

La capacidad de carga mínima en la columna corresponde al 75 por ciento de las condiciones de carga mencionadas anteriormente ( $1\,913 \text{ kg} \cdot 75\% = 1\,444 \text{ kg}$ ). Considerando que las columnas no trabajarán aisladamente sino en conjunto con ecopaneles prefabricados, el aporte de las columnas es satisfactorio hipotéticamente hasta este punto.

Integrando al párrafo anterior los resultados del esfuerzo de diseño a compresión del ecopanel ( $\sigma_c$ ) de 19 kilogramos por centímetro cuadrado, se ve que el límite de servicio de 40 kilogramos por centímetro cuadrado de la columna prefabricada aumenta a 59 kilogramos por centímetro cuadrado, por lo que ahora se procede a demostrar que las suposiciones eran totalmente ciertas; los elementos aislados al concatenarlos, y hacerlos trabajar en equipo magnifican sus capacidades y propiedades mecánicas, porque con el nuevo límite de servicio se genera el resultado final de  $0,1 \text{ f'm } A_g = 0,1 \cdot 59 \text{ kilogramos por centímetro cuadrado} \cdot (19 \text{ cm})^2 = 2\,130 \text{ kilogramos}$ .

La nueva capacidad de carga de la columna es de 2 130 kilogramos que es un 11 por ciento mayor a la integración de carga última que es la suma de carga viva y carga muerta de 1 913 kilogramos que resiste la columna prefabricada.

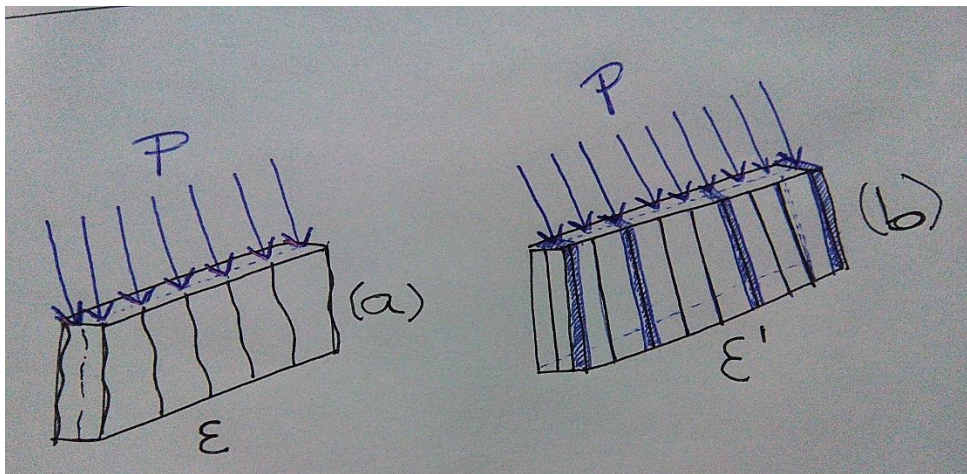
Queda así demostrado que en la práctica la transferencia de resistencia de flexocompresión existe en la interfase ecopanel-columna prefabricada, porque aumentan ambos el área de contacto en la vertical y la horizontal del plano de las fuerzas actuantes sobre el sistema constructivo, placa-poste.

Tabla VI. **Datos comparativos varios entre cuatro sistemas similares**

No.	Tipo de ensayo	Carga de Diseño kg/cm <sup>2</sup>	Comportamiento mecánico	Integración de columna	Nueva carga de diseño	Comportamiento
1	Compresión $\sigma_c$	19 kg/cm <sup>2</sup>	BUENO	.....	.....	BUENO
2	Flexión $\sigma_f$	0,0140625 kg/cm <sup>2</sup>	BAJA	SI ( $\sigma_{Fc}$ = 11.3125 kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma' F_v$ = 11.3265 kg/cm <sup>2</sup>	BUENO
3	Corte $\sigma_v$	16 kg/cm <sup>2</sup>	BUENO	.....	.....	BUENO

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Efecto de carga P**

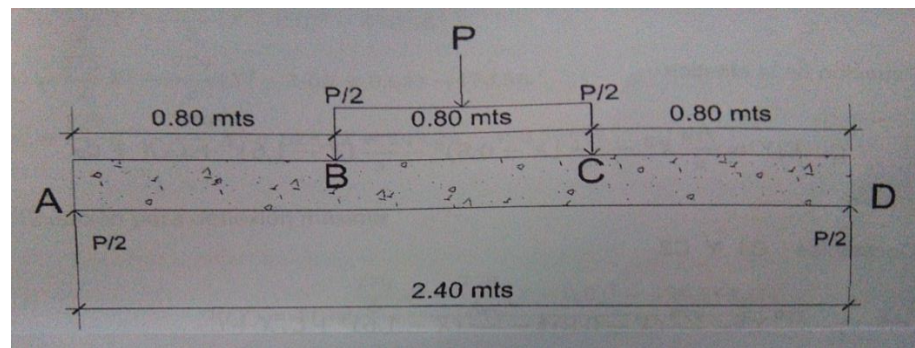


Fuente: elaboración propia.

Efecto de carga P sobre 3 ecopaneles sin confinamiento lateral simplemente acoplados (a) y el efecto de la misma carga P sobre 3 ecopaneles con confinamiento lateral con columnas prefabricadas debidamente acopladas (b).

Se puede observar que  $\epsilon > \epsilon'$ . Es evidente del comportamiento mecánico de los ecopaneles cuando no tienen confinamiento lateral (a), generan mayor deformación, debido a que sus fibras flexocompresionantes tienen una menor distribución de esfuerzos que ya rigidizadas por columnas (b).

Figura 40. **Carga equivalente P sobre panel ecológico en ensayo flexión vertical**



Fuente: TREJO GARCÍA, José Carlos. *Estudio experimental de soleras y columnas prefabricadas con tecnología de botellas plásticas y ferrocemento.*

Este gráfico representa las medidas y puntos de aplicación de una carga P sobre el ecopanel y su carga equivalente, ya que si observamos las cargas P/2 se encuentran en contacto a  $h/3$  de la altura del elemento.

Este ensayo a flexión vertical fundamenta el diseño a flexión de elementos estructurales y está basado en la Norma ASTM E529-75, que simula las condiciones de carga para determinar sus características de carga, también nos ayuda a determinar la correcta configuración estructural del diseño, materiales y técnicas de fabricación, como ya se ha visto que necesita el panel ecológico.

Se debe recordar que cuando se realizó el ensayo a flexión vertical se verificó que falló la cara a compresión del concreto primero, el acero y la malla entraron a trabajar muy tarde, lo cual se atribuye a la mala ubicación del acero y su baja cuantía ( $\rho$ ) del mismo.

Al asignar valores a la figura 40, se genera los siguientes datos que servirán para la optimización del ecopanel para próximas aplicaciones.

Carga  $P = 140$  kilogramos,  $P/2 = 70$  kilogramos,  $h/3 = 0,80$  metros y generan 3 ecuaciones de momentos que posteriormente servirán para el diseño mejorado.

$$M_{A-B} = 70X$$

$$M_{B-C} = 70X - 70(X - 0,80)$$

$$M_{C-D} = 70X - 70(X - 0,80) - 70(X - 1,60)$$



## **11. ANÁLISIS COMPARATIVO Y DE RENDIMIENTO CON OTROS SISTEMAS**

El análisis comparativo se hará entre el panel ecológico y tres sistemas similares: el primero será el electropanel de núcleo expandido de poliestireno, el segundo la pared prefabricada de concreto con refuerzo de acero grado 70 y el tercero, la tabla de yeso que es una lámina para muro a base de núcleo de yeso encapsulado en papel reciclado.

La comparación se hará desde el punto de vista de costos y de rendimiento de materiales, la razón, para comparar la factibilidad de los materiales y la facilidad económica de acceso al material de construcción.

### **11.1. Sistema electropanel**

Nombre comercial: electropanel. Sistema que cuenta con un núcleo de espuma de poliestireno expandido de 5,5 centímetros de espesor, con electromalla de acero de alta resistencia, formando la estructura principal de un muro de concreto.

Dimensiones: 2,44 metros de largo x 1,22 metros de espesor de muro terminado de 10, centímetros.

Características especiales: rápida colocación cumpliendo normas de calidad

Estructural: si.

Sismoresistente: si.

Liviano: si.

Costo final metro cuadrado: Q 147,00 m<sup>2</sup>.

Esta información es según folletos propios de los productos.

### **11.2. Sistema pared de concreto prefabricada**

Nombre comercial: barda prefabricada. Sistema: placa de concreto de 5 centímetros de espesor reforzada con electromalla, esfuerzo a compresión del concreto de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y límite de fluencia del acero de refuerzo de  $f_y = 4922 \text{ kg/cm}^2$ .

Dimensiones: 2,00 metros de largo x 0,50 metros de altura de muro terminado de 5 centímetros.

Características especiales: rápida colocación de placa manual.

Estructural: si.

Sismoresistente: si.

Liviano: no.

Costo final metro cuadrado: Q 198,00 m<sup>2</sup>.

Esta información es según folletos propios de los productos.

### **11.3. Sistema tabla de yeso**

Nombre comercial: láminas de yeso para muros interiores. Sistema: núcleo de yeso encapsulado en papel reciclado, con acabado natural y otro para la cara posterior.

Dimensiones: espesores de 12,7 y 15,9 milímetros con tableros de 1,22 metros de ancho x 2,44 metros de altura.

Características especiales: sistema económico, se pueden instalar hasta 30 metros cuadrados terminados, por jornada de trabajo.

Estructural: no.

Sismoresistente: no.

Liviano: si.

Costo final metro cuadrado: Q 110,00 m<sup>2</sup>.

Esta información es según folletos propios de los productos.

#### **11.4. Sistema panel ecológico**

Nombre comercial: sin nombre. Sistema: está formado por un núcleo de botellas termoplásticas tipo PET (polietileno tereftalato) de  $\varnothing$  0,06 metros (de diámetro), una ferromalla de acero de alta resistencia, esta tiene una resistencia según proveedor de 125 000 libras por pulgada cuadrada; y por último un sistema único de alambre de amarre pretensado que atraviesa los ladrillos ecológicos en su centro que en el momento del ensamblaje se pretensan para darles una mayor estabilidad y tensión adecuada para rigidizar el marco rectangular de hierro. Estas condiciones permiten tener una contraflecha favorable en los momentos que generaran las solicitudes de carga. Estos elementos se interconectan en ambos lados o caras del panel ecológico por un clip de alambre de amarre a noventa grados (o sea perpendicularmente) dando así un esqueleto heterogéneo.

Dimensiones: 2,40 metros de altura x 0,80 metros de base de muro terminado de 10 centímetros.

Características especiales: armado en el lugar y agente reductor de residuos sólidos inorgánicos compresibles.

Estructural: si.

Sismoresistente: si.

Liviano: si.

Costo final metro cuadrado: Q 90,00 m<sup>2</sup>.

Tabla VII. **Datos comparativos varios entre cuatro sistemas similares y costos**

No.	Nombre	Es Estructural?	Es sismoresistente?	Es Liviano?	Costo /M <sup>2</sup>
1	Electropanel	si	si	si	Q167.00/M <sup>2</sup>
2	Pared de concreto Prefabricada	si	si	no	Q198.00/M <sup>2</sup>
3	Tabla de yeso	no	si	si	Q110.00/M <sup>2</sup>
4	PANEL ECOLÓGICO	SI	REGULAR	SI	Q97.00/M <sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. El sistema constructivo, posee una capacidad de resistencia a compresión de 17 236 kilogramos y el esfuerzo de diseño a compresión ( $\sigma_c$ ) es de 19 kilogramos/centímetro cuadrado.
2. El sistema constructivo, posee una capacidad de resistencia a corte de 3 181 kilogramos y el esfuerzo de diseño a corte ( $\sigma_v$ ) es de 16 kilogramos/centímetro cuadrado.
3. El sistema constructivo, posee una capacidad de resistencia a flexión de 90 kilogramos y el esfuerzo de diseño a flexión ( $\sigma_f$ ) es de 0,014 kilogramos por centímetro cuadrado demostrando que es baja su capacidad a resistir la flexión, pero a integrarlo al confinamiento de soleras y columnas aumenta a ( $\sigma'_{fv}$ ) 11, 3265 kilogramos/centímetro cuadrado lo que resulta resistente a vientos y empujes laterales.
4. Se observó que el sistema tiene un rango elástico corto, además de iniciar fallas en los traslapes de malla.
5. Para el presente sistema constructivo la constante  $a$  con que se calcula el factor del módulo elástico, proporciona como resultado 1 200 por lo que la ecuación del módulo elástico del sistema quedaría de la siguiente manera:  $E = 1\ 200f'm$

6. La resistencia a compresión del sistema constructivo, genera una carga de 17 236 kilogramos, superando en más de 5,42 veces la resistencia a corte del sistema que es de 3 181 kilogramos, que aproximadamente es de 6 veces la resistencia.
7. El panel ecológico es un agente mitigador de residuos sólidos inorgánicos compresibles, ya que cada panel redujo un promedio de 20 libras. Se concluye que para construir una vivienda de 6 metros x 6 metros multiambientes se necesitan 850 libras de residuos sólidos inorgánicos compresibles.
8. Los costos de fabricación son bajos en comparación a sistemas constructivos tradicionales e industrializados.
9. El panel ensayado a corte demostró que al aplicársele carga tuvo 3 fallas por aplastamiento en la parte inferior. Para corregir el problema se les colocará en el futuro un refuerzo de apoyo (pin) en la parte inferior, entre el elemento horizontal de apoyo (solera de humedad) y el panel ecológico, lo que mejorará sustancialmente el comportamiento estructural del panel.
10. El pin acoplador crea una ventaja en el sistema porque evita la abertura del panel.
11. Con los resultados obtenidos si se puede construir una vivienda rural.

## RECOMENDACIONES

1. Para este sistema constructivo se recomienda usar un esfuerzo de diseño a flexión de 10 kilogramos por centímetro cuadrado, logrando mejorar su relación de esbeltez y que ésta sea menor a 20. Aumentar una nueva cuantía de acero ( $\rho'$ ) en base al análisis estructural de una nueva modulación del marco de hierro, tipo canasta en ambas caras del ecopanel.
2. En los ensayos de corte se llega a la conclusión que debido a las fallas por aplastamiento se debe evaluar la colocación de más pines en las áreas débiles en donde aparecen estas.
3. En vista del regular rendimiento del sistema constructivo a la flexión vertical se recomienda redistribuir a menor altura el intervalo de los pines acopladores, en vez de cada  $h/3$  a cada  $h/6$ . Esto para mejorar su comportamiento a las deflexiones y tener una mayor resistencia a las cargas flexionantes, específicamente más área de acero en la cara de compresión.
4. Ya que el panel ecológico tiene debilidad al aplastamiento, se recomienda colocarle refuerzo de acero con hierro N° 3 a cada 0,20 metros espaciado horizontalmente sobre la solera de humedad.
5. Inmediatamente terminado y respetando al menos 21 de fraguado del mortero se recomienda instalarse el panel ecológico asegurándose de integrarlo a la solera de humedad en la parte inferior, a la solera de corona

en la parte superior y finalmente confinarlo a las columnas prefabricadas lateralmente para luego ir formando muros para vivienda rural.

6. Se recomienda utilizar una columna prefabricada de 0,19 metros por 0,19 metros de sección cuadrada con un armado de 4 varillas de hierro de  $\varnothing \frac{3}{8}$ " y estribos de  $\varnothing \frac{1}{4}$ pulgada @ 0,10 metros, o la de la tesis estudio experimental de soleras y columnas prefabricadas con tecnología de botellas plásticas y ferrocemento del señor José Carlos Trejo García.
7. Se recomienda que el pin acoplador del panel ecológico también se haga en la columna prefabricada pero a un centímetro por debajo del nivel del pin acoplador del panel, esto para poder traslapar y amarrar adecuadamente los ganchos de sujeción.
8. Se recomienda mantener en todo momento las botellas tipo PET sujetas al marco rectangular de acero por medio del alambre de amarre tensado, ya que esta condición es la que permite al esqueleto estructural mantenerse en pie y evitando así el desplome del panel, aunque el mortero se agriete. Esto es debido a la presencia de la configuración del ensamble de las botellas, hasta el punto que el panel se puede envolver dentro de si y no desarmarse.
9. Se recomienda construir la vivienda rural siguiendo las instrucciones del proceso constructivo que en este trabajo de graduación se indicó.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ACI 318S-08. *Requisitos de Reglamento para concreto estructural y comentario*. Versión en español y en sistema métrico. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008. 518 p.
2. ÁNGEL ENRÍQUEZ, Teresa Alejandra. *Caracterización de residuos sólidos domiciliarios del condominio Villas de la Meseta, San Lucas Sacatepéquez, departamento de Sacatepéquez*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2009. 150 p.
3. ARCHILA ALFARO, Patricia Yesenia. *Métodos para construcción de vivienda, utilizando materiales tecnológicos actuales: electropanel, tabla yeso, fibroyeso*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2004. 156 p.
4. CRUZ JIMÉNEZ, Mario Rodolfo. *Análisis y evaluación de bloques de concreto aligerados con poliestireno expandido*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2009. 63 p.
5. CORZO AVILA, Mario Rodolfo. *Notas de concreto armado 2. Sabandija sin Fronteras*. 150 p.

6. MARTÍNEZ ORDOÑEZ, Julio Héctor. *Módulo de elasticidad en mampostería*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 1995, 110 p.
7. TREJO GARCÍA, José Carlos. *Estudio experimental de soleras y columnas prefabricadas con tecnología de botellas plásticas y ferrocemento*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012, 150 p.
8. ANDERSON, J.C. *Ciencia de los materiales*. México: Limusa, 1978. 331 p.
9. NASH, William A. *Resistencia de materiales*, Colombia: McGraw-Hill, 1969, 250 p.

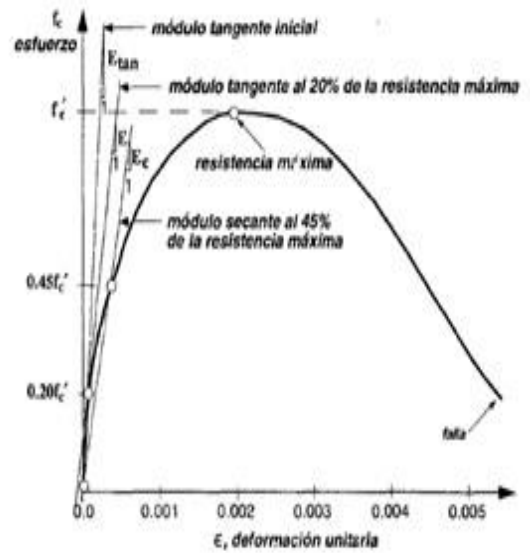
## **ANEXO**



## Diagrama esfuerzo contra deformación



(a) Diagrama esfuerzo-deformación del acero de refuerzo



(b) Diagrama esfuerzo-deformación del concreto simple

Fuente: ZECEÑA GIRÓN, Carlos E. Laboratorio de Resistencia de Materiales 1. p. 25

# Ensayo a compresión NORMA NTG-41017 h1 (ASTM C-39)



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



## INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)

S.C. - 783

O.T. No. 32277

HOJA 1/1

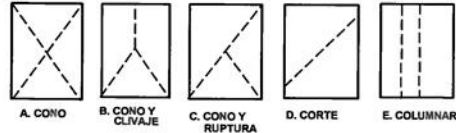
**INTERESADO:** Julio Hector Martínez Letona, Carné No. 1998-12132  
**PROYECTO:** Tesis "Optimización de panel ecológico de 0.80 metros por 2.40 metros para acoplar entre columnas prefabricadas, en vivienda rural"  
**DIRECCIÓN:** 12 Av. 10-36, zona 2. Pinares El Tejar, Chimaltenango.  
**FECHA:** 14 de noviembre de 2013

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE FUNDICIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA FUNDICIÓN	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/in <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
1	40-11	24/10/2013	08/11/2013	15	Mortero 1:2	9,890	14,917	29,700	66 440	16,90	2450	B
2	41-11	24/10/2013	08/11/2013	15	Mortero 1:2	9,840	14,990	29,700	75 349	19,00	2760	D

### OBSERVACIONES :

- Muestra proporcionada por el interesado
- Muestras ensayadas en máquina de compresión CONTROLS con capacidad de 1500 Kn.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 15000 Kn.
- Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.
- El interesado proporciono:
  - No. de cilindro en obra.
  - Fecha de fundición.
  - Edad de ensayo.
  - El representativo de la fundición.

### BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA



ATENTAMENTE,

Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.

Inga. Teima Marcela Cano Morales  
Directora CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12

Teléfono directo: 2418-9115. Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Sección de Mecánica de Suelos, CII/USAC.