



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

EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE ECOPANELES PREFABRICADOS UTILIZANDO BOTELLAS PLÁSTICAS Y FERROCEMENTO

Franz Diego Us García

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, septiembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE ECOPANELES PREFABRICADOS
UTILIZANDO BOTELLAS PLÁSTICAS Y FERROCEMENTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FRANZ DIEGO US GARCÍA

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE ECOPANELES PREFABRICADOS UTILIZANDO BOTELLAS PLÁSTICAS Y FERROCEMENTO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha marzo de 2011.

Franz Diego Us García



Guatemala, abril de 2012.

Ingeniero

Guillermo Francisco Melini Salguero

Coordinador del Área de Materiales

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Ingeniero Melini:

Por medio de la presente, le informo que he asesorado y revisado el trabajo de graduación, con título: EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE ECO-PANELES PREFABRICADOS UTILZANDO BOTELLAS PLASTICAS Y FERROCEMENTO, desarrollado por el estudiante Franz Diego Us García, con carné: 2006-14808. 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 A.
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 2089



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
6 de junio de 2012

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE ECO-PANELES PREFABRICADOS UTILIZANDO BOTELLAS PLASTICAS Y FERROCEMENTO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Franz Diego Us García, 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 Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, al trabajo de graduación del estudiante Franz Diego Us García, titulado **EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE ECO-PANELES PREFABRICADOS UTILIZANDO BOTELLAS PLASTICAS Y FERROCEMENTO** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, Septiembre de 2012.

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE ECOPANELES PREFABRICADOS UTILIZANDO BOTELLAS PLÁSTICAS Y FERROCEMENTO**, presentado por el estudiante universitario **Franz Diego Us García**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 13 de septiembre de 2012

/gdech



*You must believe that you are the best
And then make sure that you are.*

You'll never walk alone.

Bill Shankly

ACTO QUE DEDICO A:

Dios Padre	Nuestro Creador
La Virgen María	Madre de Dios
Mi mamá	Lylían Elena Us García, gracias por todo su amor y por querer siempre lo mejor para mí.
Mi tía	Rafaela Us García, por cuidarme y ayudarme.
Mi abuelo	Emilio Us Chamalé, por estar siempre a mi lado.
Mi sobrina	Alisson Guadalupe Us, por ser mi angelito, la quiero mucho.
Mi abuela	Sebastiana García que en paz descanse, flores sobre su tumba.
Mi hermano	Luis Us, gracias por estar siempre conmigo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios y la Virgen María	Por darme el tiempo y la fuerza para llegar a este momento.
Mi mamá	Por todos estos años de esfuerzo, sacrificio y sufrimiento que me permitieron llegar a ser lo que soy.
Mi tía	Por cuidarme y aconsejarme durante mi vida.
Mi abuelo	Por estar siempre a mi lado como un padre.
Ingeniero Mario Corzo	Por darme la oportunidad de desempeñarme profesionalmente a su lado, proporcionándome orientación, enseñanza, y los conocimientos necesarios para ser un profesional de éxito.
Mi tío	Esteban Us, por brindarme su tiempo y ayudarme en mi tesis.
Mi familia	Por formar parte de mi vida y brindarme momentos de alegría.
Mis compañeros	Danner Pérez, Silen Hernández, Isaías Guerra, Crisanto Aráiz, y el resto de mis compañeros, por todos los buenos momentos que vivimos juntos.

1.4.4.	Cargas de impacto.....	13
1.4.5.	Cargas de viento	14
1.4.6.	Cargas de sismo.....	14
1.5.	Comportamiento estructural de la mampostería.....	15
1.5.1.	Resistencia a compresión (fm)	16
1.5.2.	Resistencia al corte	17
1.5.3.	Módulo de elasticidad	18
1.5.3.1.	Módulo de Young (E) o módulo de elasticidad longitudinal.....	18
1.6.	Columnas esbeltas	18
1.6.1.	Fórmula de Euler para columnas esbeltas	19
1.7.	Radio de giro	22
2.	MAMPOSTERÍA DE BOTELLAS.....	23
2.1.	Polímeros	23
2.1.1.	Clasificación de los polímeros	23
2.1.1.1.	Polímero termoplástico	24
2.1.1.2.	Polímero termoestable.....	25
2.1.1.3.	Elastómeros.....	25
2.1.2.	Polietileno (PE).....	25
2.1.2.1.	Polietileno de alta densidad	26
2.1.2.2.	Polietileno de baja densidad (PEDB)	26
2.1.2.3.	Polietileno de tereftalato (PET o PETE).....	27
2.2.	Ferrocemento	29
2.2.1.	Recubrimiento	30
2.2.2.	Materiales que lo constituyen	31
2.2.2.1.	Malla de refuerzo	31
2.2.2.1.1.	Malla de alambre hexagonal.....	32
2.2.2.1.2.	Malla de alambre soldado.....	32

	2.2.2.1.3.	Malla entrelazada o entretejida ..	33
	2.2.2.2.	Acero del armazón	33
	2.2.2.3.	Cemento.....	34
	2.2.2.4.	Mortero.....	34
	2.2.2.4.1.	Propiedades del mortero	35
	2.2.2.5.	Cemento Portland puzolánico	36
	2.2.2.6.	Agregados.....	36
	2.2.2.7.	Calidad del agua de la mezcla	37
3.		CÁLCULO, ELABORACIÓN Y ENSAYO DE ECOCOLUMNAS DE BOTELLAS	39
3.1.		Cálculo de la resistencia de una ecocolumna.....	40
	3.1.1.	Procedimiento de cálculo	40
3.2.		Elaboración del elemento estructural ecocolumna.....	45
	3.2.1.	Ecocolumna construida con botellas de Coca Cola	45
	3.2.2.	Ecocolumna armada con botellas de agua pura Salvavidas.....	50
	3.2.3.	Ecocolumna armada con envases de Powerade	55
3.3.		Ensayo a compresión de las ecocolumnas.....	57
	3.3.1.	Ensayo a compresión midiendo aplastamiento.....	57
	3.3.1.1.	Ecocolumna de botellas de Coca Cola.....	57
		3.3.1.1.1. Ecocolumna vacía	58
		3.3.1.1.2. Ecocolumna rellena.....	67
	3.3.1.2.	Ecocolumna de botellas de Powerade	73
	3.3.1.	Ensayo a compresión para medir la deflexión de un elemento	78
	3.3.1.1.	Ecocolumna construida con botellas de agua pura	78
		3.3.1.1.1. Datos de la ecocolumna uno.....	86

	3.3.1.1.2.	Datos de la ecocolumna dos.....	89
	3.3.1.1.3.	Datos de la ecocolumna tres	92
	3.3.1.2.	Ecocolumna formada con botellas de Coca Cola	95
3.4.		Ecopanel prefabricado.....	114
	3.4.1.	Datos del ecopanel prefabricado	115
4.		PROCEDIMIENTO PARA CONSTRUIR UN ECOPANEL PREFABRICADO CON DIMENSIONES DE 1,20x0,58x0,10 METROS..	141
	4.1.	Paso 01: Molde de madera para hacer la fundición de los ecopaneles	142
	4.2.	Paso 02: Construcción de las ecocolumnas.....	143
	4.3.	Paso 03: Revestimiento con malla de gallinero de media pulgada.....	146
	4.4.	Paso 04: Preparación del área de trabajo y de la mezcla para hacer el ecopanel prefabricado	157
5.		NORMAS DE ENSAYO A ECOPANELES PREFABRICADOS.....	165
	5.1.	Ensayo a compresión, según la Norma ASTM E 72-02 sección 9	165
	5.1.1.	Muestras de prueba.....	165
	5.1.2.	Equipo	165
		5.1.2.1. Compresómetro	166
		5.1.2.2. Deflectómetro.....	167
	5.1.3.	Procedimiento.....	167
		5.1.3.1. Aplicación de la carga.....	167
		5.1.3.2. Datos de carga-deformación.....	167
		5.1.3.3. Desviación lateral.....	168
	5.1.4.	Cálculos y reporte.....	168

5.1.4.1.	Deformación	168
5.1.4.2.	Desviación lateral	168
5.1.4.3.	Presentación de datos.....	169
5.1.5.	Descripción y resultados obtenidos en el ensayo a compresión realizado en la sección de estructuras del CII de la USAC.....	169
5.1.5.1.	Ecopanel prefabricado No. 1	173
5.1.5.2.	Ecopanel prefabricado No. 2	179
5.1.5.3.	Ecopanel prefabricado No. 3.....	184
5.1.6.	Promedio entre gráficas para determinar el valor del esfuerzo último y el esfuerzo de diseño del ecopanel prefabricado	189
5.1.6.1.	Cálculos	193
5.2.	Ensayo a flexión vertical, según la Norma ASTM E72-02 sección 12.....	207
5.2.1.	Muestras de prueba	207
5.2.2.	Equipo.....	207
5.2.3.	Procedimiento	208
5.2.4.	Cálculos y reporte	209
5.2.4.1.	Datos de carga-deflexión	210
5.2.5.	Descripción y resultados obtenidos del ensayo a flexión realizado en la Sección de Estructuras del CII de la USAC	210
5.2.5.1.	Ecopanel prefabricado No. 01	214
5.2.5.2.	Ecopanel prefabricado No. 02.....	218
5.2.5.3.	Ecopanel prefabricado No. 03.....	223
5.2.6.	Promedio entre gráficas	227
5.3.	Ensayo a carga de impacto, según la Norma ASTM E695-03.....	240
5.3.1.	Alcances	240

5.3.2.	Significado y uso	240
5.3.3.	Resumen del método.....	241
5.3.4.	Aparatos para sistemas de pared, muestras verticales ..	241
5.3.5.	Muestras de prueba.....	242
5.3.5.1.	Tamaño.....	243
5.3.5.2.	Longitud o altura	243
5.3.5.3.	Ancho.....	243
5.3.5.4.	Edad	243
5.3.5.5.	Cantidad	244
5.3.6.	Procedimiento.....	244
5.3.6.1.	Puntos de impacto	244
5.3.6.2.	Muestra de ensamblajes de pared con carga vertical.....	244
5.3.6.3.	Deformación instantánea	245
5.3.7.	Registros	245
5.3.7.1.	Desviación y ajuste	246
5.3.8.	Descripción y resultados obtenidos en el ensayo a carga de impacto realizado en la sección de estructuras del CII de la USAC.....	246
5.3.8.1.	Ecopanel prefabricado No. 1	250
5.3.8.2.	Ecopanel prefabricado No. 2	254
5.3.8.3.	Ecopanel prefabricado No. 3	258
5.3.9.	Promedio entre gráficas.....	262
5.4.	Ensayo a tensión diagonal (corte), según la Norma ASTM E519-02.....	274
5.4.1.	Alcances	274
5.4.2.	Significado y uso	276
5.4.3.	Equipo	276
5.4.3.1.	Máquina de ensayos.....	276

5.4.3.2.	Zapatos de carga	276
5.4.4.	Especímenes de prueba	276
5.4.4.1.	Tamaño	277
5.4.4.2.	Número de muestras.....	277
5.4.5.	Procedimiento	277
5.4.5.1.	Posición de los zapatos de carga.....	277
5.4.5.2.	Ubicación de la muestra	277
5.4.5.3.	Instrumentación.....	278
5.4.5.4.	Aplicación de la carga	278
5.4.6.	Cálculos	278
5.4.6.1.	Esfuerzo cortante	279
5.4.7.	Descripción y resultados obtenidos del ensayo a corte realizado en la sección de estructuras del CII de la USAC	280
5.4.7.1.	Ecopanel prefabricado No. 01	282
5.4.7.2.	Ecopanel prefabricado No. 02	283
5.4.7.3.	Ecopanel prefabricado No. 03.....	284
CONCLUSIONES		297
RECOMENDACIONES		301
BIBLIOGRAFÍA.....		305
APÉNDICES		307
ANEXO		309

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Requisitos para mampostería confinada	4
2.	Requisitos para mampostería reforzada.....	7
3.	Desplazamiento de los niveles al moverse lateralmente el edificio, fuerzas inerciales y cortante basal.....	15
4.	Momentos de segundo orden en una columna doblemente articulada sometida a compresión.....	20
5.	Valor de k para diferentes condiciones de apoyo.....	22
6.	Forma de cortar una botella de Coca Cola.....	46
7.	Botella de Coca Cola cortada.....	47
8.	Tapón final de una ecocolumna.....	49
9.	Ecocolumna con envases de Coca Cola, terminada.....	50
10.	Forma de cortar una botella de agua pura.....	52
11.	Ecocolumna armada con envases de agua pura, terminada.....	54
12.	Ecocolumna de Powerade terminada.....	56
13.	Montaje para ensayo a compresión utilizando bomba eléctrica...	58
14.	Ecocolumna sin relleno para ser ensayada a compresión.....	59
15.	Ecocolumna ladeada, después de aplicar carga al elemento.....	60
16.	Compresión de la botella situada en la base del elemento.....	61
17.	Ecocolumna al terminar el ensayo a compresión.....	62
18.	Gráfica de carga – deformación de ecocolumna vacía.....	66
19.	Montaje para ensayo a compresión utilizando bomba eléctrica...	67

20.	Ecocolumna con aplastamiento local durante la aplicación de la carga.....	68
21.	Compresión en la base del elemento y ladeo.....	69
22.	Gráfica de carga – deformación de ecocolumna rellena.....	72
23.	Montaje para ensayo a compresión utilizando bomba eléctrica...	73
24.	Ecocolumna ladeada por la aplicación de la carga axial.....	74
25.	Aplastamiento local causado por la aplicación de la carga.....	75
26.	Gráfica de carga – deformación de ecocolumna de Powerade....	77
27.	Montaje para el ensayo a compresión usando bomba eléctrica...	79
28.	Ecocolumna uno, ladeada por la aplicación de la carga.....	80
29.	Aplastamiento en la base de la ecocolumna uno debido la aplicación de la carga.....	81
30.	Ladeo y aplastamiento en el centro de la ecocolumna dos.....	82
31.	Deflexión de la ecocolumna dos.....	83
32.	Deformación de la ecocolumna tres.....	84
33.	Aplastamiento de la ecocolumna tres.....	85
34.	Gráfica de carga – deformación de la ecocolumna uno.....	88
35.	Gráfica de carga – deformación de la ecocolumna dos.....	91
36.	Gráfica de carga – deformación de la ecocolumna tres.....	94
37.	Ecocolumna preparada para el ensayo a compresión.....	95
38.	Aplastamiento local al aplicar la carga.....	96
39.	Aplastamiento de la botella de arriba.....	97
40.	Deformación de la primera botella.....	98
41.	Aplastamiento de la primera botella de la ecocolumna.....	99
42.	Gráfica de carga – deformación de ecocolumna de Coca Cola...	101
43.	Montaje del ecopanel de botellas para ser ensayado a compresión.....	104
44.	Ensayo a compresión del ecopanel.....	105

45.	Aplastamiento de las botellas de arriba.....	106
46.	Deformación de las botellas de arriba.....	107
47.	Compresión en las botellas de la base del ecopanel (marcado con negro).....	108
48.	Aplastamiento de la base del ecopanel.....	109
49.	Aplastamiento local por la aplicación de la carga.....	110
50.	Gráfica de carga – deformación del ecopanel de botellas.....	113
51.	Ecopanel prefabricado.....	115
52.	Interior de un ecopanel prefabricado.....	116
53.	Ecopanel prefabricado y cortado en la parte de arriba para mostrar su interior.....	117
54.	Ecopanel prefabricado puesto en la máquina universal para ser evaluado.....	118
55.	Deformómetro colocado al centro del ecopanel prefabricado.....	119
56.	Deformómetro colocado a L/3 del ecopanel prefabricado.....	120
57.	Primera grieta del ecopanel al ser ensayado a compresión.....	121
58.	Grieta horizontal en la parte superior del ecopanel.....	122
59.	Agrietamiento en un costado del ecopanel.....	123
60.	Múltiples grietas en el ecopanel.....	124
61.	Aplastamiento de la esquina inferior izquierda del ecopanel.....	125
62.	Agrietamiento y descascaramiento del ecopanel.....	126
63.	Ensanchamiento de la grieta en un costado del ecopanel.....	127
64.	Ecopanel después de dejar de aplicarle carga.....	128
65.	Parte superior del ecopanel después de descargar la máquina universal.....	129
66.	Ecopanel una vez terminado el ensayo.....	130
67.	Curva de esfuerzo bruto – deformación L/2.....	135
68.	Curva de esfuerzo neto – deformación L/2.....	136
69.	Curva de esfuerzo bruto – deformación L/3.....	137

70.	Curva de esfuerzo neto – deformación L/3.....	138
71.	Proceso de selección de botellas plásticas.....	143
72.	Ecocolumnas de 1,17 m de altura.....	145
73.	Lienzo de malla de gallinero.....	147
74.	Dobleces necesarios en los lienzos de malla de gallinero.....	148
75.	Dobleces de las orillas de la malla.....	148
76.	Forma de colocar las ecocolumnas dentro de la malla de gallinero.....	149
77.	Entretejido de la malla utilizando un gancho con punta.....	150
78.	La malla, después de entretejerla.....	151
79.	Representación del armado del <i>joist</i> de alambre galvanizado.....	152
80.	<i>Joist</i> de alambre dentro del “nervio”.....	153
81.	<i>Joist</i> de alambre que va de un extremo al otro del “nervio”.....	154
82.	Ganchos que sirven para sujetar mejor la malla.....	155
83.	Ecopanel terminado.....	156
84.	Marco listo para hacer la fundición del ecopanel prefabricado.....	157
85.	Capa de mortero antes de colocar las ecocolumnas.....	159
86.	Ecocolumnas dentro del marco.....	160
87.	Ecopanel prefabricado al terminar de cubrirlo con mortero.....	161
88.	Ecopanel prefabricado terminado.....	163
89.	Prueba de carga de compresión en muestras de pared.....	166
90.	Deformómetro colocado a L/2 del ecopanel.....	170
91.	Deformómetro midiendo aplastamiento con una luz de 0,5 m....	171
92.	Deformómetros colocados para el ensayo a compresión.....	172
93.	Curva de esfuerzo – deformación del ecopanel prefabricado No. 1 con su línea de tendencia.....	177
94.	Curva de esfuerzo – deformación del ecopanel prefabricado No. 2 con su línea de tendencia.....	183

95.	Curva de esfuerzo – deformación del ecopanel prefabricado No. 3 con su línea de tendencia.....	188
96.	Promedio de la curva de esfuerzo – deformación de los tres ecopaneles con su línea de tendencia.....	190
97.	Vista en planta de un ecopanel prefabricado.....	192
98.	Agrietamiento en la parte de arriba del ecopanel prefabricado.....	195
99.	Agrietamiento del ecopanel en la parte de en medio.....	196
100.	Agrietamiento de la parte de abajo del ecopanel.....	197
101.	Agrietamiento a un costado, en la parte de abajo.....	198
102.	Agrietamiento a un costado, en la parte de arriba.....	199
103.	Agrietamiento del ancho del recubrimiento del ecopanel.....	200
104.	Aplastamiento y descascaramiento de la parte superior del ecopanel.....	201
105.	Agrietamiento horizontal en la parte de arriba del ecopanel.....	202
106.	Descascaramiento a un costado de la parte superior.....	203
107.	Aplastamiento en la parte superior del ecopanel prefabricado.....	204
108.	Aplastamiento del ecopanel prefabricado.....	205
109.	Aplastamiento de la parte inferior del ecopanel.....	206
110.	Prueba de carga transversal en muestras de pared.....	209
111.	Montaje del equipo y el ecopanel para ser ensayado a flexión vertical.....	211
112.	Deformómetro colocado para medir la flexión que produce la aplicación de la carga transversal.....	212
113.	Aplicación de la carga transversal por medio de un gato hidráulico ENERPAC.....	213
114.	Curva de esfuerzo – deformación del ensayo a flexión vertical del ecopanel No. 1.....	217
115.	Curva de esfuerzo – deformación del ensayo a flexión vertical del ecopanel No. 2.....	221

116.	Curva de esfuerzo – deformación del ensayo a flexión vertical del ecopanel No. 3.....	226
117.	Promedio de la curva de esfuerzo – deformación de los tres ecopaneles, con su línea de tendencia.....	228
118.	Agrietamiento en la parte posterior del ecopanel prefabricado.....	230
119.	Agrietamiento del ecopanel, resaltado con color negro.....	231
120.	Agrietamiento tanto en la parte de atrás como a un costado del ecopanel.....	232
121.	Fractura del recubrimiento del ecopanel debido a la aplicación de la carga transversal.....	233
122.	Grietas resaltadas con líneas de colores.....	234
123.	Fractura del recubrimiento, a un costado del ecopanel prefabricado.....	235
124.	Ecopanel prefabricado, pandeado después de aplicarle la carga transversal.....	236
125.	Descascaramiento del ecopanel.....	237
126.	Falla transversal del ecopanel.....	238
127.	Fractura del recubrimiento posterior del ecopanel prefabricado...	239
128.	Ensayo de carga de impacto (muestra vertical).....	242
129.	Montaje del equipo y de la muestra para ser ensayada a carga de impacto.....	248
130.	Deformómetro utilizado para medir la deformación y el rebote al aplicar la carga de impacto.....	249
131.	Curva de energía – deformación del ensayo a carga de impacto del ecopanel No. 1.....	253
132.	Curva de energía – deformación del ensayo a carga de impacto del ecopanel No. 2.....	257
133.	Curva de energía – deformación del ensayo a carga de impacto del ecopanel No. 3.....	261

134.	Promedio de la curva esfuerzo – deformación de los tres ecopaneles, con su línea de tendencia.....	263
135.	Agrietamiento del ecopanel prefabricado, después de aplicarle la carga de impacto.....	264
136.	Agrietamiento horizontal en el ecopanel prefabricado.....	265
137.	Agrietamiento a un costado del ecopanel prefabricado.....	266
138.	Ensanchamiento de la grieta horizontal provocada por la aplicación continua de la carga de impacto.....	267
139.	Agrietamiento a un costado del ecopanel prefabricado.....	268
140.	Mínimo agrietamiento en el frente del ecopanel, lugar donde se aplica la carga de impacto.....	269
141.	Aumento en el tamaño de la grieta, producido por la aplicación de la carga de impacto.....	270
142.	Rompimiento de la malla de gallinero y abertura del recubrimiento.....	271
143.	Fractura del ecopanel al final del ensayo a carga de impacto.....	272
144.	El ecopanel después de terminar el ensayo con carga de impacto.....	273
145.	Aparato para la determinación de la resistencia a la tracción diagonal, o resistencia al corte, en conjuntos de mampostería....	275
146.	Montaje del ecopanel en la máquina universal para ser ensayado a corte.....	281
147.	Falla por aplastamiento en la parte de abajo del ecopanel.....	288
148.	Aplastamiento en la base del ecopanel prefabricado.....	289
149.	Aplastamiento y separación del recubrimiento del ecopanel prefabricado.....	290
150.	Falla por cortante resaltada con color negro.....	291
151.	Agrietamiento debido a la aplicación de la carga.....	292
152.	Falla de corte producida por la aplicación de la carga.....	293

153.	Falla de corte resaltada con negro.....	294
154.	Agrietamiento producido a un costado del ecopanel.....	295
155.	Aplastamiento en la parte inferior del ecopanel prefabricado.....	296

TABLAS

I.	Factor de impacto de la carga viva.....	13
II.	Comparación de las tres clases de polímeros.....	24
III.	Propiedades de termoplásticos seleccionados.....	29
IV.	Características generales de los distintos tipos de mallas...	32
V.	Datos utilizados para calcular el momento de inercia.....	41
VI.	Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna vacía.....	63
VII.	Resultados obtenidos utilizando el software Excel.....	65
VIII.	Resultados usados para plotear la curva de carga – deformación	65
IX.	Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna rellena.....	70
X.	Resultados que se obtuvieron utilizando el software Excel...	71
XI.	Datos que se utilizaron para plotear la curva de carga – deformación	71
XII.	Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna.....	76
XIII.	Resultados que se trabajaron con el software Excel.....	76
XIV.	Datos que permitieron plotear la curva de carga – deformación.....	77
XV.	Resultados obtenidos del ensayo a compresión de la ecocolumna uno.....	86

XVI.	Resultados obtenidos utilizando el software Excel.....	87
XVII.	Resultados que se usaron para plotear la curva de carga – deformación.....	87
XVIII.	Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna dos.....	89
XIX.	Resultados que se registraron utilizando el software Excel...	90
XX.	Resultados que sirvieron para plotear la curva de carga – deformación.....	90
XXI.	Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna tres.....	92
XXII.	Resultados que se registraron utilizando el software Excel...	93
XXIII.	Resultados que sirvieron de base para plotear la curva de carga – deformación.....	93
XXIV.	Resultados que produjo el ensayo a compresión de la ecocolumna.....	100
XXV.	Resultados que se obtuvieron con el software Excel.....	100
XXVI.	Resultados que sirvieron para plotear la curva de carga – deformación.....	101
XXVII.	Valores de carga crítica de cada ecocolumna ensayada.....	102
XXVIII.	Resultados obtenidos en el ensayo a compresión del ecopanel de botellas.....	111
XXIX.	Resultados obtenidos utilizando el software Excel.....	112
XXX.	Resultados que sirvieron para plotear la curva de carga – deformación.....	112
XXXI.	Resultados obtenidos del ensayo a compresión del ecopanel.....	131
XXXII.	Resultados que se obtuvieron con el software Excel.....	132
XXXIII.	Resultados que se usaron para plotear la curva de esfuerzo – deformación.....	134

XXXIV.	Datos obtenidos del ensayo a compresión.....	173
XXXV.	Resultados de deformación obtenidos del análisis y la interpretación de los datos de la tabla XXXIV.....	174
XXXVI.	Resultados de esfuerzo y deformación unitaria.....	175
XXXVII.	Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación.....	176
XXXVIII.	Datos obtenidos del ensayo a compresión.....	179
XXXIX.	Resultados de deformación obtenidos después de su análisis e interpretación.....	180
XL.	Resultados de esfuerzo y deformación unitaria.....	181
XLI.	Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación.....	182
XLII.	Datos obtenidos del ensayo a compresión.....	184
XLIII.	Resultados de deformación obtenidos después de su análisis e interpretación.....	185
XLIV.	Resultados de esfuerzo y deformación unitaria.....	186
XLV.	Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación.....	187
XLVI.	Simbología de colores.....	190
XLVII.	Datos obtenidos en el ensayo a flexión vertical.....	214
XLVIII.	Resultados obtenidos después de trabajar los datos en Excel.....	215
XLIX.	Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación.....	216
L.	Datos obtenidos del ensayo a flexión vertical.....	218
LI.	Resultados obtenidos después de trabajar los datos con Excel.....	219
LII.	Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación.....	220

LIII.	Datos obtenidos del ensayo a flexión vertical.....	223
LIV.	Resultados obtenidos después de trabajar los datos en Excel.....	224
LV.	Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación.....	225
LVI.	Datos obtenidos del ensayo a carga de impacto.....	250
LVII.	Resultados obtenidos después de trabajar los datos con Excel.....	251
LVIII.	Datos utilizados para plotear la curva de energía – deformación.....	252
LIX.	Datos obtenidos del ensayo a carga de impacto.....	254
LX.	Resultados obtenidos usando Excel.....	255
LXI.	Datos utilizados para plotear la curva de energía – deformación.....	256
LXII.	Datos obtenidos del ensayo a carga de impacto.....	258
LXIII.	Resultados obtenidos después de trabajar los datos con Excel.....	259
LXIV.	Datos utilizados para plotear la curva de energía – deformación.....	260
LXV.	Resultados obtenidos del ensayo a corte del ecopanel No. 1.....	282
LXVI.	Resultados obtenidos del ensayo a corte del ecopanel No. 2.....	283
LXVII.	Resultados obtenidos en el ensayo a corte del ecopanel No. 3.....	285

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura de pared
A	Área
A _{sh}	Área de acero de refuerzo horizontal
A _{sv}	Área de acero de refuerzo vertical
P	Carga axial o de compresión
P _c	Carga crítica de Euler
cm	Centímetros
cm ²	Centímetros cuadrados
V	Cortante basal
ρ _h	Cuantía de acero de refuerzo horizontal
ρ _v	Cuantía de acero de refuerzo vertical
ε	Deformación unitaria
Δ	Deriva
D _{ext}	Diámetro exterior
D _{int}	Diámetro interior
σ	Esfuerzo
σ _c	Esfuerzo crítico
t	Espesor de pared de botellas y muros de mampostería
k	Factor de longitud efectiva
°C	Grados Celsius
kgf-m	Kilogramo fuerza metro
kg/cm ²	Kilogramo sobre centímetro cuadrado (esfuerzo)

π	Letra griega Pi
lbf	Libras fuerza
psi	Libra sobre pulgada cuadrada (esfuerzo)
l	Longitud de la columna entre apoyos
L	Longitud efectiva del elemento
J	Joule, medida de energía, un <i>Joule</i> es igual a 0.10197 kgf-m
m	Metros
mm	Milímetros
mm/mm	Milímetros sobre milímetros (deformación unitaria)
E	Módulo de elasticidad
I	Momento de Inercia
N	Newton
γ	Peso específico
%	Porcentaje
plg, plg², in	Pulgada, pulgada cuadrada, pulgadas en inglés, respectivamente
R	Radio
R_{giro}	Radio de giro
R_{ext}	Radio exterior
R_{int}	Radio interior
fm	Resistencia a compresión de las unidades de mampostería
V'm	Resistencia de diseño a corte
f'm	Resistencia de diseño a compresión de la mampostería
Sh; Sv	Separación del acero de refuerzo vertical y horizontal

GLOSARIO

Alcalinidad	Es la capacidad ácido – neutralizante de una sustancia química en solución acuosa.
Aligerante	Elemento que se coloca para aligerar o mermar el peso muerto de un elemento estructural.
Arriostramiento	Es la acción de rigidizar o estabilizar una estructura, mediante el uso de elementos que impidan el desplazamiento o la deformación de la misma.
Carga axial	Fuerza que actúa a lo largo del eje longitudinal de un miembro estructural. Se aplica al centroide de la sección transversal del mismo, y produce un esfuerzo uniforme. También se le llama fuerza axial.
Cimiento	Parte de una estructura ubicada normalmente debajo del nivel de la tierra. Distribuye el peso de la estructura al suelo, o a soportes artificiales.

Corriente Jet o corriente en chorro	Corriente de aire, fuerte y estrecha, que se concentra a lo largo de un eje casi horizontal en la alta tropósfera o en la estratósfera. Se caracteriza por una fuerte cizalladura vertical y horizontal del viento.
Corrosión	Deterioro de un material como consecuencia de un ataque electroquímico en su entorno.
Deflexión	Hace referencia al grado en el que un elemento estructural se desplaza bajo la aplicación de una fuerza.
Deformación unitaria	Se define como el cambio de longitud por unidad de longitud.
Deformómetro	Aparato que mide las deformaciones de un material o elemento estructural.
Elemento estructural	Cada una de las diferentes partes en que se puede dividir una estructura, atendiendo a su diseño.
Energía potencial	Es la que mide la capacidad que tiene el sistema para realizar un trabajo, en función exclusiva de su posición o su configuración. Depende de la fuerza de gravedad, de la masa y de la altura relativa de un objeto a algún punto de referencia.

Esfuerzo de tensión o de tracción	Es el esfuerzo al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y que tienden a estirarlo.
Flecha o deriva	Se denomina flecha a la máxima distancia entre la fibra neutra del elemento en estado de reposo, y la fibra neutra del mismo elemento después de la aplicación de la carga.
Flexión	Tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.
Límite de proporcionalidad	Valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.
Macromoléculas	Son sustancias que tienen una masa molecular elevada, formadas por un gran número de átomos. Generalmente se pueden describir como la repetición de una o unas pocas unidades mínimas, o monómeros, formando los polímeros.
Mampostería al tope	Procedimiento en el que las unidades de mampostería se colocan sin junta de mortero entre ellas.

Mampostería pegada	Procedimiento en el que las unidades de mampostería se pegan con una junta de mortero entre ellas.
Momento de inercia	Medida de la resistencia del cuerpo a moverse, si está parado, y a la inversa. Resulta de la relación entre la masa del cuerpo y la distancia al centro de giro.
Monolítico	Muy compacto, con una unión tan fuerte entre sus distintas partes, como si fuera de una sola pieza.
Monómero	Es una sustancia de pequeña masa molecular que unida por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, a otros monómeros - a veces cientos o miles- forma macromoléculas llamadas polímeros.
Mortero	Es una mezcla de material cementante, agregados y agua.
Oscilación	Es la variación, perturbación o fluctuación de un medio o sistema, en el tiempo.
Relación de esbeltez	Es la relación entre la longitud efectiva de un miembro comprimido normalmente respecto del radio de giro; ambos referidos al eje de menor inercia.

Rigidez	Es la capacidad que posee un objeto sólido, o un elemento estructural, para soportar esfuerzos, sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos.
Terremoto	Movimiento brusco de la Tierra, causado por la violenta liberación de energía acumulada durante un largo tiempo.
Zona de fluencia	También denominado límite elástico aparente. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas, y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación, sin aumento apreciable de la carga aplicada.
Zona elástica	La deformación elástica consiste en una alteración temporal que se recupera totalmente cuando la carga es eliminada. En esta zona se cumple la ley de Hooke, donde E es el módulo de Young.
Zona plástica	Es el área comprendida en un diagrama esfuerzo – deformación unitaria, por el trazo de la curva desde el límite elástico hasta el punto de ruptura, y por el tramo de la abscisa comprendida desde el valor del límite elástico y el valor correspondiente al punto de ruptura.

RESUMEN

En este trabajo de graduación se propone una opción diferente para la construcción de viviendas. Se trata de un modelo innovador que soporta las condiciones de servicio, presentes en la mayoría de viviendas de Guatemala, tales como: corte, compresión, flexión e impacto.

Por tratarse de un sistema nuevo y diferente a la práctica tradicional, no se encontró información teórica y científica anterior que respaldara las acciones y las decisiones que generó el montaje del proyecto. Esto obligó el desarrollo de estudios formales y profundos que validaron el uso del sistema antedicho en el campo de la construcción. Es por ello que en esta tesis no sólo se presenta a la comunidad un nuevo sistema para la construcción de viviendas sino que también se la provee de una guía de trabajo que se respalda en estudios y ensayos realizados, previo a la introducción del sistema de ecopaneles prefabricados.

La construcción de estos innovadores modelos se basa en el uso del ferrocemento (unión de mortero con malla de refuerzo), y las que en este trabajo se denominan ecocolumnas. Para garantizar resultados satisfactorios que den seguridad y calidad al proyecto debe cumplirse con algunos sencillos pasos que se explican en el capítulo 4. En cuanto a las mallas de refuerzo existen diferentes tipos que se adaptan a las necesidades de cada proyecto. En el caso que aquí se describe se utilizó malla de gallinero, de media pulgada, a fin de cumplir con uno de los principales objetivos de este sistema de construcción: que sea lo más económico posible, pero sin comprometer la seguridad estructural de la vivienda.

Las ecocolumnas, otro de los elementos del ecopanel prefabricado, se preparan con botellas plásticas de 600 mililitros (ml), recurso que se encuentra en diversos sectores del medio circundante. El proceso para construir las ecocolumnas es sencillo y práctico: a) Se cortan las botellas, b) Se determina el nivel de relleno que debe llevar cada envase, c) Se rellenan con basura inorgánica, limpia y seca, y d) Se las coloca una botella dentro de la otra, hasta alcanzar la altura predeterminada.

Por tratarse de un elemento estructural, nuevo y diferente, no se encontró información relacionada con su comportamiento cuando se la somete a esfuerzos de compresión. Por tal motivo, previo a la construcción de los ecopaneles prefabricados, se determinó la altura ideal de las ecocolumnas y se las visualizó como cilindros de pared delgada. Su carga crítica se obtuvo mediante la aplicación de la fórmula de Euler para columnas esbeltas. El propósito de este procedimiento fue el de recabar y aportar datos científicos que respalden el uso del sistema de las ecocolumnas.

Luego de comprobar que los elementos que conforman el ecopanel prefabricado sí son resistentes a los esfuerzos de trabajo, se procedió a su elaboración. Posteriormente fueron evaluados como un sistema. Los ensayos y las pruebas desarrolladas demostraron que la nueva modalidad que se propone para la construcción de viviendas para personas de escasos recursos económicos sí puede ser considerada como una opción seria, formal y realista que, además, representa un innegable beneficio para la conservación del medio ambiente de nuestro planeta.

El modelo que se propone es el producto final de varios cálculos, muestras y ensayos que se ejecutaron y que, simultáneamente, generaron nuevas ideas que permitirán mejorar el sistema general de construcción de viviendas económicas, funcionales y seguras. Esto puede lograrse mediante la aplicación e incorporación de nuevos elementos como vigas, columnas, uniones viga – columna, uniones columna – panel, unión panel – panel. Estudios y ensayos que están desarrollando otros compañeros estudiantes.

La validación científica de este trabajo de tesis se desarrolló por medio de diversos ensayos en la Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), con la asesoría del ingeniero Mario Corzo. Los ensayos ejecutados fueron cuatro: a) A compresión, según la norma ASTM E 72 – 02, b) A flexión vertical, según la norma ASTM E 72 – 02, c) De carga de impacto, según la norma ASTM E 695 – 03, y d) A corte o tensión diagonal, según la norma ASTM E 519 – 02. Para cada ensayo se elaboraron tres ecopaneles prefabricados que fueron evaluados veintiocho días después de su fabricación.

OBJETIVOS

General

Delinear el procedimiento para la determinación de las propiedades físico mecánicas de paneles a base de botellas de polietileno de baja densidad, rellenas de bolsas plásticas, junto al uso peculiar del ferrocemento.

Específicos

1. Evaluar según las Normas ASTM E 72 – 02, E 519 – 02 y E 695 – 03 el sistema de construcción que se propone y que se basa en el uso de ecopaneles prefabricados.
2. Analizar e interpretar los resultados de los ensayos ejecutados para determinar la factibilidad del sistema constructivo.
3. Poner a la disposición de los habitantes de escasos recursos económicos un nuevo e innovador sistema de construcción, sustentado en las normas sismo resistentes establecidas, que les permita construir una vivienda mínima, con su propia mano de obra, y con seguridad estructural.
4. Asignar a envases y bolsas plásticas un uso estructural que permita su empleo como material de construcción.

5. Validar la teoría de Euler para la P crítica, mediante la aplicación de los procedimientos técnicos establecidos.

INTRODUCCIÓN

Pura Vida es una organización internacional que se dedica a construir viviendas para las personas de escasos recursos económicos. En sus proyectos utiliza materiales reciclados, principalmente botellas plásticas, rellenas con basura inorgánica, que se utilizan como material de relleno dentro de una estructura de madera con recubrimiento de cemento.

Partiendo de la idea original de Pura Vida, se plantea la posibilidad de construir viviendas con paneles prefabricados denominados, según el proyecto que propongo, ecopaneles prefabricados. La base de estos ecopaneles la constituye el uso de botellas plásticas y ferrocemento. La diferencia principal con el proyecto original consiste en que las botellas plásticas se utilizarán como columnas, recubiertas con malla de gallinero y una mezcla de cemento y arena conocida comúnmente como “ferrocemento”. A éstas se las denomina ecocolumnas.

Las ecocolumnas se preparan sobre la base de botellas plásticas cortadas, colocadas una dentro de la otra. Para darles mayor estabilidad y resistencia las botellas se rellenan con basura inorgánica, limpia y seca, a fin de garantizar su solidez como elemento fundamental de los ecopaneles.

Para asegurar la eficiencia de las ecocolumnas se debe determinar con certeza técnica el valor de carga crítica que soportarán, así como la altura máxima a la cual resistirán dicha carga. El procedimiento para obtener estos valores consiste en idealizar las ecocolumnas como cilindros de pared delgada. Esto permite calcular el valor de la inercia del elemento lo cual posibilita la

obtención del radio de giro que se necesita para despejar de la ecuación 10-6 del ACI 318S-08 la altura crítica. Posteriormente, y en virtud de que se trabaja con polietileno de baja densidad, mediante el empleo de la ecuación de Euler para columnas esbeltas se determina la P crítica de estos elementos.

En vista de que las botellas son diferentes, pues varían en formas y tamaños, antes de proceder a la elaboración de las ecocolumnas se las debe clasificar conforme a tipos, según la marca, ya que no todos los envases son iguales. En consecuencia, las ecocolumnas presentarán la misma estructura, pero, aunque colectivamente se fabricarán con diferentes tipos de botellas, en lo individual, cada ecocolumna será elaborada con un mismo tipo de botella. La forma más apropiada para el corte del envase y su colocación uno dentro del otro será determinada por el tipo que se use, desde la base, hasta alcanzar la altura máxima deseada.

El sistema de construcción de viviendas que se propone en este trabajo de graduación surge como una posibilidad y como respuesta a la ingente necesidad de que los habitantes de escasos recursos económicos cuenten con una vivienda mínima que garantice seguridad estructural. Por tal razón, la presente tesis desarrolla la descripción de los diferentes ensayos que se experimentaron así como el análisis y la interpretación de los resultados que se obtuvieron en las diferentes actividades de campo que se ejecutaron.

Es de esta manera como mediante ensayos de compresión, corte, flexión e impacto, que determinan la viabilidad del proyecto, se obtuvieron conclusiones que fundamentan futuras propuestas para lograr mejoras estructurales y de construcción en el innovador sistema que podría convertirse en la solución para el déficit de vivienda que afecta a la población guatemalteca.

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1. Mampostería

Es la unión ordenada de bloques o unidades de mampostería con mortero, cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con las del elemento que se construirá para conformar sistemas monolíticos tipo muro, que puedan resistir acciones producidas por las cargas muertas, vivas, terremoto o viento.

Según el tipo de unión, la mampostería puede ser: a) Al tope, cuando no se utiliza ningún elemento para pegar las juntas entre las unidades, y b) Pegada, cuando existe una capa de mortero en las superficies o puntos de contacto entre las unidades, o sea, en las juntas.

La mampostería puede ser: a) Estructural, cuando los muros que la conforman deben soportar tanto su propio peso como el de las cargas horizontales y verticales actuantes, y b) No estructural, cuando los muros deben soportar tan solo su propio peso y servir como división entre dos espacios. La mampostería estructural también se puede utilizar como división entre espacios.

1.2. Principios e hipótesis de diseño de mampostería

La determinación de resistencias de secciones de cualquier forma, sujetas a flexión, carga axial o una combinación de ambas, se efectuará con el criterio de resistencia a flexocompresión, que se especifica para concreto reforzado, y con base en las hipótesis siguientes:

- La mampostería se comporta como un material homogéneo.
- La distribución de deformaciones unitarias longitudinales en la sección transversal de un elemento es plana.
- Los esfuerzos de tensión únicamente son resistidos por el acero de refuerzo.
- Entre el acero de refuerzo vertical y el concreto o mortero de relleno que lo rodea existe adherencia perfecta.
- La sección falla cuando en la mampostería se alcanza la deformación unitaria máxima a compresión que se tomará igual a 0.002.
- A menos que ensayos con prismas permitan obtener una mejor determinación de la curva esfuerzo–deformación de la mampostería, esta se supondrá lineal hasta la falla.

En muros con piezas huecas, en los que no todas las celdas estén rellenas con mortero o concreto, el valor de f_m de las piezas huecas se considerará sin relleno en la zona a compresión.

Muros sometidos a momentos flexionantes, perpendiculares a su plano, pueden ser confinados o reforzados interiormente. En este último caso, la resistencia a flexocompresión puede determinarse tomando en cuenta el refuerzo vertical del muro, cuando la separación de este no exceda de seis veces el espesor de la mampostería del muro, t .

1.3. Tipos de mampostería

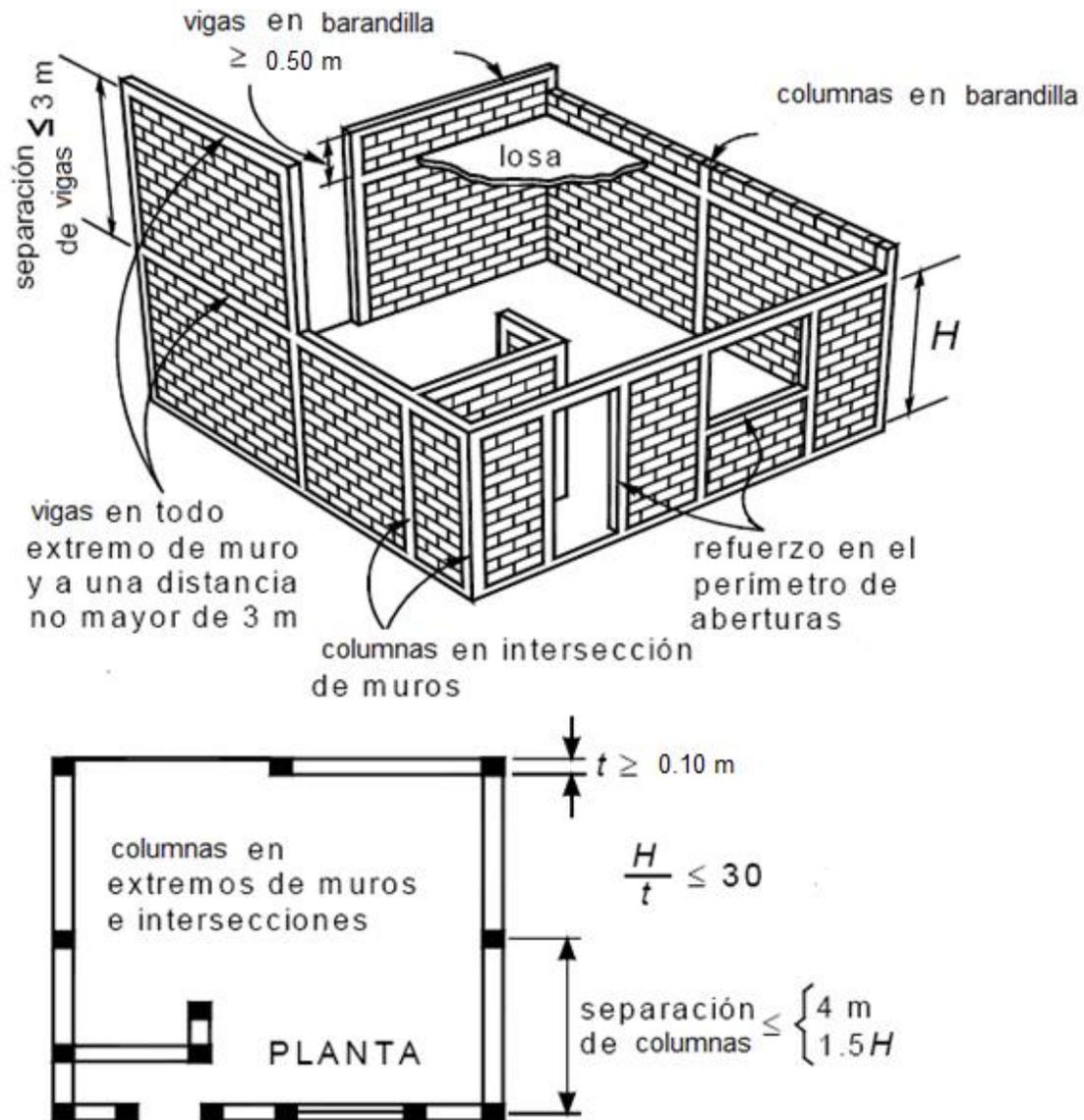
Con relación a la mampostería existen diferentes tipos que se enuncian a continuación.

1.3.1. Mampostería confinada

Se construye utilizando bloques unidos con mortero y confinados perimetralmente por elementos de concreto reforzado, vigas y columnas, que actúan monolíticamente.

Cuando se usa mampostería confinada en las aberturas que existen en los muros, puertas y ventanas, se colocan columnas, vigas o soleras a fin de proporcionar al muro una mayor ductilidad así como una mayor resistencia a flexocompresión.

Figura 1. Requisitos para mampostería confinada



Fuente: Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, p. 28.

1.3.1.1. Columnas de confinamiento

Las columnas de confinamiento son elementos estructurales de concreto reforzado. Deben colocarse, por lo menos en los extremos de cada muro y en las intersecciones con otros muros. También se colocarán en puntos intermedios del muro a una distancia no menor de 1,5 m, ni mayor de 3 m.

Las columnas tendrán como dimensión mínima el espesor t del muro de mampostería.

1.3.1.2. Vigas de confinamiento

Las vigas de confinamiento son elementos estructurales de concreto reforzado que irán colocadas en todo extremo horizontal del muro.

Las vigas tendrán como dimensión mínima el espesor t del muro de mampostería.

1.3.2. Mampostería reforzada

La mampostería reforzada consiste en colocar barras de acero corrugado, horizontal y verticalmente, dentro de las unidades de mampostería, unidas por medio de mortero. El acero de refuerzo, tanto el horizontal como el vertical, se distribuirá a lo alto y largo del muro.

En Guatemala, a este tipo de mampostería se le conoce comúnmente como muros pineados.

1.3.2.1. Cuantías de acero de refuerzo vertical y horizontal

La suma de las cuantías de acero horizontal ρ_h , y vertical ρ_v , no debe ser menor de 0,002 y ninguna de las dos cuantías debe ser mayor que 0,0007, es decir:

$$\begin{aligned}\rho_h + \rho_v &\geq 0,002 \\ \rho_h &\geq 0,0007; \quad \rho_v \geq 0,0007\end{aligned}$$

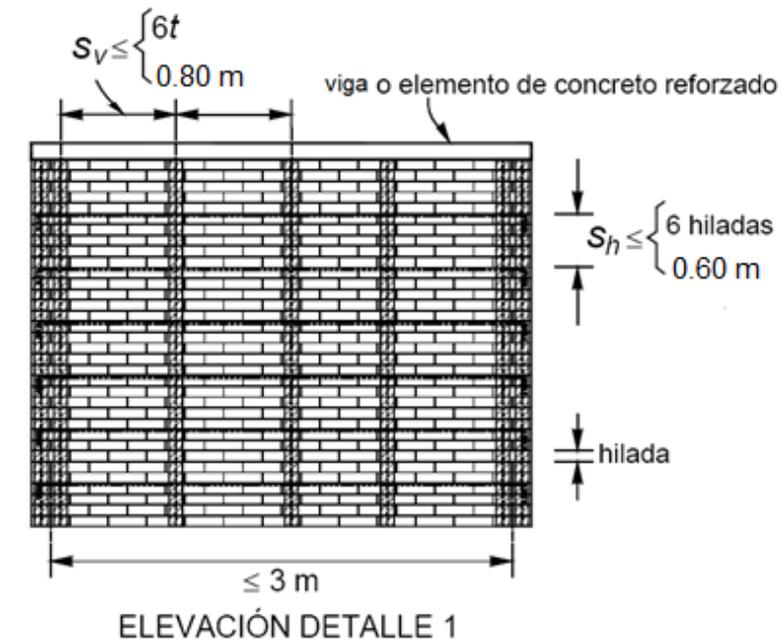
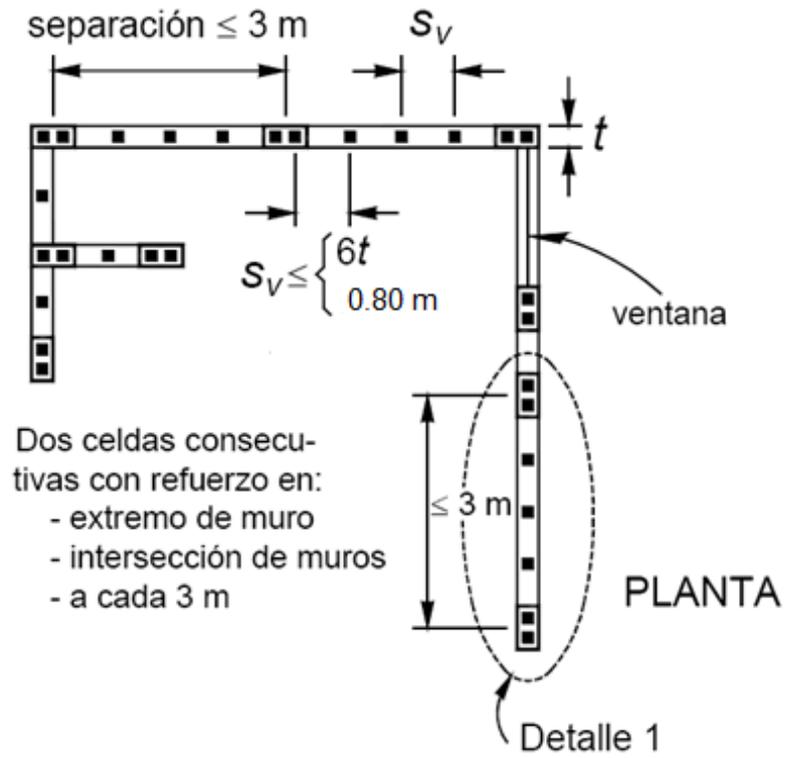
Donde:

$$\rho_h = \frac{A_{sh}}{S_h * t}; \quad \rho_v = \frac{A_{sv}}{S_v * t}$$

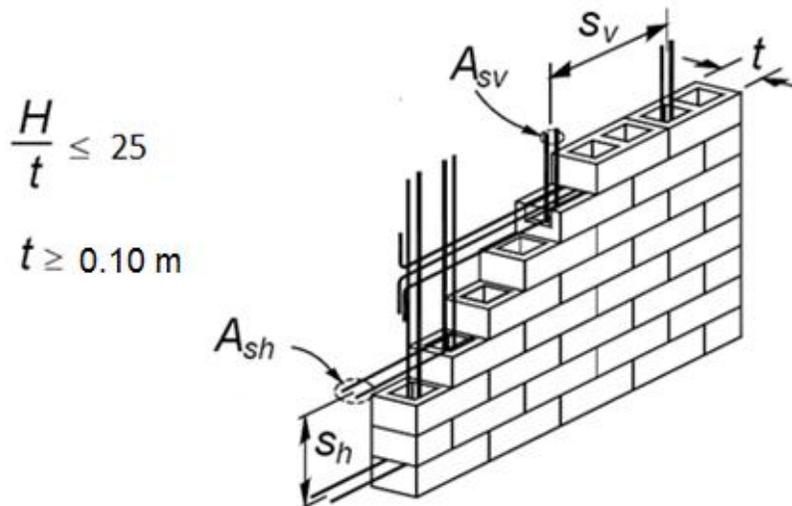
A_{sh} es el área de acero de refuerzo horizontal que se coloca a una separación horizontal (S_h), según la figura 2.

A_{sv} es el área de acero de refuerzo vertical que se coloca a una separación vertical (S_v), según la figura 2.

Figura 2. Requisitos para mampostería reforzada



Continuación de la figura 2.



Fuente: Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, p. 34.

1.3.3. Mampostería simple

Este tipo de mampostería consiste, principalmente, en adherir unidades de mampostería por medio de mortero, pero sin que pueda ser considerada como mampostería confinada ni como mampostería reforzada porque, aún contando con algún tipo de refuerzo interior, y confinamiento interior o exterior, no cuenta con el refuerzo necesario para ser considerada como alguno de los tipos de mampostería mencionada anteriormente.

Al construir con este tipo de mampostería es necesario contar con un buen procedimiento de construcción, y con mano de obra calificada. En Guatemala, el ejemplo más claro de construcciones con mampostería simple, son las casas hechas con adobe.

1.3.4. Mampostería esbelta

También se le conoce como elementos tipo pared o tipo panel. Estos elementos son parecidos a las unidades de mampostería, pues se trabajan de igual manera. Se colocan uno encima del otro, de manera ordenada, utilizando mortero para unir las piezas. La diferencia consiste en que la relación de esbeltez (altura-espesor), de estos elementos, es mucho mayor que la relación de esbeltez de las unidades de mampostería.

El problema principal estriba en que, por ser esbeltos, los elementos, tienden a ser más vulnerables ante el efecto de las cargas gravitacionales y de sismo, por ello es necesario que posean una mayor rigidez y mayor capacidad de carga que les permita disipar la energía, y contar con seguridad estructural.

Los ecopaneles prefabricados poseen una relación de esbeltez (12) mayor a la que presentan las unidades de mampostería, esta es la razón por la que se les considera mampostería esbelta.

1.3.5. Construcción con botellas plásticas como elementos de mampostería

Las botellas plásticas en general, como las de gaseosas, agua y otro tipo de bebidas con envases similares, son un elemento común de contaminación del ambiente, en el paisaje rural y urbano. Sin embargo, no necesariamente las encontramos integradas en los asentamientos, sino más bien, como elementos contaminantes en las orillas de caminos, playas, bordes de quebradas y ríos.

En los últimos años, no solo en Guatemala sino que en varios países, se ha promovido la idea de construir viviendas, principalmente para las personas de escasos recursos económicos. Lo innovador y novedoso del proyecto consiste en que se basa en la utilización de botellas plásticas como una especie de ladrillo duradero y económico. Las botellas plásticas son, en la vida de la sociedad actual, un material de desecho, pero pueden ser usadas para la construcción de muros y divisiones, ya sea como relleno o como aligerante.

Al dejar de considerar a la basura plástica como elemento inservible, se genera un mayor cuidado del ambiente y se promueve el desarrollo social de las clases menos favorecidas que, sin costos abultados, pueden contar con una vivienda mínima, confortable, con seguridad estructural y a un bajo costo.

Debido a que la modalidad de construcción que propongo constituye un sistema nuevo y revolucionario, la forma de utilizar las botellas para la construcción depende de la perspectiva de las personas. Sin embargo, no se debe olvidar que la idea no consiste sólo en usar las botellas vacías, sino también en darle el uso adecuado a la basura inorgánica no biodegradable, pues las botellas plásticas se rellenan con basura no biodegradable, limpia y seca.

1.4. Cargas

Toda estructura debe diseñarse para que no falle ni se deforme excesivamente ante la acción de las cargas que generan su propio peso o el peso muerto de otros materiales, y cargas tales como: carga viva, carga de impacto, presión del viento, fuerza sísmica y el empuje de los suelos.

Es importante que al momento de preparar el diseño se tenga cuidado en prever las cargas que tendrá que soportar la estructura. Estas cargas, verticales y horizontales, pueden ser de corta duración, como es el caso de un terremoto, o de larga duración, como la carga muerta. De igual manera se debe considerar que tanto la función de las estructuras como las cargas aplicadas, pueden cambiar en el futuro.

Generalmente, las cargas de diseño especificadas en los códigos son adecuadas para la mayoría de construcciones, pero también es importante que el diseñador decida si estas cargas son aplicables al tipo de estructura que se está trabajando.

1.4.1. Dirección de las cargas

Es la dirección que toma la carga estructural de una edificación, tanto en sentido horizontal como vertical, que se distribuye desde su punto de aplicación hasta los cimientos, para luego ser transmitida al suelo.

Las estructuras, por ser diferentes, poseen condiciones únicas de dirección de carga, ya que ésta depende del tipo de sistema de construcción que se aplique y de los materiales que se usen. A través de los muros, las estructuras de mampostería transfieren las cargas verticales y horizontales hacia el cimiento. Debe tenerse presente que en construcciones con techos inclinados, la direccionalidad de las cargas puede producir volteo fuera del plano de carga.

1.4.2. Carga muerta

Es una carga estacionaria cuya magnitud se puede considerar constante a lo largo del tiempo. Cubre todas las cargas de los elementos permanentes de la construcción, incluyendo estructura, muros, pisos, cubiertas, escaleras, equipos fijos y todas las cargas que no son causadas por la ocupación y el uso de la edificación. También cubre el peso del equipo de servicio que se encuentra empotrado, y el de los equipos eléctricos, de ventilación y de aire acondicionado.

Usualmente, el valor de la carga muerta se determina utilizando el peso específico, tanto de los materiales estructurales como de los no estructurales, debido a que los pesos reales no están determinados explícitamente. Para este fin, se consideran elementos no estructurales los que pueden estar anclados o sujetos a la estructura (baldosas, cielo falso, tabiques, etc.), y que no cumplen con la función de resistir la acción que provocan las cargas, pero que sí ejercen esfuerzos sobre la estructura.

1.4.3. Carga viva

Son cargas de corta duración que produce el uso y la ocupación de la obra que se construye. Varían según su ubicación, especialmente si cambia la función del edificio. Estas cargas incluyen el peso de la gente, los muebles, las plantas y el equipo no estacionario. En los techos debe considerarse la carga de agua por lluvia, y otros equipos.

Las cargas vivas que especifican los códigos para los diferentes tipos de edificios, representan una estimación conservadora de la carga máxima a la que se puede someter un edificio, según el funcionamiento previsto para él.

1.4.4. Cargas de impacto

Normalmente, los valores de carga viva especificados por los códigos de construcción se consideran como cargas estáticas, ya que la mayoría de ellas, a pesar de que pueden ser trasladadas de un lado a otro, se mantienen fijas en un lugar como ocurre con escritorios, libreros, archivos, etcétera.

Si las cargas se aplican rápidamente, generan fuerzas de impacto adicionales. Por ejemplo, si un cuerpo en movimiento, como un elevador, se detiene repentinamente, ejerce una carga sobre la estructura, ésta se deforma y absorbe la energía cinética del objeto en movimiento.

Como una posibilidad para el análisis dinámico, las cargas móviles se pueden considerar como cargas estáticas mayoradas empíricamente por un factor de impacto I , según se puede observar en la tabla I.

Tabla I. Factor de impacto de la carga viva

Tipo de carga	Factor de Impacto I , en porcentaje
Elevadores (soportes y maquinaria)	100
Soportes de maquinaria ligera, por motor o por ejes	20
Soportes de maquinaria alternante o unidades de potencia	50
Soportes colgantes para pisos y balcones	33
Trabes de soporte y conexiones para grúas viajeras operadas a distancia	25

Fuente: LEET, Kenneth M., Fundamentos de análisis estructural, p. 41.

1.4.5. Cargas de viento

Los vientos fuertes inducen fuerzas intensas sobre las estructuras. Estas fuerzas son capaces de arrancar ramas de los árboles, llevarse los techos de las casas y romper las ventanas.

La presión o succión exacta que el viento ejerce sobre las estructuras no se puede determinar con facilidad, pues la velocidad y dirección del viento no es constante. Sin embargo, de acuerdo con la mecánica de fluidos, el viento es como un fluido en movimiento, y esto hace posible entender muchos aspectos sobre su comportamiento y obtener cargas razonables de diseño.

La magnitud de las presiones que el viento ejerce sobre una estructura depende de la velocidad del viento, la forma y la rigidez de la estructura, la rugosidad y el perfil del terreno que la rodea y la influencia que puedan ejercer las estructuras adyacentes.

Es por eso que todas las estructuras en conjunto, o parte de ellas, deben diseñarse y construirse de manera que sean capaces de soportar los efectos que les causan los vientos específicos de cada lugar. A la vez, estos vientos requieren de una investigación apropiada. Por ejemplo, en Guatemala se presenta la acción de las corrientes *Jet*.

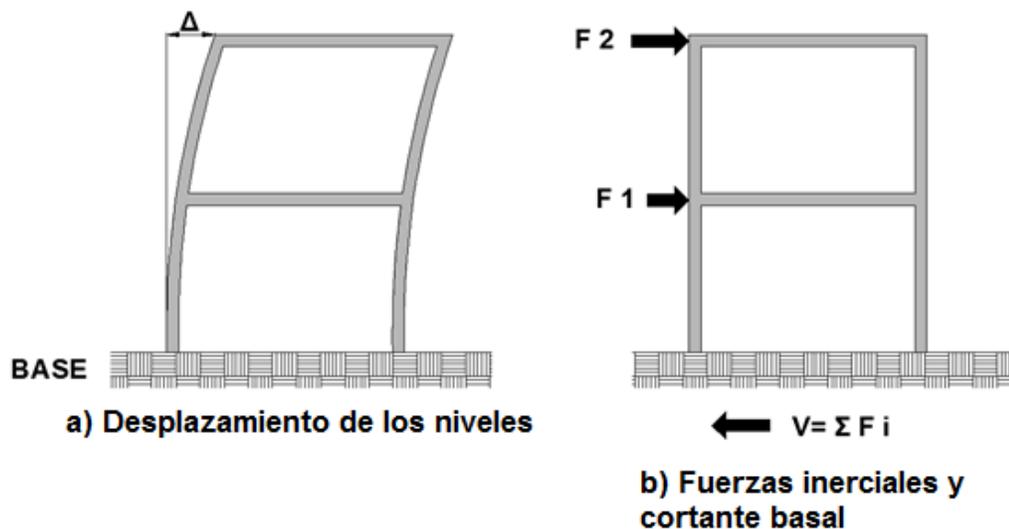
1.4.6. Cargas de sismo

Los sismos ocurren en muchas regiones del mundo. Los movimientos provocados en el terreno por las fuerzas que genera un sismo causan oscilaciones en los edificios. Como se supone que el edificio se encuentra fijo en su base, el desplazamiento o deriva (Δ) que provoca el sismo comienza en

cero en la base y aumentará gradualmente en cada piso hasta llegar a su máximo desplazamiento ubicado en la parte más alta del edificio. Al ocurrir este desplazamiento lateral en cada piso, se le oponen las fuerzas de arriostamiento. A este tipo de fuerzas se les conoce como fuerzas inerciales.

La suma de todas las fuerzas inerciales que actúan en cada nivel del edificio, y que se transmiten hacia la cimentación, se denomina cortante basal y se representa por V .

Figura 3. **Desplazamiento de los niveles al moverse lateralmente el edificio, fuerzas inerciales y cortante basal**



Fuente: elaboración propia.

1.5. Comportamiento estructural de la mampostería

Al referirse al comportamiento estructural de la mampostería es necesario tener presente que esta debe cumplir con las siguientes condiciones, para poder considerarla segura estructuralmente.

1.5.1. Resistencia a compresión (f_m)

La resistencia a la compresión es la principal cualidad que deben tener las unidades de mampostería. Esta resistencia varía según el tipo de mampostería que se utilice en la construcción. Se define como la carga máxima a compresión que resiste una unidad, dividida por el área de la sección transversal que la soporta, pudiendo ser ésta el área bruta o el área neta. En general, es la capacidad de una unidad de resistir cargas de compresión individualmente, y es diferente de la resistencia del muro. Está directamente asociada con las demás propiedades de las unidades.

La resistencia a compresión está especificada para alcanzarse a los 28 días de producidas las unidades. Sin embargo, las unidades se pueden utilizar a edades menores cuando se tenga un registro sobre la evolución de la resistencia de unidades de iguales características, y éste indique que ellas alcanzarán dicha resistencia, lo cual no es razón para no hacer la verificación directa de la calidad de las unidades.

Para el diseño se empleará un valor de resistencia (f'_m), medido sobre el área bruta de las unidades de mampostería. La resistencia de diseño se determinará con base en la información estadística existente sobre el producto o a partir de muestreos de la pieza, ya sea en planta o en obra.

Si se opta por el muestreo, se obtendrán, al menos, tres muestras. La resistencia de diseño se calculará como:

$$f'_m \cong \frac{f_m}{1 + 2,5C_p}$$

Donde:

f_m = resistencia a compresión de las piezas, referidas al área bruta

C_p = coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas

El valor de C_p no se tomará menor que:

- 0,20 para piezas provenientes de plantas mecanizadas que evidencien un sistema de control de calidad.
- 0,30 para piezas de fabricación mecanizada, pero que no cuenten con un sistema de control de calidad.
- 0,35 para piezas de producción artesanal.

1.5.2. Resistencia al corte

La resistencia de diseño a corte o compresión diagonal de la mampostería ($V'm$), sobre el área bruta de la diagonal se determinará con el siguiente procedimiento:

- El valor de la resistencia se calculará a los 28 días de su fabricación.
- Los prismas se ensayarán sometidos a una carga de compresión uniforme a lo largo de su diagonal. El esfuerzo de corte medio se determinará dividiendo la carga máxima entre el área bruta del prisma, medida sobre la misma diagonal.

1.5.3. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad representa el grado de rigidez que posee un material. Resulta de dividir su esfuerzo unitario dentro de su deformación unitaria correspondiente.

1.5.3.1. Módulo de Young (E) o módulo de elasticidad longitudinal

La mayoría de los materiales, en su curva esfuerzo–deformación, exhiben una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria, dentro de la zona elástica, esto significa que un aumento en el esfuerzo causa un aumento proporcional en la deformación unitaria.

$$E = \sigma / \epsilon$$

En donde E representa la constante de proporcionalidad denominada módulo de elasticidad o módulo de Young. Con la ecuación anterior se representa el tramo inicial recto del diagrama esfuerzo–deformación hasta el límite proporcional. Además, el módulo de elasticidad representa la pendiente de esta línea.

1.6. Columnas esbeltas

Al hablar de columnas esbeltas es importante tomar en cuenta que no solo se debe resolver el problema de resistencia, sino también el de estabilidad. Cualidad que se define como la capacidad que posee un elemento de responder con pequeñas deformaciones, provocadas por pequeñas variaciones de carga. La falta de estabilidad en columnas lleva al problema del pandeo.

1.6.1. Fórmula de Euler para columnas esbeltas

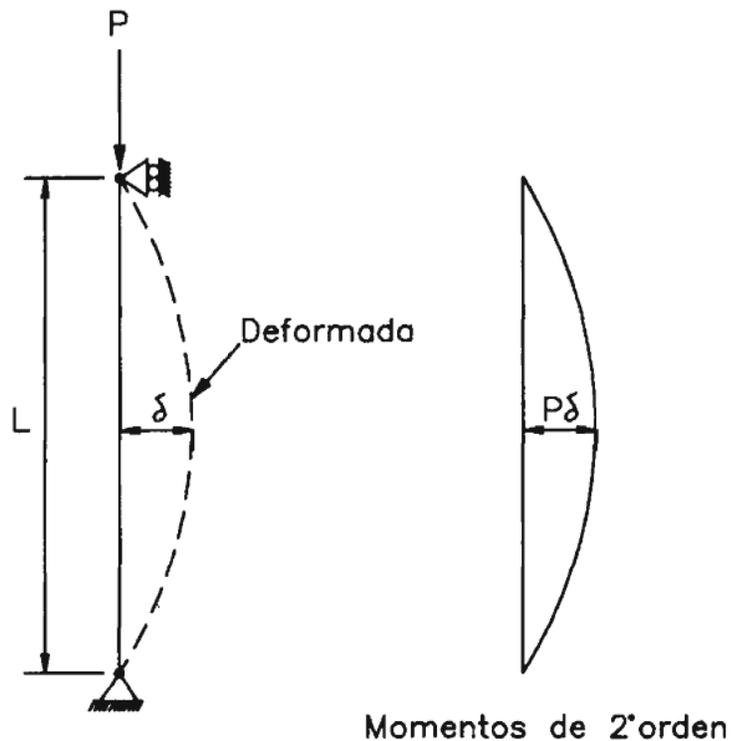
La fórmula de Euler para columnas esbeltas se utiliza para determinar cuál será el valor de la carga crítica de pandeo de una columna, pero este concepto también puede ser aplicado a columnas de diferentes materiales siempre y cuando se conozca el módulo de elasticidad del material con el que está fabricada. En el caso que se expone en este trabajo de graduación es posible aplicar la ecuación de Euler para poder determinar el valor de la carga crítica de las ecocolumnas.

En la figura 4 se muestra una columna, articulada en sus extremos con desplazamiento lateral restringido en ellos, sometida únicamente a una fuerza de compresión P . Es de material elástico y está perfectamente alineada. Si se le aplica una pequeña fuerza horizontal en el centro de la luz, de manera que produzca flexión en la columna, la deflexión será similar a la que se indica con la línea punteada.

A lo largo del elemento aparecerán momentos denominados de segundo orden, producto de la excentricidad de la carga axial generada por la deformación aplicada a la columna.

Los momentos de segundo orden aumentan la deflexión y los esfuerzos de la columna. Si la carga P es pequeña, las deflexiones serán cada vez menores y finalmente se alcanzará el equilibrio. Sin embargo, si la carga P es cercana a la denominada carga crítica, el elemento fallará por pandeo. Las deflexiones de la pieza se aumentarán cada vez más hasta el colapso final de la pieza.

Figura 4. **Momentos de segundo orden en una columna doblemente articulada sometida a compresión**



Fuente: HARMSEN E., Teodoro. Diseño de estructuras de concreto armado. p. 264.

En 1757 el matemático suizo Leonhard Euler, con base en la ecuación diferencial de la elástica, dedujo la expresión que permite calcular la Carga Crítica de pandeo (P_c), o carga de Euler, Ahora se sabe que este análisis solamente es válido hasta que los esfuerzos alcanzan el límite de proporcionalidad.

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

Donde:

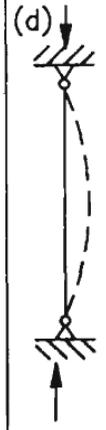
E es igual al módulo de elasticidad del material,
 I representa el momento de inercia de la sección en la dirección analizada, y
 l equivale a la longitud de la columna entre apoyos

La expresión anterior es válida para el caso en que una columna se encuentra doblemente articulada y con desplazamiento lateral de apoyos restringido. Sin embargo es posible adaptar esta expresión a diferentes condiciones de apoyo. Esto se logra multiplicando la longitud de la columna por un factor k , que depende directamente de las condiciones de apoyo. Por lo tanto, el término kl se denomina longitud efectiva o longitud de pandeo.

En la figura 5 se muestra el valor de k para diferentes condiciones de apoyo. La fórmula de Euler queda de la siguiente manera:

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2}$$

Figura 5. Valor de k para diferentes condiciones de apoyo

La deformada se muestra en línea punteada	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
						
Valor de K	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0

Fuente: HARMSEN E., Teodoro. Diseño de estructuras de concreto armado. p. 265.

1.7. Radio de giro

El radio de giro se define como la forma en la cual el área transversal se distribuye alrededor de su eje centroidal. El concepto de radio de giro es muy utilizado en la ingeniería, en particular, cuando se refiere a columnas.

El radio de giro de un área respecto a un eje en particular, es igual a la raíz cuadrada del cociente del momento de inercia dividido por el área:

$$r_{giro} = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Se interpreta como la distancia uniforme a la que debe situarse el área total respecto de un eje, para que tenga el mismo momento de inercia.

2. MAMPOSTERÍA DE BOTELLAS

2.1. Polímeros

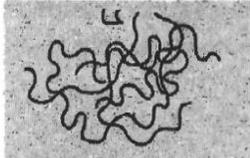
Los polímeros están formados por la unión de cientos de miles de pequeñas moléculas llamadas monómeros que, unidos por enlaces químicos, forman macromoléculas llamadas polímeros. Estos abarcan materiales tan diversos como el hule o el caucho, los adhesivos y los plásticos.

Los polímeros se utilizan en un gran número de aplicaciones, incluyendo juguetes, aparatos domésticos, elementos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, llantas de automóviles, espumas y empaques.

2.1.1. Clasificación de los polímeros

Existen diferentes formas para clasificar un polímero: primero, según la manera en que las moléculas se sintetizan; segundo, en función de su estructura molecular, y tercero, por su familia química. Sin embargo, el método más utilizado para describir a los polímeros es en función de su comportamiento mecánico y térmico. La tabla II compara las tres clases principales de polímeros.

Tabla II. **Comparación de las tres clases de polímeros**

Comportamiento	Estructura general	Diagrama
Termoplástico	Cadenas lineales flexibles	
Termoestable	Red rígida tridimensional	 Con enlaces cruzados
Elastómero	Cadenas lineales con enlaces cruzados	 Con enlaces cruzados

Fuente: ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. p. 450.

2.1.1.1. **Polímero termoplástico**

Estos polímeros se comportan de una manera plástica y dúctil. A temperatura ambiente son deformables. Se derriten cuando se calienta y se endurecen, en un estado parecido al vidrio, cuando se enfrían lo suficiente. Los polímeros termoplásticos se pueden reciclar con facilidad.

Los más usados son: el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el polimetilmetacrilato (PMMA), el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno tereftalato (PET), el teflón o politetrafluoretileno (PTFE), y el nylon (un tipo de poliamida).

2.1.1.2. Polímero termoestable

Se componen de largas cadenas de moléculas con fuertes enlaces cruzados. Forman estructuras de redes tridimensionales espaciales. Generalmente son más resistentes, aunque más frágiles que los termoplásticos.

Los plásticos termoestables poseen algunas ventajas respecto de los termoplásticos. Por ejemplo, poseen mejor resistencia al impacto, a los solventes y a las temperaturas extremas. Entre las desventajas se encuentran, generalmente, la dificultad de procesamiento, la necesidad del curado, el carácter quebradizo del material y el no presentar reforzamiento cuando se le somete a tensión.

2.1.1.3. Elastómeros

Son los que muestran un comportamiento elástico, incluido el caucho. Tienen la capacidad de deformarse elásticamente, en grandes cantidades, sin cambiar permanentemente de forma. Se usan principalmente para cierres herméticos, adhesivos y partes flexibles.

2.1.2. Polietileno (PE)

Se denomina polietileno a cada uno de los polímeros del etileno. Es un material termoplástico. Químicamente es el polímero más simple e inerte. Por su alta producción mundial es el plástico más popular, y también el más barato. Con este polímero se fabrican las bolsas de almacén, los frascos de champú, los juguetes de los niños e, incluso, chalecos a prueba de balas.

2.1.2.1. Polietileno de alta densidad

Se designa como HDPE (por sus siglas en inglés, *High Density Polyethylene*) o PEAD, polietileno de alta densidad. Presenta mejores propiedades mecánicas (rigidez, dureza y resistencia a la tensión) que el polietileno de baja densidad y el polietileno lineal de baja densidad, debido a su mayor densidad. Es de fácil procesamiento y de buena resistencia al impacto y a la abrasión. Sin embargo, no resiste agentes oxidantes fuertes como el ácido nítrico, el ácido sulfúrico y los peróxidos de hidrógeno o halógenos.

Sus principales aplicaciones ocurren en el sector de envasado y empaque (bolsas para mercancía o para basura, botellas para leche y yoghurt, cajas para transporte de botellas, etc.), en la industria eléctrica (aislantes para cable), en el sector automotriz (recipientes para aceite y gasolina, tubos y mangueras), y en artículos de cordelería, en bandejas, y en botes para basura, cubetas, platos, redes para pesca, regaderas, tapicerías, juguetes, etc.

2.1.2.2. Polietileno de baja densidad (PEDB)

Se designa como LDPE (por sus siglas en inglés, *Low Density Polyethylene*) o PEBD, polietileno de baja densidad. Es un plástico semicristalino, flexible, blanquecino, inodoro e insípido, de tacto parafínico, con excelentes propiedades eléctricas y poca resistencia a elevadas temperaturas. Es propenso a agrietarse bajo carga ambiental, pues su resistencia a la radiación UV es muy escasa, o deficiente, por lo que solo puede desempeñar función de protección frente al agua. Su punto promedio de fusión es de 110°C. Tiene conductividad térmica baja. Sus principales aplicaciones ocurren dentro del sector del envasado y el empaque (bolsas, botellas, películas, sacos, tapas para botellas, etc.) y como aislante en aplicaciones de baja y alta tensión.

2.1.2.3. Polietileno de tereftalato (PET o PETE)

El PET es un poliéster termoplástico. Un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo. Su fórmula corresponde a la de un poliéster aromático. Su denominación técnica es polietilén tereftalato o politereftalato de etileno.

El polietilén tereftalato se caracteriza por poseer elevada pureza y alta resistencia y tenacidad. De acuerdo con su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química. Existen diferentes grados de PET que se diferencian por su peso molecular y su cristalinidad. Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y, los de mayor peso molecular, grado ingeniería.

Entre las aplicaciones más importantes del PET se encuentran los siguientes sectores:

- Envasado y empaque: Las firmas de maquinaria han contribuido en gran medida a impulsar la evolución rápida de los envases. En la actualidad hay disponibilidad de envases para llenado a temperaturas normales y para llenado en caliente. También se fabrican envases de muy diversos tamaños: desde 10 mililitros (pequeños), hasta garrafrones de 19 litros (grandes). Los tarros de boca ancha se emplean en el envasado de conservas alimenticias. El principal mercado del PET comprende las siguientes áreas:
 - Bebidas carbonatadas
 - Agua purificada
 - Aceite
 - Conservas

- Cosméticos
- Detergentes y productos químicos
- Productos farmacéuticos

- Electro-electrónico: Este segmento comprende aplicaciones en diversos tipos de películas: desde las ultradelgadas para capacitores, de un micrómetro o menos, hasta las de 0,5 milímetros, utilizadas para aislamiento de motores. Los capacitores tienen material dieléctrico, una película PET, empleada para telecomunicaciones, y aparatos electrónicos, entre otros.

- Fibras (telas tejidas, cordeles, etc.): en la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir. Debido a su resistencia, el PET se emplea en telas tejidas y en cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y refuerzo de llantas. Por su baja elongación y su alta tenacidad se aprovechan en refuerzos para mangueras. Su resistencia química permite que se las aplique en cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales.

En la tabla III se pueden apreciar las propiedades de diferentes polímeros, incluidos los mencionados anteriormente. Estas propiedades son importantes para determinar la posibilidad de que se trabaje con botellas plásticas como unidades de mampostería.

Tabla III. **Propiedades de termoplásticos seleccionados**

	Resistencia a la tensión (psi)	Elonga- ción %	Módulo elástico (psi)	Densidad (g/cm ³)	Impacto Izod (pies libra/plg)
Polietileno (PE):					
Baja densidad	3,000	800	40,000	0.92	9.0
Alta densidad	5,500	130	180,000	0.96	4.0
Ultra alto peso molecular	7,000	350	100,000	0.934	30.0
Cloruro de polivinilo (PVC)	9,000	100	600,000	1.40	
Polipropileno (PP)	6,000	700	220,000	0.90	1.0
Poliestireno (PS)	8,000	60	450,000	1.06	0.4
Poliacrilonitrilo (PAN)	9,000	4	580,000	1.15	4.8
Polimetilmetacrilato (PMMA)					
(acrílico, plexiglás)	12,000	5	450,000	1.22	0.5
Policlorotrifluoroetileno	6,000	250	300,000	2.15	2.6
Politetrafluoroetileno					
(PTFE, teflón)	7,000	400	80,000	2.17	3.0
Polioximetileno (POM)					
(acetal)	12,000	75	520,000	1.42	2.3
Poliamida (PA) (nylon)	12,000	300	500,000	1.14	2.1
Poliéster (PET)	10,500	300	600,000	1.36	0.6
Policarbonato (PC)	11,000	130	400,000	1.20	16.0
Poliimida (PI)	17,000	10	300,000	1.39	1.5
Polietereterketona (PEEK)	10,200	150	550,000	1.31	1.6
Sulfuro de polifenileno (PPS)	9,500	2	480,000	1.30	0.5
Sulfona de poliéter (PES)	12,200	80	350,000	1.37	0.6
Poliamidaimida (PAI)	27,000	15	730,000	1.39	4.0

Fuente: ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. p. 480.

2.2. Ferrocemento

El ferrocemento es un tipo particular de concreto reforzado, con espesores delgados. Está formado por mortero o “matriz” reforzado con fibras dispersas o capas de malla continua, de diámetro relativamente pequeño. La malla puede ser metálica, o de otros materiales apropiados. Generalmente, estos materiales son de consistencia frágil.

Este material, que se considera como una forma especial del concreto reforzado, muestra un comportamiento muy diferente al del concreto reforzado común en cuanto a su funcionamiento efectivo, resistencia y aplicaciones potenciales. Por lo que debe ser clasificado como un material separado.

En estructuras de ferrocemento bien diseñadas, el refuerzo consiste en una malla de alambre de diámetro pequeño, colocada de manera proporcional y uniforme al extender la malla de alambre a través del espesor del elemento. La colocación de las fibras o de la malla, en la matriz frágil, ofrece convenientes y practicas posibilidades de mejorar muchas de las propiedades físicas del material, tales como: fractura, resistencia a la tensión y a la flexión, flexibilidad, resistencia a los esfuerzos de trabajo y al impacto. También presenta ventajas en términos de fabricación en productos y elementos.

El ferrocemento se usa en estructuras de espesor delgado en las que la resistencia y la rigidez varían, según la forma del elemento. Tiene la gran ventaja de ser moldeable y de poder construirse de una sola pieza. Otra de sus ventajas principales es su bajo costo, sus características de incombustibilidad y su alta resistencia a la corrosión.

2.2.1. Recubrimiento

Las estructuras de ferrocemento que estén expuestas a condiciones ambientales severas o a exigencias especiales deben ser sometidas a recubrimientos que cumplan con las siguientes características:

- Buena adherencia del mortero
- Tolerancia a la alcalinidad
- Resistencia a la abrasión

- Impermeabilidad al agua y a las sustancias químicas

Las estructuras que no estén sometidas a esfuerzos considerables utilizarán un recubrimiento con espesor no menor de 0,0015 m y no mayor de 0,0125 m. Las estructuras que se encuentren sometidas a condiciones ambientales severas, deben poseer un recubrimiento que en ningún caso debe ser menor de 0,0125 m.

2.2.2. Materiales que lo constituyen

A continuación se describen cada uno de los materiales que forman parte del ferrocemento.

2.2.2.1. Malla de refuerzo

Uno de los componentes esenciales del ferrocemento es la malla de alambre. Está formada por alambres delgados y poco espaciados entre sí, entretejidos o soldados, pero lo más importante es que debe ser de fácil manejo y suficientemente flexible para que permita dobleces en las esquinas agudas. A manera de marco que dé forma y que sostenga el mortero en estado fresco. Cuando el mortero endurece, su función consiste en absorber los esfuerzos de tensión que actúan sobre la estructura.

El comportamiento mecánico del ferrocemento depende, en gran parte, del tipo, la cantidad, la orientación y las propiedades de la resistencia de la malla de refuerzo que se utilice. En la tabla IV se muestran los principales tipos de malla que existen y las características generales que les son propias.

Tabla IV. **Características generales de los distintos tipos de mallas**

Tipo de malla	Peso de una capa por área de unidad		Espesor de la malla		Contenido de acero		Superficie de acero estimada por volumen de unidad	
	kg/m ²	lb/pie ²	mm	pulgada	kg/m ³	lb pie ³	mm ² /mm ³	pulgada ² /pulgada ³
Malla de alambre hexagonal calibre 1/2" x 22	0.58	0.12	1.4	0.06	410	26	0.275	6.99
Malla cuadrada soldada, calibre 1/2" x 1/2" x 19	1.08	0.22	2.0	0.08	540	34	0.248	6.30
Metal expandido								
Expamet TCG263	1.22	0.25	2.5	0.10	490	31	0.245	6.22
Malla Watson	3.53	0.72	5.5	0.22	605	38	0.236	5.99

Fuente: PAUL, B. K. Ferrocemento. p. 34.

El volumen de la malla, debe oscilar entre el 1% y el 8% del volumen total del elemento estructural.

2.2.2.1.1. Malla de alambre hexagonal

Es la malla más popular y la más utilizada, la más económica y de fácil manejo, disponible en casi todos los países. Se la conoce comúnmente como malla de gallinero. Por lo general se la utiliza en el ferrocemento. Tiene un diámetro de 0,05 a 0,01 cm y posee aberturas que varían de 1 a 2,5 cm.

2.2.2.1.2. Malla de alambre soldado

Para esta malla generalmente se utiliza alambre de calibre dieciocho o diecinueve. Este alambre se fabrica de acero. Posee resistencia baja o media a la tensión y es mucho más rígido que el que se utiliza en las mallas hexagonales. Este tipo de malla es preferido por algunos constructores ya que

puede moldearse con facilidad. Sin embargo, existe la posibilidad de presente puntos débiles en las intersecciones debido a una soldadura inadecuada durante su fabricación. Comprobaciones hechas han demostrado que, en varios casos, las mallas que han sido fabricadas con alambres de mejor calidad tienden a fallar frente a la acción provocada por las cargas que sufre una estructura.

2.2.2.1.3. Malla entrelazada o entretejida

En este tipo de malla los alambres se encuentran simplemente entrelazados al tamaño de la cuadrícula deseada, y no están soldados en las intersecciones. Al colocarlos de esta forma, los alambres no siempre están perfectamente derechos y existe cierto grado de ondulación. Sin embargo, las pruebas indican que esta malla se comporta igual o mejor que las mallas soldadas y las hexagonales. Uno de los problemas que se afrontan con este tipo de malla es que resulta difícil mantenerla en una determinada posición, pero al estirla fácilmente se somete a las curvas deseadas.

2.2.2.2. Acero del armazón

Generalmente, el acero se emplea para preparar el armazón de la estructura que se construirá, y sobre el cual se colocan las capas de malla. En dicho armazón, las varillas longitudinales y transversales de acero se distribuyen de una manera uniforme, y según la forma deseada. La separación entre una y otra puede ser de hasta 30 cm, cuando no son consideradas como refuerzo estructural, sino como medios de separación para los refuerzos de la malla. En estructuras altamente esforzadas, como los barcos, barcazas y secciones tubulares, las varillas de acero del armazón se colocan a una distancia de 7,5 cm, de centro a centro.

Cuando en la construcción se emplea ferrocemento se utilizan varillas de acero de diferentes clases, tanto para la dirección transversal como para la longitudinal. Generalmente se usan varillas de acero dulce porque poseen gran ductilidad y comprobada resistencia a la corrosión.

2.2.2.3. Cemento

El cemento puede describirse como un material con propiedades de adherencia y cohesión que le permiten unir fragmentos minerales en una masa compacta. Cuando entra en contacto con el agua reacciona y forma una pasta, que con el tiempo, produce una masa firme y dura.

2.2.2.4. Mortero

En el ferrocemento, el material adhesivo o matriz es el mortero. Este, en su estado fresco, une las partículas del agregado y produce un material denso y quebradizo. Las propiedades del mortero se rigen por el tipo y calidad de los materiales que lo constituyen, la proporción en que están combinados, las condiciones de preparación y los factores ambientales.

Las características que deben poseer los elementos que entren en la composición del ferrocemento son: a) Resistencia a la compresión, b) Impermeabilidad, dureza y resistencia al ataque químico, y c) Tal vez el factor más importante de todos: que su consistencia se mantenga uniforme, compacta y sin vacíos.

La resistencia del mortero es inversamente proporcional a la relación agua-cemento, mientras que su trabajabilidad (capacidad que posee un

determinado material para poder ser trabajado), es directamente proporcional a la cantidad de agua utilizada. Por lo general, diversas propiedades del mortero están relacionadas con su resistencia a la compresión. Por lo tanto, es obvio que el uso excesivo de agua en la mezcla para facilitar la trabajabilidad del mortero, afecta adversamente a la mayor parte de otras propiedades esenciales.

Para lograr firmemente la resistencia requerida de diseño, el mezclado del mortero debe hacerse en proporciones adecuadas. La proporción de cemento–arena generalmente varía de una parte de cemento por una y media a dos partes de arena. La relación agua-cemento debe mantenerse lo más baja posible para darle calidad y trabajabilidad consistente al material.

2.2.2.4.1. Propiedades del mortero

- Peso específico promedio del mortero $\gamma_m \geq 2\,200 \text{ kg/m}^3$
- Tamaño máximo del agregado = 0,005 m.
- Capacidad de absorción del agua < 8%

El peso específico del mortero que debe tomarse para el cálculo depende de la cantidad de acero de la armadura que se utiliza, por ejemplo:

- $\gamma_m = 2\,300 \text{ kg/m}^3$ (cuando las celdas de las mallas son pequeñas)
- $\gamma_m = 2\,400 \text{ kg/m}^3$ (cuando se usan dos mallas)
- γ_m se incrementa 50 kg/m^3 por cada malla adicional

2.2.2.5. Cemento Portland puzolánico

El cemento Portland puzolánico se obtiene al moler juntas o combinar mezclas de cemento Portland y puzolana. La puzolana es un material natural, o artificial; que contiene sílice en una forma reactiva y que puede representar hasta el 40% de la cantidad total de material del cemento. Sin embargo, por regla general, los cementos Portland puzolánicos adquieren su resistencia muy lentamente y requieren de un tiempo de fraguado más largo, pero su resistencia última es aproximadamente la misma que la del cemento Portland ordinario. Sin embargo, este nivel de desarrollo de la resistencia depende de la calidad de la puzolana, desde el punto de vista de su reactividad, y de la proporción de cemento Portland.

Expertos en ferrocemento con frecuencia recomiendan el cemento Portland puzolánico por el nivel de resistencia que muestra al ataque de sulfatos, y a otros agentes destructivos.

2.2.2.6. Agregados

Agregado es el nombre que se da al material inerte disperso dentro de la mezcla de cemento. Este material inerte ocupa del 60 al 70% del volumen del mortero. Por lo tanto, los agregados utilizados para la producción de mortero de alta calidad para estructuras de ferrocemento, deben ser fuertes, impermeables, libres de sustancias perjudiciales tales como polvo, terrones, materia orgánica, sales y otras sustancias dañinas. Deben ser capaces de producir una mezcla suficientemente trabajable, con una relación agua-cemento mínima para lograr la penetración apropiada en la malla.

En estructuras de ferrocemento el agregado es la arena. Según sea el espesor del elemento y de la densidad de la armadura puede hacerse necesario limitar su diámetro. También debe prestársele atención al módulo de fineza, al área específica, a la composición granulométrica y a la forma de los granos. Arenas bien graduadas permiten la obtención de morteros bien densos, con mejor resistencia a esfuerzos mecánicos y con mayor trabajabilidad. El módulo de fineza puede variar entre 2,15 y 2,75 para el ferrocemento.

2.2.2.7. Calidad del agua de la mezcla

El agua que se use para preparar la mezcla debe ser limpia y fresca ya que, la calidad del agua es de vital importancia. Las impurezas que el agua contenga pueden interferir en el fraguado del cemento, afectar adversamente la resistencia y provocar la corrosión del refuerzo. El barro, los ácidos, las sales solubles, los materiales vegetales en descomposición, y muchas otras sustancias contaminantes constituyen impurezas que puede contener el agua. En ningún caso se usará agua de mar, o similar, para mezclar el mortero, ya que ésta aumenta el peligro de que la corrosión afecte a la malla de refuerzo. Generalmente, el agua de los servicios públicos se considera como satisfactoria y no requiere tratamientos adicionales.

3. CÁLCULO, ELABORACIÓN Y ENSAYO DE ECOCOLUMNAS DE BOTELLAS

Una ecocolumna es un elemento estructural formado a base de botellas plásticas cortadas y colocadas una dentro de la otra hasta alcanzar la altura deseada. Estas botellas son utilizadas como envases para agua pura, gaseosas, y otras bebidas. Pero una vez que se consume el producto, las botellas se convierten en material contaminante para el ambiente, principalmente por la falta de educación ambiental de las personas que no las desechan en depósitos de basura o en lugares de reciclaje, sino que las tiran en el suelo sin pensar en el grave daño que se le causa al medio ambiente de nuestro planeta.

El material del que están hechos estos envases es el polietileno de tereftalato que tarda más de 100 años en descomponerse. Esta es la principal razón por la que la organización Pura Vida comenzó a construir paneles ecológicos utilizando madera para formar el marco, malla de gallinero para recubrir dicho marco y las botellas plásticas rellenas con basura inorgánica, como material de relleno dentro del marco de madera, para después colocar un recubrimiento de mortero.

Partiendo de esta idea se concibió una nueva forma de construir los paneles ecológicos o, como se les llama en este trabajo de graduación, ecopaneles prefabricados. Uno de los objetivos, al replantear la idea original, fue el de eliminar el uso de la madera en los paneles y hacer que las botellas plásticas funcionen como un elemento estructural más que como un elemento de relleno. Con tal propósito se planteó la posibilidad de cortar y colocar las

botellas una dentro de la otra hasta formar una columna de sección hueca, pero para estar seguros de que este nuevo elemento estructural funciona fue necesario someterlo a una serie de cálculos y consideraciones que han permitido validar su uso.

A continuación se describe el procedimiento de cálculo así como la forma de construcción de dichas columnas. Concretamente, para este trabajo de graduación, a las columnas hechas con botellas plásticas se les llamará ecocolumnas y en su preparación se utilizaron únicamente botellas plásticas de 600 ml.

3.1. Cálculo de la resistencia de una ecocolumna

La ecocolumna construida con botellas plásticas se idealiza como un cilindro hueco de pared delgada, y se parte de esta idealización para calcular su resistencia a compresión, aplicando la fórmula de la carga crítica de Euler.

3.1.1. Procedimiento de cálculo

A continuación se desarrolla el procedimiento para calcular la resistencia a compresión de un elemento, según la fórmula de Euler para elementos articulados en los extremos. La información previa necesaria implica contar con los siguientes datos: a) El momento de inercial del elemento, b) El módulo de elasticidad del material, y c) La longitud efectiva o crítica del elemento.

$$P_c = \frac{E * I * \pi^2}{L^2}$$

Los datos que se muestran a continuación fueron utilizados para calcular el momento de inercia de una ecocolumna, y se obtuvieron de una botella de Coca Cola de 600 ml.

Tabla V. **Datos utilizados para calcular el momento de inercia**

t	6,30 mm	
Dext	6,80 cm	68,0 mm
Dint	6,74 cm	67,4 mm
R	3,40 cm	
Rext	34,00 mm	
Rint	33,70 mm	

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- t = espesor de pared de una botella plástica
- Dext = diámetro exterior
- Dint = diámetro interior
- R = radio del elemento
- Rext = radio exterior
- Rint = radio interior

Según la fórmula del momento de inercia de un cilindro de pared delgada que se representa como:

$$I = \pi * R_{med}^3 * t$$

Entonces:

$$R_{med} = \frac{R_{ext} + R_{int}}{2}$$
$$R_{med} = \frac{34 + 33,70}{2} = 33,85 \text{ mm}$$

Con la sustitución de valores dentro de la ecuación de la inercia se demuestra que:

$$I = \pi * 33,85^3 * 6,3$$
$$I = 36\,555,03015 \text{ mm}^4 = 3,65550 \text{ cm}^4$$

Por lo que el cálculo de la longitud efectiva del elemento, con la ecuación 10,6 del ACI 318, muestra que:

$$22 \geq \frac{L * k}{R_{giro}}$$

Y luego de despejar la ecuación para L, se obtiene que:

$$L \leq \frac{22 * R_{giro}}{k}$$

Donde:

- L = longitud efectiva del elemento
- R_{giro} = radio de giro del elemento
- k = factor de longitud efectiva, y su valor será de 1 por ser un elemento no arriostrado

Por lo tanto, el cálculo del radio de giro del elemento se efectúa aplicando la siguiente ecuación:

$$R_{giro} = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Donde:

- I = inercia del elemento
- A = es el área de la pared delgada

La diferencia entre el área del radio exterior y el área del radio interior determina el área que se utilizará, como se muestra a continuación:

$$A = \pi * r^2 \quad o \quad \frac{\pi}{4} * D^2$$

Entonces, según los datos anteriores, se tiene que:

$$A_{ext} = \frac{\pi}{4} * 6,8^2 = 36,31681 \text{ cm}^2$$

$$A_{int} = \frac{\pi}{4} * 6,74^2 = 35,67875 \text{ cm}^2$$

$$A = A_{ext} - A_{int}$$

$$A = 36,31681 - 35,67875$$

$$A = 0,63806 \text{ cm}^2$$

Y al sustituir los valores en la ecuación del radio de giro se demuestra que:

$$R_{giro} = \sqrt{\frac{3,65550}{0,63806}}$$
$$R_{giro} = 2,39356 \text{ cm}$$
$$R_{giro} = 23,93556 \text{ mm}$$

Luego, con el valor del radio de giro se calcula la longitud efectiva, así:

$$L \leq \frac{22 * 23,93556}{1}$$
$$L \leq 526,58242 \text{ mm}$$
$$L \leq 52,65824 \text{ cm}$$
$$L \leq 0,5265824 \text{ m}$$

Lo que determina que la altura de la ecocolumna debe ser menor o igual a 0,52 m.

En cuanto al cálculo de la P crítica de Euler únicamente se debe conocer cuál es el módulo de elasticidad del material con el que están fabricadas las botellas, en este sentido, y tal como se indicó en el capítulo anterior, las botellas se fabrican, principalmente, con Polietileno de Tereftalato (PET), aunque en la investigación desarrollada por el ponente de la presente tesis, se comprobó que también pueden fabricarse con Polietileno de baja densidad. Sin embargo, para efectos de cálculo se utilizó el módulo de elasticidad del PET y, según la tabla III, el valor de dicho módulo es el siguiente:

$$E = 600\,000 \text{ psi}$$
$$E = 42\,184,31 \text{ kg/cm}^2$$

Entonces, luego de la sustitución de valores se tiene que:

$$P_c = \frac{42\,184,31 * 3,65550 * \pi^2}{52,658242^2}$$

$$P_c = 548,86448 \text{ kg}$$

El resultado demuestra que una ecocolumna fabricada con botellas plásticas soporta hasta 548 kilogramos de carga teórica. Luego de este cálculo se ensayó la producción de ecocolumnas fabricadas con diferentes tipos de botellas, a fin de corroborar si los datos obtenidos eran correctos.

3.2. Elaboración del elemento estructural ecocolumna

Una vez que quedó determinada la altura del elemento estructural, se procedió a la fabricación de ecocolumnas utilizando diferentes tipos de botellas. Debe recordarse, sin embargo, que la ecocolumna debe construirse con un solo tipo de botella, por ejemplo: sólo de botellas de Coca Cola, o sólo de botellas de agua pura. La razón estriba en que, al ser de diferentes marcas, el diseño del envase no es igual y, por lo tanto, no es posible colocar uno dentro del otro. A continuación se describe la forma como se construye una ecocolumna, dependiendo del tipo de botella seleccionado.

3.2.1. Ecocolumna construida con botellas de Coca Cola

Para armar una ecocolumna con botellas de Coca Cola, primero se corta la botella en la parte de arriba, a la altura que se señala en la imagen de las figuras número 6 y 7.

Figura 6. **Forma de cortar una botella de Coca Cola**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Sección de Estructuras.

El motivo por el que es necesario cortar la botella de Coca Cola en el lugar que se muestra en la imagen, es porque, atendiendo al diseño de la misma, se aprecia que es más complicado y trabajoso tratar de introducir otra botella dentro, a no ser que se haga por la parte de arriba, siendo necesario cortarle la parte superior y dejándola igual a como se muestra en la figura siguiente.

Figura 7. **Botella de Coca Cola cortada**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Este procedimiento de cortado se repetirá en todas las botellas necesarias para alcanzar la altura del elemento estructural que, como quedó determinado por los cálculos efectuados y descritos en acápite anteriores, no debe ser mayor de 0,52 m.

Una vez que las botellas han sido cortadas se procede a determinar el nivel de relleno que necesita cada una. La forma de hacerlo es la siguiente: se introduce una dentro de la otra hasta donde sea posible. Cuando el envase ya no entre más se observará un espacio vacío en el fondo de la botella de abajo.

Este vacío es el que debe ser relleno con la basura inorgánica. Se toma nota de la altura del espacio vacío y se retira la botella que sirvió para observar el nivel necesario de relleno. Luego, se rellenan con basura inorgánica, limpia y seca, adecuadamente apisonada.

Para lograr un mejor apisonado se recomienda utilizar una pieza cilíndrica, de madera, de media pulgada de diámetro, que tenga en la base una pata de elefante. A falta de este elemento, se puede trabajar con cualquier objeto que permita lograr el apisonado necesario. Seguidamente, las botellas cortadas se colocan una dentro de la otra hasta alcanzar la altura determinada.

El relleno con basura inorgánica, aparte de favorecer la no contaminación ambiental, cumple con la función de anular el espacio vacío que queda al colocar una botella dentro de la otra, con esto, el elemento estructural adquiere mayor estabilidad y consistencia. Queda claro que, aunque las botellas pasen por un proceso de relleno, la ecocolumna que se construye sigue siendo un cilindro hueco de pared delgada.

En el remate de la ecocolumna se coloca la base de otra botella, a manera de tapón, como se muestra en la figura 8. Este “tapón” da mayor resistencia a la parte superior de la ecocolumna y con ello se previene un aplastamiento en ese punto del elemento estructural.

Figura 8. Tapón al final de una ecocolumna



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La ecocolumna terminada se verá como la que se muestra en la figura 9. Tendrá una altura de 0,505 m y para construirla se habrán empleado siete botellas de coca cola, cortadas de acuerdo con los procedimientos descritos en este trabajo de graduación.

Figura 9. **Ecocolumna con envases de Coca Cola, terminada**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

3.2.2. Ecocolumna armada con botellas de agua pura Salvavidas

Por tratarse de un diseño diferente al que emplean los envases de Coca Cola, cuando se trabaja con botellas de Salvavidas el proceso de fabricación de la ecocolumna cambia. Cambia de la siguiente manera:

- a) La botella que va en la base no se corta. Se usa completa, pero siempre se rellena con basura inorgánica, limpia y seca, debidamente apisonada por capas.
- b) Como no se corta el envase, la basura se introduce por la boca de la botella y, por ser éste demasiado estrecho, no se puede trabajar con el mismo elemento de madera que se utiliza para rellenar las botellas de las ecocolumnas construidas con envases de Coca Cola.
- c) Como en el caso de los envases de Coca Cola, las botellas deben rellenarse con basura inorgánica de acuerdo con el procedimiento que se explica en las páginas 52 y 53 con el fin de garantizar la mayor estabilidad del elemento estructural.
- d) Una vez que se tiene preparada la botella base, se procede a cortar los envases que sean necesarios para construir el elemento estructural, con la altura previamente determinada.
- e) El corte de estas botellas es diferente al que se hace en los envases de Coca Cola, pues se efectúa en la base de la botella, en el punto donde se observa una línea de unión que es producto del proceso de fabricación de la botella. En la imagen de la figura 10 el punto de corte está marcado con una línea de color negro.

Figura 10. **Forma de cortar una botella de agua pura**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Después de que las botellas han sido cortadas, se coloca una encima de la que se utiliza como base, y las demás, previo relleno con basura inorgánica limpia, se ordenan una encima de la otra hasta llegar a la altura determinada. El procedimiento para rellenar estas botellas varía un poco en cuanto al que se sigue con las botellas de Coca Cola.

Una vez que se tiene la botella base, y después de haber cortado el resto de las botellas necesarias, se procede de la siguiente manera: se introduce una botella cortada dentro de la botella base hasta donde esta lo permita. Se observará un espacio vacío en la parte de arriba de la botella cortada el cual debe ser rellenado. Es importante señalar que el primer relleno debe hacerse solamente hasta donde llegue el tapón de la botella de abajo. Una vez tomada esta altura se retira la botella cortada y se procede a rellenarla con la basura inorgánica, limpia y seca.

Cuando se introdujo la botella se pudo observar un espacio vacío que estaba en los costados de la botella de abajo, para llenar este espacio, después de haber rellenado la primera parte, se coloca una pieza cilíndrica de diámetro próximo al del tapón de los envases, en el centro de la botella cortada, y se coloca basura alrededor de este con la intención de dejar un agujero en el centro que será donde encaje el tapón de la botella que ira debajo de esta, y así se rellena, tanto la parte de arriba de la botella como los costados. Es importante recordar que antes de colocar cada botella en su lugar, estas se deberán rellenar con basura inorgánica limpia.

La ecocolumna construida con botellas de agua pura Salvavidas alcanza la altura de 0,458 m con el empleo de tres envases. Si se rebasa dicha cantidad, se sobrepasará la altura máxima calculada en 0,52 m. La ecocolumna se verá como la imagen que se observa en la figura 11.

Figura 11. **Ecocolumna armada con envases de agua pura, terminada**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En el medio guatemalteco circulan diversos productos envasados en botellas como la de agua pura Salvavidas, tales como Tiky, Orange Crush, 7 Up, Raptor, Aqua, y otras más. Todas con similares características a las que poseen los envases utilizados en los ensayos descritos en este trabajo. De modo que la modalidad de construcción que se viene explicando puede ponerse en práctica empleando envases de cualesquiera de los productos enunciados.

3.2.3. Ecocolumna armada con envases de Powerade

Aunque su diseño es diferente, el método para construir una ecocolumna utilizando botellas de Powerade es el mismo que se usa al fabricar una ecocolumna de envases de Coca Cola: se cortan las botellas por la parte de arriba, de la misma forma en que se hace con los recipientes de Coca Cola.

Una vez que se han cortado las botellas necesarias para que la ecocolumna tenga la altura determinada, se procede a rellenar las botellas con basura inorgánica, limpia y seca, debidamente apisonada. Para saber hasta que altura se debe rellenar la botella se coloca una dentro de la otra y el espacio que quede vacío entre ellas será el que se rellene, esto dará mayor estabilidad y consistencia al elemento estructural.

Después de rellenar las botellas se procede a construir la ecocolumna colocando una botella dentro de la otra hasta alcanzar la altura previamente determinada. De igual manera que en una ecocolumna de botellas de Coca Cola, en la parte superior se coloca la base de otra botella, a modo de tapón, para darle mayor resistencia a la parte superior. Una ecocolumna de Powerade, terminada, requiere el empleo de cinco botellas para alcanzar 0,458 m de altura. El producto final se verá como se muestra en la figura 12.

Figura 12. **Ecocolumna de Powerade terminada**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

3.3. Ensayo a compresión de las ecocolumnas

Para saber si las ecocolumnas tienen la capacidad de soportar la carga a compresión teórica calculada es necesario realizar el ensayo a compresión. La información que de éste se obtenga permitirá determinar si la ecocolumna funciona efectivamente en los ecopaneles prefabricados como un elemento estructural y no sólo como un material de relleno.

Para el ensayo a compresión que se realizó en el marco de este trabajo de graduación se utilizaron siete ecocolumnas: a tres de ellas se les midió el aplastamiento que mostraron durante el ensayo; a las cuatro restantes la deflexión o pandeo que evidenciaron. En los acápites siguientes se muestran fotografías de los ensayos que se ejecutaron junto con los datos que de los mismos se obtuvieron, así como la interpretación de los resultados que produjeron las prácticas en mención.

3.3.1. Ensayo a compresión midiendo aplastamiento

Para medir el aplastamiento causado por los efectos de la carga aplicada por el gato hidráulico, se utilizó un deformómetro de madera, con una escala en milímetros y que bajaba conforme la ecocolumna se aplastada.

3.3.1.1. Ecocolumna de botellas de Coca Cola

Para este ensayo se usaron dos ecocolumnas: una rellena con basura inorgánica, y la otra sin rellenar. El propósito de esta práctica fue comprobar el grado de diferencia en los resultados de una y otra, pues si éstos mostraban grandes diferencias quedaría demostrado que no se podía idealizar a la ecocolumna como un cilindro hueco de pared delgada y, en consecuencia,

tendrían que replantearse los cálculos. Por otro lado, si los resultados no variaban mucho, ello significaría que a pesar de estar rellena de basura inorgánica, la ecocolumna continuaba comportándose como un cilindro hueco de pared delgada.

3.3.1.1.1. Ecocolumna vacía

A continuación se muestran fotografías del ensayo y, posteriormente, los resultados que se obtuvieron al terminar la práctica evaluativa de las ecocolumnas.

Figura 13. **Montaje para ensayo a compresión utilizando bomba eléctrica**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 14. **Ecocolumna sin relleno para ser ensayada a compresión**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 15. **Ecocolumna ladeada, después de aplicar carga al elemento**



Fuente: CII, Sección de Estructuras

En esta figura se aprecia cómo al estar aplicando una carga continua, la ecocolumna pierde estabilidad, ladeándose hacia un lado, causando excentricidad. Esto se debe a que al aplicar la carga, las botellas sufren un acomodo, provocando una reacción igual a la que se aprecia en la figura.

Figura 16. **Compresión de la botella situada en la base del elemento**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí se puede apreciar cómo es que, al continuar aplicando la carga axial con el gato hidráulico, la botella de la base comienza a aplastarse, perdiendo así su forma, causando que el elemento estructural comience a presentar deformaciones mayores, lo que significa que este perdió su capacidad de carga.

Figura 17. **Ecocolumna al terminar el ensayo a compresión**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Datos de la ecocolumna vacía:

Altura = 49 cm
Diámetro = 6,8 cm
Gato = ENERPAC RC53
Área del gato = 0,99 plg²

Tabla VI. **Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna vacía**

Esfuerzo(psi)	Deformación(cm)
0	7,6
60	7,7
80	7,9
100	8,3
120	9,1
140	10,0
130	10,1
140	13,1

Fuente: elaboración propia.

Con los datos de la tabla VI se trazó una curva de carga-deformación la cual se trabajó con el programa Excel. Esta curva permitió encontrar el valor de la carga crítica real y su comparación con la carga crítica teórica. Dicho valor se encuentra en la parte de la curva que mantiene la linealidad en virtud de que después de este punto el elemento trabaja fuera de su valor de diseño.

El procedimiento anterior se resume en los siguientes pasos: a) Se encuentra el valor de carga aplicado por el gato, b) Como se conoce el esfuerzo aplicado por el gato se multiplica este valor por el área del gato y de esta manera se obtiene el valor de carga, c) La deformación comienza a partir de cero, por lo tanto, 7,6 cm es el valor inicial cero, d) Para obtener los siguientes valores de deformación se le resta al siguiente valor 7,6 cm, y así sucesivamente hasta llegar al final. A continuación se muestran las dos primeras iteraciones, el resto se trabajó con la ayuda del programa Excel.

Procedimiento

Primera carga:

$$Carga = Esfuerzo * \text{Área gato}$$

$$Carga_1 = 0 \left(\frac{lb}{plg^2} \right) * 0,99(plg^2)$$

$$Carga_1 = 0 lb$$

$$Carga_1 = 0 lb * 0,45 kg = 0 Kg$$

Segunda carga:

$$Carga = Esfuerzo * \text{Área gato}$$

$$Carga_2 = 60 \left(\frac{lb}{plg^2} \right) * 0,99(plg^2)$$

$$Carga_2 = 59,4 lb$$

$$Carga_2 = 59,4 lb * 0,4536 kg = 26,94380 Kg$$

Primera deformación:

$$Def_1 = 7,6 cm$$

$$Def_1 = 0 cm$$

Segunda deformación:

$$Def_2 = 7,7 - 7,6$$

$$Def_2 = 0,1 \text{ cm}$$

Tabla VII. **Resultados obtenidos utilizando el software Excel**

Esfuerzo (psi)	Deformación (cm)	Def. (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)
0	7,6	0	0,00	0
60	7,7	0,10	59,40	26,94384
80	7,9	0,30	79,20	35,92512
100	8,3	0,70	99,00	44,90640
120	9,1	1,50	118,80	53,88768
140	10,0	2,40	138,60	62,86896
130	10,1	2,50	128,70	58,37832
140	13,1	5,50	138,60	62,86896

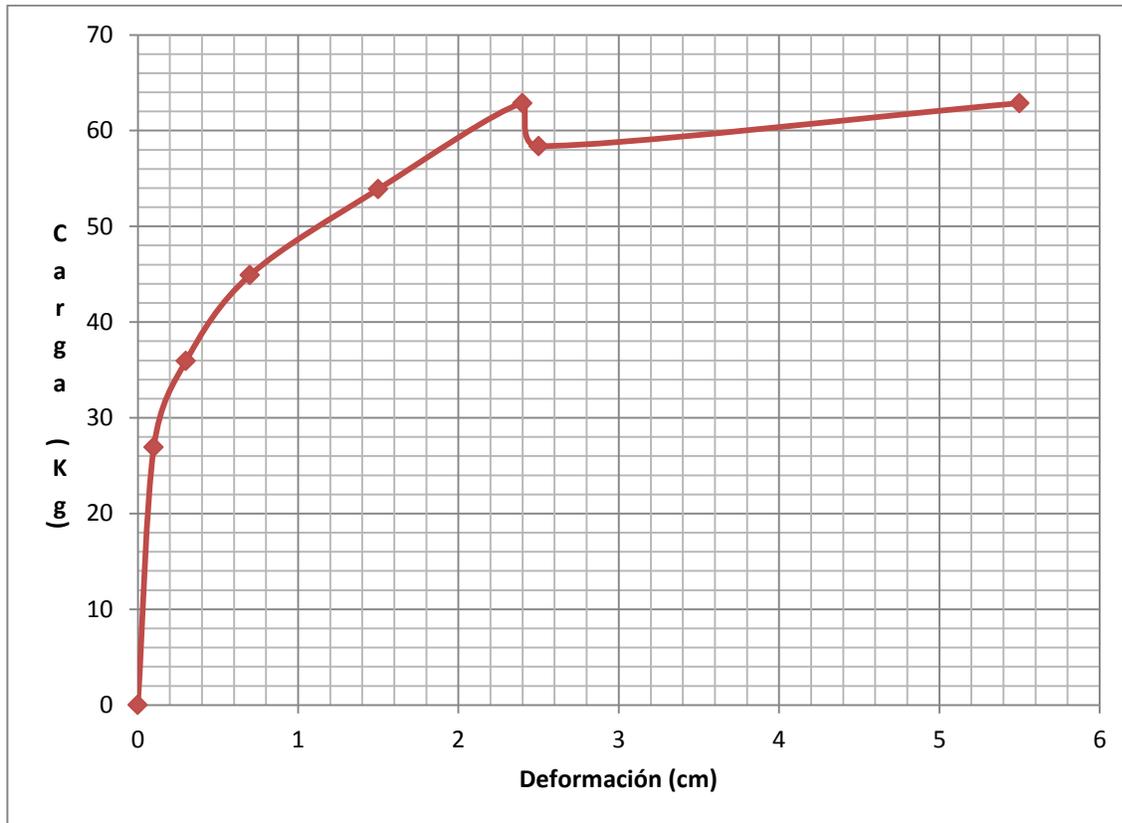
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Resultados usados para plotear la curva de carga – deformación**

Carga kg	Def. (cm)
0	0
26,94384	0,1
35,92512	0,3
44,90640	0,7
53,88768	1,5
62,86896	2,4
58,37832	2,5
62,86896	5,5

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Gráfica de carga – deformación de ecocolumna vacía



Fuente: elaboración propia.

En la curva que se obtuvo, y que se muestra en la figura 18, se observa que el valor de carga crítica real es igual a 26,94 kg. Pues fue hasta dicho punto donde el elemento estructural dejó de tener un comportamiento lineal. Esto significa que después de ese punto la deformación es mucho mayor de la que el elemento puede soportar.

Para las siguientes dos ecocolumnas se empleó el mismo procedimiento de cálculo e interpretación de resultados.

3.3.1.1.2. Ecocolumna rellena

A continuación se muestran fotografías del desarrollo del ensayo, y seguidamente se presentan los resultados que se registraron al concluir la prueba con la ecocolumna.

Figura 19. **Montaje para ensayo a compresión utilizando bomba eléctrica**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 20. **Ecocolumna con aplastamiento local durante la aplicación de la carga**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí se aprecia cómo es que la botella de arriba comienza a aplastarse debido a la aplicación constante de la carga axial.

Figura 21. **Compresión en la base del elemento y ladeo**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

El hecho de que en esta figura no se aprecie un aplastamiento tan exagerado como el de la ecocolumna vacía, se debe a que esta se encuentra rellena con la basura inorgánica que le brinda una mayor consistencia.

Datos ecocolumna rellena:

Altura = 50 cm
Diámetro = 6,8 cm
Gato = ENERPAC RC53
Área del gato = 0,99 plg²

Tabla IX. **Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna rellena**

Esfuerzo (PSI)	Deformación(cm)
0	6,4
100	6,5
120	6,6
140	6,6
160	7,3

Fuente: elaboración propia.

Esta tabla contiene los datos que se generan al momento de practicar el ensayo utilizando la bomba eléctrica; con la ayuda de estos resultados, es posible determinar cuál es el comportamiento que presentó esta ecocolumna, y así poder compararla con la anterior, para saber si existe una diferencia marcada entre una ecocolumna vacía y una rellena con basura inorgánica.

Tabla X. **Resultados que se obtuvieron utilizando el software Excel**

Esfuerzo (PSI)	Deformación (cm)	Def. (cm)	Carga (lb)	Carga (Kg)
0	6,4	0	0	0
100	6,5	0,1	99,0	44,90640
120	6,6	0,2	118,8	53,88768
140	6,6	0,2	138,6	62,86896
160	7,3	0,9	158,4	71,85024

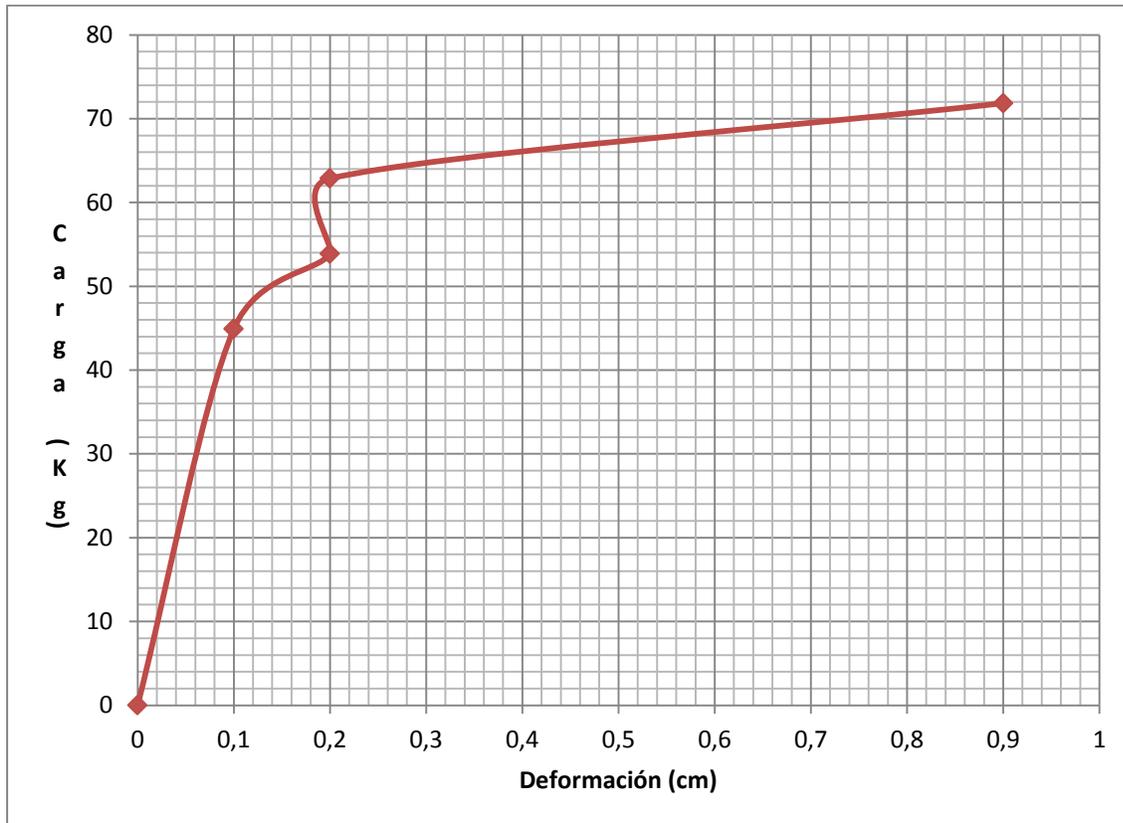
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Datos que se utilizaron para plotear la curva de carga – deformación**

Carga (Kg)	Def. (cm)
0	0
44,90640	0,1
53,88768	0,2
62,86896	0,2
71,85024	0,9

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Gráfica de carga – deformación de ecocolumna rellena**



Fuente: elaboración propia.

En el punto donde el elemento pierde su comportamiento lineal, el valor de carga es igual a 44,90 kg. Supera el dato que se obtuvo en el ensayo de la ecocolumna vacía, pero no significa que el elemento estructural dejó de comportarse como un cilindro hueco de pared delgada, pues los demás datos se mantienen dentro del mismo rango de carga. De modo que su comportamiento es similar. Esto indica que al rellenar una ecocolumna con basura inorgánica, limpia y seca, no se cambia el comportamiento de la ecocolumna, únicamente se la dota de una mayor estabilidad.

3.3.1.2. Ecocolumna de botellas de Powerade

Secuencia fotográfica que muestra el desarrollo del experimento y los resultados que de él se obtuvieron al terminar la evaluación de la ecocolumna.

Figura 23. **Montaje para ensayo a compresión utilizando bomba eléctrica**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 24. **Ecocolumna ladeada por la aplicación de la carga axial**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta figura, se aprecia cómo es que el elemento estructural sufre una deflexión, provocando que exista excentricidad en la aplicación de la carga axial.

Figura 25. **Aplastamiento local causado por la aplicación de la carga**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Esta figura muestra, cómo es que al colocarle el tapón a la ecocolumna en la parte de arriba, para ayudarla a mejorar su resistencia, se evita que el aplastamiento local a la aplicación de la carga sea mucho peor y pueda comprometer de una manera más seria al elemento estructural.

Datos de la ecocolumna de Powerade

Altura = 50 cm
Diámetro = 6,8 cm
Gato = ENERPAC RC53
Área del gato = 0,99 plg²

Tabla XII. **Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna**

Esfuerzo (PSI)	Deformación (cm)
0	9,0
60	9,2
80	9,4
100	9,7
120	9,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados que se trabajaron con el software Excel**

Esfuerzo (PSI)	Deformación (cm)	Def. (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)
0	9,0	0	0	0
60	9,2	0,2	59,4	26,94384
80	9,4	0,4	79,2	35,92512
100	9,7	0,7	99,0	44,90640
120	9,8	0,8	118,8	53,88768

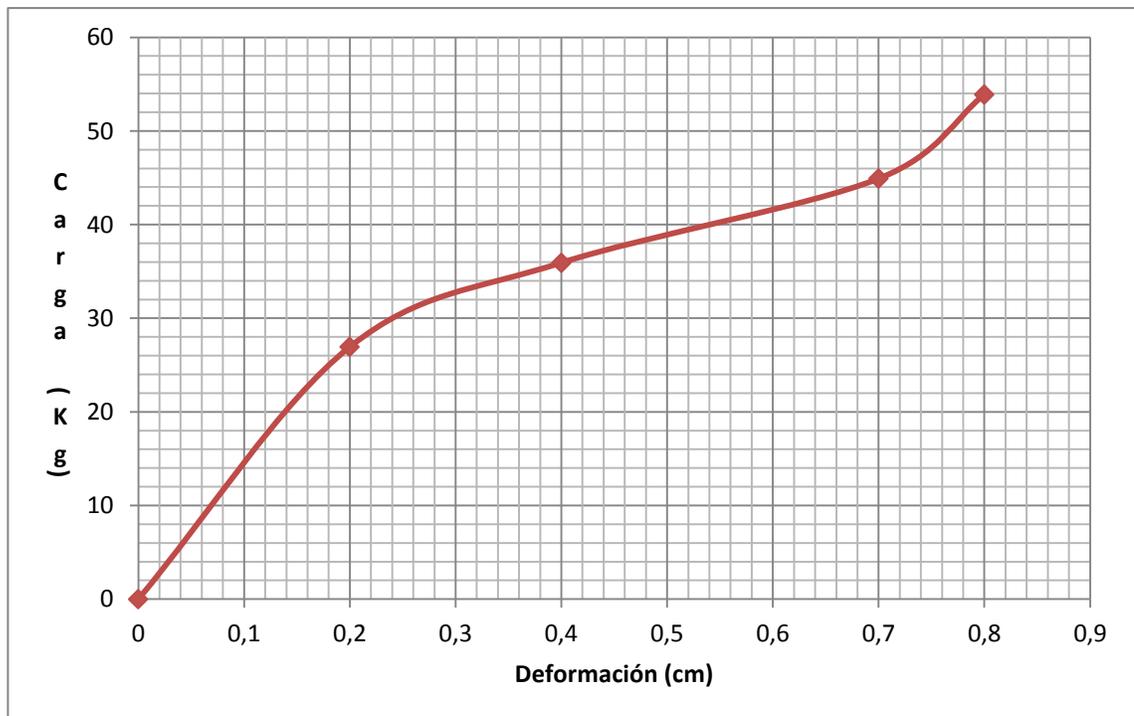
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Datos que permitieron plotear la curva de carga – deformación**

Carga (kg)	Def. (cm)
0	0
26,94384	0,2
35,92512	0,4
44,90640	0,7
53,88768	0,8

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Gráfica de carga – deformación de ecocolumna de Powerade**



Fuente: elaboración propia.

Se observa que el valor de carga crítica real es de 26,94 kg. Para valores de carga mayores, la gráfica muestra un incremento acelerado de deformación con pérdida de su linealidad. Esto significa que el elemento estructural comenzó a deformar a un nivel mayor del que soporta.

Como parte de la experimentación del proyecto que propongo para la construcción de viviendas económicas y ecológicas, cuatro ecocolumnas fueron sometidas a compresión para medir el grado de deflexión que mostraron durante el ensayo.

3.3.1. Ensayo a compresión para medir la deflexión de un elemento

Para medir el grado de deflexión del elemento estructural se colocó un deformómetro a $L/2$ del objeto en observación, con el propósito de determinar si ocurría alguna acción de pandeo y, si de daba, en que dirección se manifestaba.

3.3.1.1. Ecocolumna construida con botellas de agua pura

Para los ensayos se utilizaron cuatro ecocolumnas iguales, en ambientes preparados para ese fin. Seguidamente, y mediante el uso de la cámara fotográfica, se procedió a captar las escenas más importantes del innovador proyecto. A continuación se presentan imágenes del trabajo desarrollado.

Figura 27. **Montaje para el ensayo a compresión usando bomba eléctrica**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta figura se aprecia cómo fue colocado cada uno de los elementos involucrados en el ensayo a compresión; para el ensayo se utilizó una bomba eléctrica OWATONA, un gato hidráulico ENERPAC RC53 de 10 toneladas y un deformómetro ubicado a $L/2$ del elemento, para así poder medir la deflexión causada por la aplicación constante de la carga.

Figura 28. **Ecocolumna uno, ladeada por la aplicación de la carga**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí puede verse cómo es que al aplicar la carga con el gato hidráulico, la ecocolumna comienza a flexionarse hacia un lado, también se aprecia cómo es que la botella de la base comienza a aplastarse.

Figura 29. **Aplastamiento en la base de la ecocolumna uno debido a la aplicación de la carga**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí se puede apreciar de una mejor manera lo que se mencionaba en la figura anterior, al aplicar la carga axial, la ecocolumna sufre una deflexión, pero también la botella de la base comienza a ser aplastada, perdiendo su forma y causando que el elemento estructural pierda estabilidad y forma.

Figura 30. **Ladeo y aplastamiento en el centro de la ecocolumna dos**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta figura, se aprecia cómo es que con la aplicación de la carga axial, la ecocolumna se flexiona y se ve cómo es que la botella que se encuentra al centro del elemento estructural, comienza a perder su forma, aplastándose y provocando que esta llegue a su carga última.

Figura 31. **Deflexión de la ecocolumna dos**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta figura se puede ver desde otro ángulo, la situación descrita en la figura anterior, en donde la botella del centro de la ecocolumna comienza a deformarse, aplastándose y causando que esta alcance su carga última.

Figura 32. Deformación de la ecocolumna tres



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta imagen, se aprecia cómo es que al aplicarle la carga axial a la ecocolumna, esta sufre una deflexión y la botella que se encuentra arriba pierde su forma y se aplasta.

Figura 33. **Aplastamiento de la ecocolumna tres**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La imagen anterior muestra cómo es que la botella de arriba de la ecocolumna, al aplicar la carga axial con el gato hidráulico, comienza a perder su forma, aplastándose y causando que esta se flexione hacia un lado, alcanzando así su carga última.

3.3.1.1.1. Datos de la ecocolumna uno

Altura	=	50,5 cm
Diámetro	=	6,8 cm
Gato	=	ENERPAC RC53
Área del gato	=	0,99 plg ²
Exactitud del deformómetro	=	0,01 mm
Altura del deformómetro	=	28,5 cm

Tabla XV. **Resultados obtenidos del ensayo a compresión de la ecocolumna uno**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro (mm)	
40	11	0
60	10	31
80	9	14
100	9	79
120	9	79
140	7	91
160	5	25
180	1	91

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Resultados obtenidos utilizando el software Excel**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro (mm)		Deformación (mm)	Carga (lb)	Carga (kg)
40	11	0	0	39,6	17,96256
60	10	31	0,29	59,4	26,94384
80	9	14	1,86	79,2	35,92512
100	9	79	1,21	99,0	44,90640
120	9	79	1,21	118,8	53,88768
140	7	91	3,90	138,6	62,86896
160	5	25	5,35	158,4	71,85024
180	1	91	9,90	178,2	80,83152

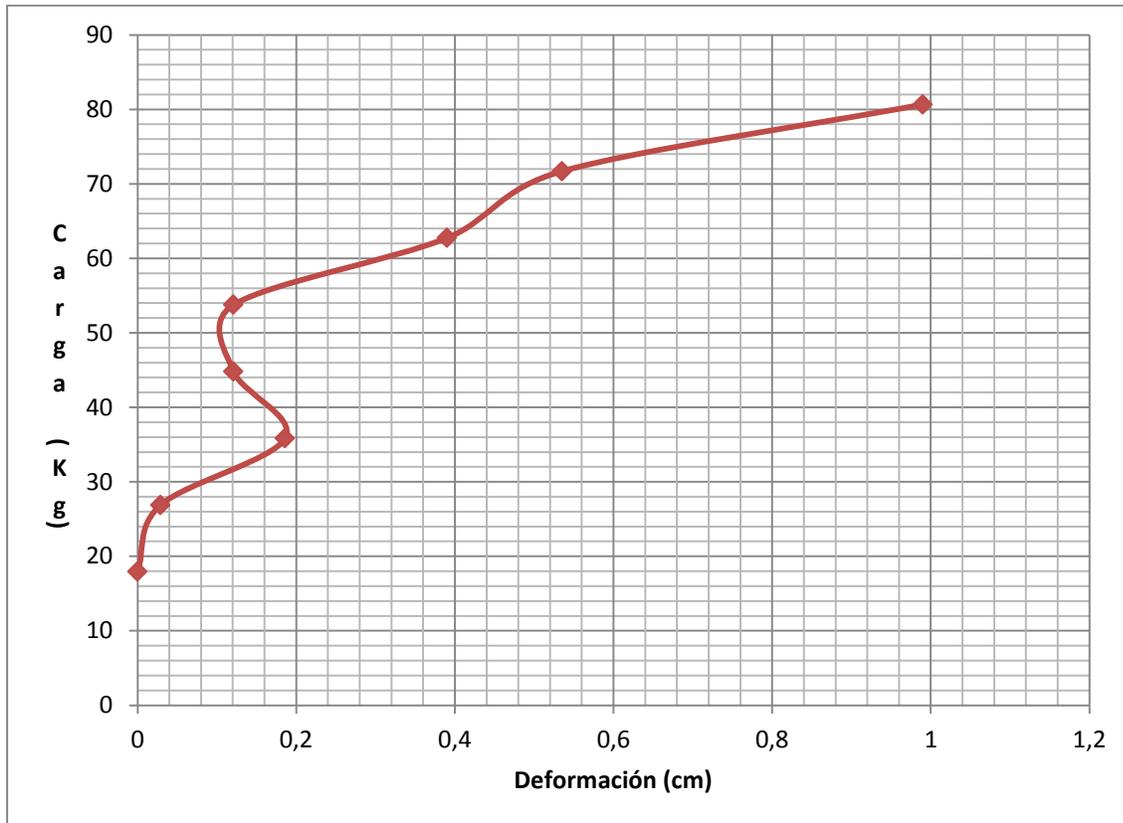
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resultados que se usaron para plotear la curva de carga – deformación**

Carga (kg)	Deformación (cm)
17,96256	0
26,94384	0,029
35,92512	0,186
44,90640	0,121
53,88768	0,121
62,86896	0,390
71,85024	0,535
80,83152	0,990

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Gráfica de carga – deformación de la ecocolumna uno



Fuente: elaboración propia.

El valor de la carga crítica es de 26,94 kg. El primer valor no se utiliza porque a partir de él empieza el análisis de los resultados. Los siguientes valores no se toman en cuenta porque después del valor de carga crítica que se menciona, la gráfica pierde su linealidad.

3.3.1.1.2. Datos de la ecocolumna dos

Altura	=	50,5 cm
Diámetro	=	6,8 cm
Gato	=	ENERPAC RC53
Área del gato	=	0,99 plg ²
Exactitud del deformómetro	=	0,01 mm
Altura del deformómetro	=	28,5 cm

Tabla XVIII. **Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna dos**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro (mm)	
60	9	0
80	8	50
100	8	11
120	2	5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Resultados que se registraron utilizando el software Excel**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro		Deformación (mm)	Carga (lb)	Carga (kg)
60	9	0	0	59,4	26,94384
80	8	50	0,10	79,2	35,92512
100	8	11	0,89	99,0	44,90640
120	2	5	6,95	118,8	53,88768

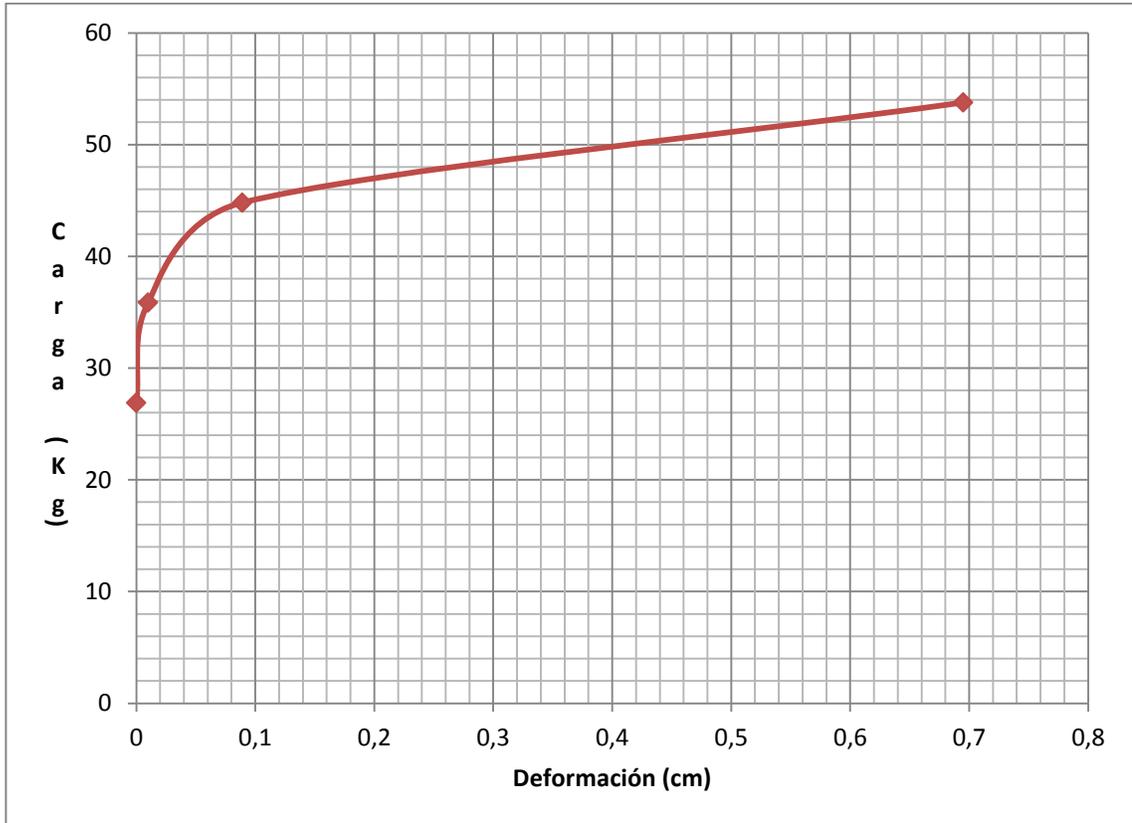
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resultados que sirvieron para plotear la curva de carga – deformación**

Carga (kg)	Deformación (cm)
26,94384	0
35,92512	0,010
44,90640	0,089
53,88768	0,695

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Gráfica de carga – deformación de la ecocolumna dos**



Fuente: elaboración propia.

Según la gráfica, el valor de carga crítica es igual a 35,92 kg. Este valor corresponde al segundo dato que se representa en la tabla XX. Después de él, la gráfica deja de comportarse linealmente.

3.3.1.1.3. Datos de la ecocolumna tres

Altura	=	50 cm
Diámetro	=	6,8 cm
Gato	=	ENERPAC RC53
Área del gato	=	0,99 plg ²
Exactitud del deformómetro	=	0,01 mm
Altura del deformómetro	=	28,5 cm

Tabla XXI. **Resultados que se registraron en el ensayo a compresión de la ecocolumna tres**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro (mm)	
60	9	0
80	9	97
100	8	94
120	8	85

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Resultados que se registraron utilizando el software Excel**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro (mm)		Deformación (mm)	Carga (lb)	Carga (kg)
60	9	0	0	59,4	26,94384
80	9	97	0,97	79,2	35,92512
100	8	94	-0,06	99,0	44,90640
120	8	85	-0,15	118,8	53,88768

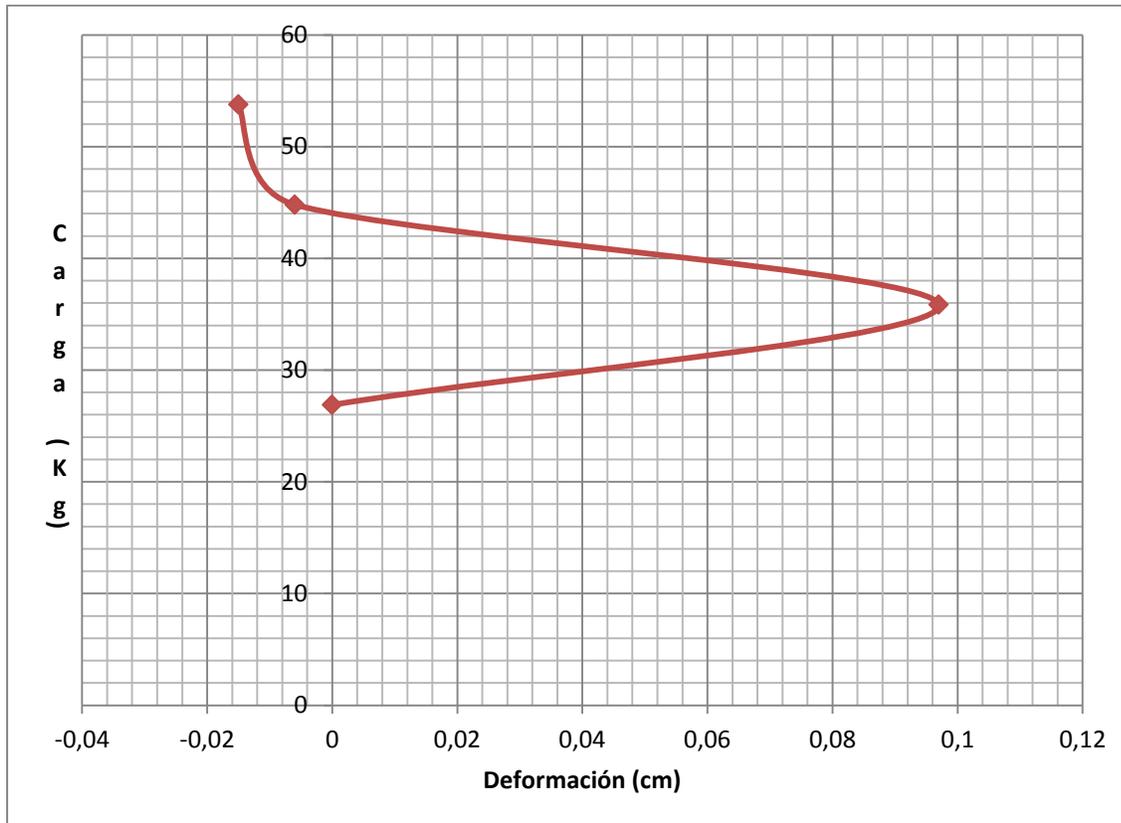
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resultados que sirvieron de base para plotear la curva de carga – deformación**

Carga (kg)	Deformación (cm)
26,94384	0
35,92512	0,097
44,90640	-0,006
53,88768	-0,015

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Gráfica de carga – deformación de la ecocolumna tres



Fuente: elaboración propia.

Se observan deformaciones positivas y negativas. La deformación positiva indica que el elemento evaluado empezó un proceso de deflexión hacia afuera del deformómetro, hasta alcanzar un valor de 35,92 kg. Después de este valor muestra deformaciones negativas, deflactándose hacia adentro del deformómetro. En muchos casos esto se debe a que las partículas, y en este caso, las botellas, al ser comprimidas se acomodan y rellenan los espacios que pudieron haber quedado vacíos. En la gráfica, el valor de carga crítica es de 35,92 kg y corresponde al segundo dato de la tabla XXIII.

3.3.1.2. Ecocolumna formada con botellas de Coca Cola

Secuencia fotográfica que muestra el desarrollo del ensayo y los resultados que de él se obtuvieron al terminar la evaluación de la ecocolumna.

Figura 37. Ecocolumna preparada para el ensayo a compresión



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 38. **Aplastamiento local al aplicar la carga**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Esta figura muestra cómo es que la botella que se encuentra en la parte de arriba de la ecocolumna, comienza a aplastarse, esto debido a la aplicación constante de la carga axial generada por el gato hidráulico.

Figura 39. **Aplastamiento de la botella de arriba**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí se puede apreciar desde otro ángulo, lo que se describe en la figura anterior; al aplicar la carga axial, la botella de arriba comienza a deformarse, esto se debe a que, al encontrarse en la parte de arriba y estar abierta, pues aunque se le coloca el tapón, siempre va a ser la parte más débil y vulnerable del elemento estructural.

Figura 40. **Deformación de la primera botella**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Esta figura muestra cómo es que la botella de arriba, a medida que se continúa aplicando la carga axial generada por el gato hidráulico, sigue aplastándose.

Figura 41. **Aplastamiento de la primera botella de la ecocolumna**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Datos de la ecocolumna de Coca Cola

Altura	=	48 cm
Diámetro	=	6,8 cm
Gato	=	ENERPAC RC53
Área del gato	=	0,99 plg ²
Exactitud del deformómetro	=	0,01 mm
Altura del deformómetro	=	28,5 cm

Tabla XXIV. **Resultados que produjo el ensayo a compresión de la ecocolumna**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro (mm)	
80	9	0
100	7	18
120	6	18
140	17	44

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Resultados que se obtuvieron con el software Excel**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro (mm)		Deformación (mm)	Carga (lb)	Carga (kg)
80	9	0	0	79,2	35,92512
100	7	18	-1,82	99,0	44,90640
120	6	18	-2,82	118,8	53,88768
140	17	44	8,44	138,6	62,86896

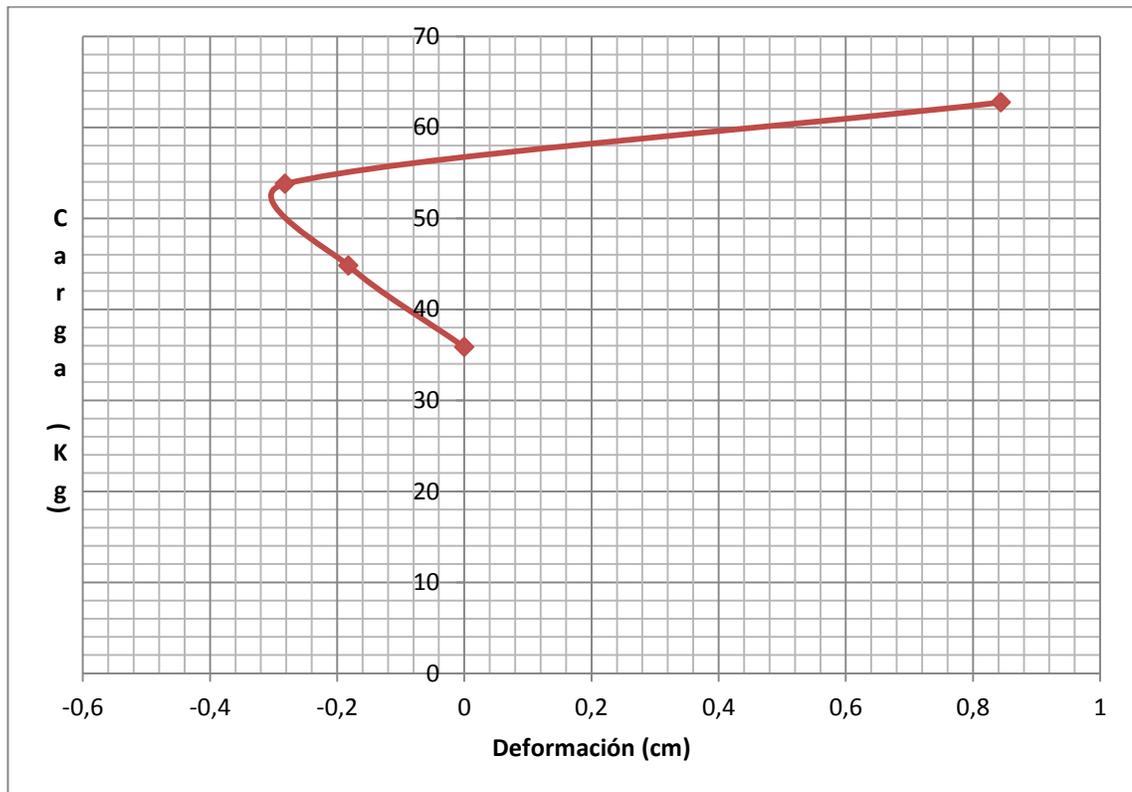
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Resultados que sirvieron para plotear la curva de carga – deformación**

Carga (kg)	Deformación (cm)
35,92512	0
44,90640	-0,182
53,88768	-0,282
62,86896	0,844

Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Gráfica de carga – deformación de ecocolumna de Coca Cola**



Fuente: elaboración propia.

En este caso el elemento comenzó a pandearse hacia adentro del deformómetro, pero después del segundo valor se pandeó hacia afuera. Esto causó una deformación positiva producto de un acomodo de sus partículas. Puede observarse que el valor de carga crítica es igual a 44,91 kg, y corresponde al segundo dato de la tabla XXVI.

Una vez obtenidos todos los datos de carga crítica de cada ecocolumna, se les listó de acuerdo con el orden en que se obtuvieron (tabla XXVII), y se les cotejó con el valor de carga crítica teórica.

Tabla XXVII. **Valores de carga crítica de cada ecocolumna ensayada**

Ecocolumna	Carga (Kg)
1	26,94
2	44,91
3	26,94
4	26,94
5	35,92
6	35,92
7	44,91

Fuente: elaboración propia.

Los cálculos presentados en el principio de este capítulo dan un valor de carga crítica teórica de 548,86 kg. Los valores que se obtuvieron en los ensayos son mucho menores que el valor esperado, en consecuencia, se procedió a la revisión de los cálculos para determinar si hubo algún error.

Luego de revisar paso por paso los cálculos, y no detectar ningún error, se concluyó que el valor de módulo de elasticidad del material empleado es demasiado grande y se decidió cambiarlo por uno mucho menor. Para el efecto se trabajó con botellas de Polietileno de baja densidad ya que el módulo de elasticidad de este material, según la tabla III, es de 40 000 psi. Con la inserción del nuevo valor la ecuación quedó así:

$$E = 40\,000 \text{ psi}$$
$$E = 2\,812,29 \text{ kg/cm}^2$$

Ecuación de carga crítica de Euler:

$$P_c = \frac{2\,812,29 * 3,65550 * \pi^2}{52,65824^2}$$
$$P_c = 36,59084 \text{ kg}$$

Entonces, el nuevo valor de carga crítica teórica es igual a 36,6 kg, y en los datos que aportan los ensayos se observa que los resultados se aproximan al valor que se debe obtener, según la fórmula de Euler. De esto se deduce que las ecocolumnas sí cumplen con las condiciones necesarias para ser consideradas como elementos estructurales.

Seguidamente, una vez obtenidos los resultados de carga de una ecocolumna, se procede a determinar el valor de carga en conjunto, como un panel, puesto que este es el objetivo del presente trabajo de graduación: crear ecopaneles prefabricados.

Para lograr este propósito, primero se ensayó, a compresión, un panel sencillo elaborado con botellas de Coca Cola, y sin ningún refuerzo, como se muestra en las imágenes que siguen. Posteriormente se efectuará el análisis de los resultados que se obtuvieron en el experimento.

Figura 43. Montaje del ecopanel de botellas para ser ensayado a compresión



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 44. Ensayo a compresión de ecopanel



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 45. **Aplastamiento de las botellas de arriba**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta imagen se aprecia cómo es que, a medida que se va aplicando la carga con el gato hidráulico, las botellas de arriba comienzan a sufrir un aplastamiento; como se mencionó con anterioridad, esto se debe a que al estar cortadas y abiertas las botellas, se vuelven más frágiles y vulnerables, por lo que es necesario colocarles el tapón para evitar que se aplasten con mayor facilidad.

Figura 46. **Deformación de las botellas de arriba**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Como se puede observar, el principal problema de las ecocolumnas es la débil resistencia a la compresión que muestran las botellas ubicadas en la parte superior de dicho elemento estructural. La imagen es contundente al evidenciar la debilidad de la que se está hablando, pues, mientras las botellas de arriba se aplastan, el resto del elemento no presenta ningún tipo de deformación.

Figura 47. **Compresión en las botellas de la base del ecopanel (marcado con negro)**



Fuente: CII, sección de Estructuras.

Una vez de que las botellas de arriba se han aplastado y acomodado, el resto del elemento comienza a trabajar. Es entonces cuando se observan deformaciones como las que están marcadas en la parte inferior de la imagen: las botellas de abajo comienzan a ser aplastadas debido a la aplicación constante de la carga.

Figura 48. **Aplastamiento de la base del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta figura se puede apreciar de mejor manera lo que se menciona en la imagen anterior, al sufrir un acomodo el resto de las botellas, la carga comienza a distribuirse uniformemente, provocando que la parte más débil del panel comience a aplastarse, en este caso son las botellas de la base.

Figura 49. **Aplastamiento local por la aplicación de la carga**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí se ve, cómo es que después de continuar aplicando la carga axial con la ayuda del gato hidráulico, nuevamente las botellas de arriba comienzan a sufrir deformaciones mayores, causando que se vean tal y como se muestran en la imagen.

Datos:

Altura	=	48 cm
Ancho	=	49 cm
Gato	=	ENERPAC RC102 de 10 toneladas
Área del gato	=	2,24 plg ² = 14,45 cm ²
Exactitud del deformómetro	=	0,01 mm
Altura del deformómetro	=	28,5 cm

Tabla XXVIII. **Resultados obtenidos en el ensayo a compresión del ecopanel de botellas**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro (mm)		Observaciones
0	7	0	
100	7	72,5	
150	7	46,0	
200	6	93,0	
250	6	93,0	
300	6	93,0	Se comprimieron las botellas de arriba
350	6	93,0	
1 0000			Carga última soportada por el elemento

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Resultados obtenidos utilizando el software Excel**

Esfuerzo (PSI)	Deformómetro (mm)		Deformación (mm)	Carga (lb)	Carga (Kg)
0	7	0	0	0	0
100	7	72,5	0,725	224	101,6064
150	7	46,0	0,460	336	152,4096
200	6	93,0	-0,070	448	203,2128
250	6	93,0	-0,070	560	254,0160
300	6	93,0	-0,070	672	304,8192
350	6	93,0	-0,070	784	355,6224
1 0000				22 400	10 160,6400

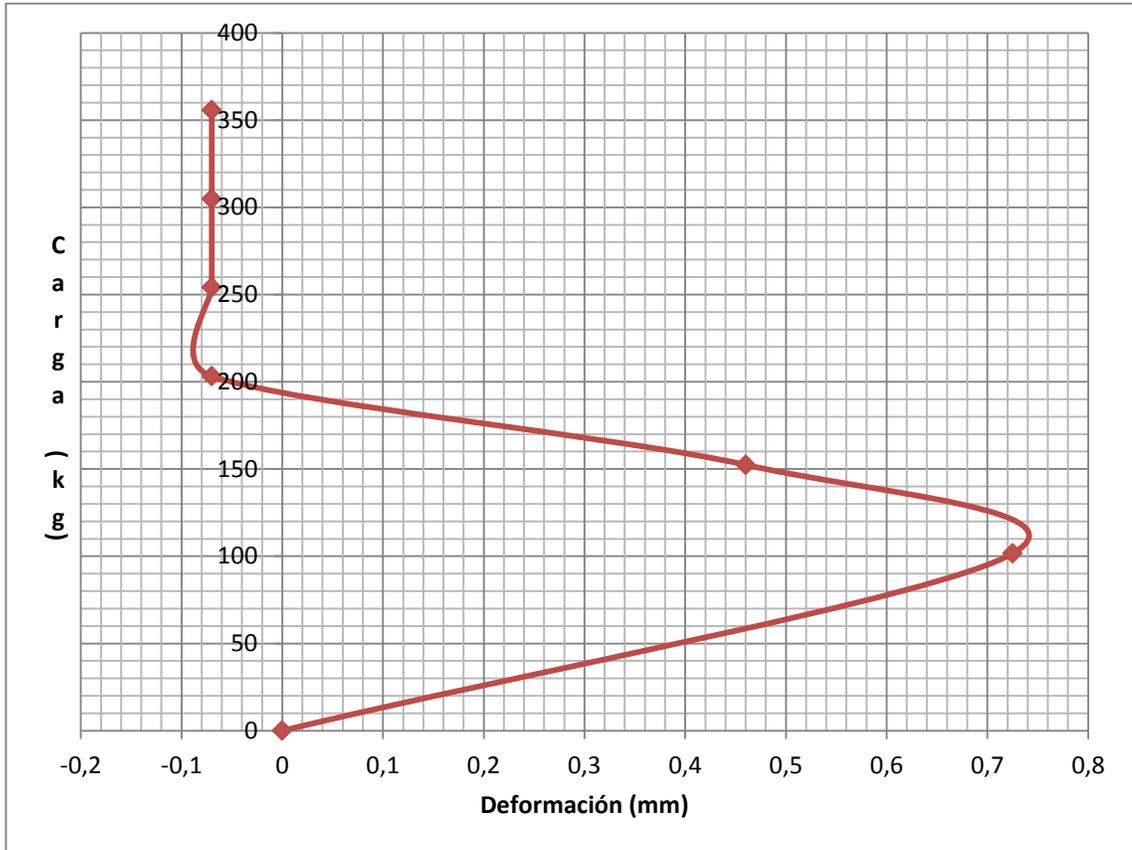
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Resultados que sirvieron para plotear la curva de carga – deformación**

Carga (Kg)	Deformación (mm)
0	0
101,6064	0,725
152,4096	0,460
203,2128	-0,070
254,0160	-0,070
304,8192	-0,070
355,6224	-0,070
10 160,6400	

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Gráfica de carga – deformación del ecopanel de botellas**



Fuente: elaboración propia.

Las deformaciones positivas y negativas son el resultado de un acomodo de las botellas al aplicarles una carga axial. Esto significa que las botellas llenan los espacios vacíos existentes. La gráfica muestra cómo el ecopanel empezó a deformarse positivamente antes de superar el valor de carga de 101,61 kg. Después de este valor sufrió deformaciones negativas hasta alcanzar el valor de 203,21 kg. Más allá de este valor, el ecopanel no sufrió más pandeo por lo que su deformación continuó siendo la misma a pesar de seguir soportando los esfuerzos de compresión aplicados por el gato hidráulico.

Para efectos de cálculo, el valor de carga que interesa es el de 101,61 kg, ya que después de este, la gráfica pierde su linealidad.

3.4. Ecopanel prefabricado

De acuerdo con los cálculos elaborados, el elemento estructural ecocolumna debe tener una altura menor o igual a 0,52 m. Por tal razón, al construir un ecopanel con ferrocemento se le deben asignar las dimensiones que se obtuvieron de los cálculos realizados. Sin embargo, a fin de determinar la posibilidad de trabajar paneles con dimensiones mayores, se decidió experimentar con un ecopanel de dimensiones 0,51 x 0,515 x 0,10 m y probarlo a compresión. Se colocaron dos deformómetros: uno a $L/2$ y otro a $L/3$. Esto se hizo para determinar su resistencia y sustentar la posibilidad de construir ecopaneles de dimensiones mayores.

El ensayo también sirvió para demostrar que la proporción 1:2 que se selecciono para el mortero es adecuada, pues garantiza una buena resistencia a compresión y un buen nivel de impermeabilidad, la cuál es importante en vista de que la malla de gallinero es muy susceptible a la corrosión por humedad. Con esta proporción de mortero se logra darle a la malla, y al panel, un tiempo de vida útil más prolongado, que beneficiará, indudablemente, a las personas de escasos recursos para la construcción de viviendas.

3.4.1. Datos del ecopanel prefabricado

Altura	=	0,515 m
Ancho	=	0,51 m
Espesor	=	0,10 m
Proporción de la mezcla	=	1:2
Malla de gallinero	=	1/2 plg.

A continuación se presenta una secuencia fotográfica del desarrollo del ensayo con el ecopanel. Luego, mediante tablas específicas diseñadas por el graduando ponente, se exponen la información acumulada y los resultados que se concretaron.

Figura 51. **Ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 52. Interior de un ecopanel prefabricado



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La fotografía muestra el interior de un ecopanel terminado, para que se observe lo siguiente: a) la forma como quedan integradas las botellas dentro del sistema, y b) el acabado final, que evidencia su correcta construcción.

Figura 53. **Ecopanel prefabricado y cortado en la parte de arriba para mostrar su interior**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí se puede apreciar desde otro ángulo, cómo es que debe quedar el ecopanel prefabricado y cómo es que quedan integradas las botellas dentro del recubrimiento de mortero y malla de gallinero.

Figura 54. **Ecopanel prefabricado puesto en la máquina universal para ser evaluado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Para determinar si es posible construir los ecopaneles prefabricados con dimensiones mayores, es necesario determinar cuál es el comportamiento que tiene un panel con las dimensiones calculadas; por eso es que se usa la máquina universal, para ensayar a compresión este panel, y con los datos obtenidos del ensayo, determinar cuál es su comportamiento estructural.

Figura 55. **Deformómetro colocado al centro del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Se coloca un deformómetro a $L/2$ del panel; esto es necesario para poder determinar de qué manera se comporta el sistema como tal, esto significa, ver cómo es que las botellas, junto con la malla de gallinero y el mortero, funcionan bajo la acción de una carga de compresión continua.

Figura 56. **Deformómetro colocado a L/3 del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

De igual manera, se coloca un segundo deformómetro, solo que este se encuentra ubicado a L/3 del panel; esto se hace con la intención de determinar si el panel sufre algún tipo de deflexión diferente a la esperada.

Figura 57. **Primera grieta del ecopanel al ser ensayado a compresión**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 58. **Grieta horizontal en la parte superior del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Este tipo de grieta aparece porque, al aplicar la carga uniformemente distribuida, las botellas comienzan a aplastarse, al igual como se mostró en figuras anteriores, donde la botella de arriba de la ecocolumna comenzaba a aplastarse. Al fallar la botella, comienza a trabar el mortero, causando que aparezcan grietas o fisuras como la que se muestra en la figura.

Figura 59. **Agrietamiento en un costado del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 60. **Múltiples grietas en el ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta imagen se puede ver cómo es que el mortero que constituye el recubrimiento, comienza a fracturarse, causando que se desprendan partes del recubrimiento y comience a fallar el panel.

Figura 61. **Aplastamiento de la esquina inferior izquierda del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 62. **Agrietamiento y descascaramiento del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí se ve cómo es que comienzan a desprenderse partes del recubrimiento de mortero, afectando de manera considerable la seguridad estructural del panel; estas grietas se deben a que las botellas comienzan a ceder ante los esfuerzos de compresión aplicados por la máquina universal.

Figura 63. **Ensanchamiento de la grieta en un costado del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 64. **Ecopanel después de dejar de aplicarle carga**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 65. **Parte superior del ecopanel después de descargar la máquina universal**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí se ve cómo queda el ecopanel prefabricado al terminar el ensayo y descargar la máquina universal; se aprecia que existen grietas iguales al ancho del recubrimiento e inclusive se observa cómo es que se desprendió una parte del recubrimiento. También se ven las grietas que aparecieron a un costado, en la mitad del panel; estas son causadas porque las caras frontales tratan de separarse con la aplicación de carga uniforme.

Figura 66. **Ecopanel una vez terminado el ensayo**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

A pesar de que, se aprecia una gran cantidad de fracturas en el mortero, e inclusive partes de este que se han desprendido, el panel mantiene su forma; es obvio que este tipo de ensayos se practican para llevar al elemento en cuestión hasta su condición más crítica y ver cómo es que se comporta, por lo tanto, y según como se observa en la imagen, el ecopanel dio buenos resultados, conservando siempre su integridad estructural.

Tabla XXXI. **Resultados obtenidos del ensayo a compresión del ecopanel**

Carga (lb)	Deformómetro				Observaciones
	L/2		L/3		
0	4	0	4	0	
3 000	4	15	3	76,50	
3 000	4	16	3	77,50	
6 000	4	19	3	78,25	
9 000	4	19	3	81,00	
12 000	4	17	3	84,00	
15 000	4	15	3	89,00	Primera grieta
17 000	4	12	3	97,50	Grieta horizontal
18 000	4	12	4	2,00	
21 000	4	12	4	11,50	
24 000	4	15	4	25,00	Descascaramiento
25 000	4	23	4	34,00	
26 000	4	40	4	50,00	
26 500					Carga última

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Resultados que se obtuvieron con el software Excel**

L/2	25,750	cm
L/3	17,170	cm
Área bruta	510,000	cm ²
Área neta	255,782	cm ²

Carga (lb)	Carga (kg)	Deformómetro (plg)		Deformación (cm)	
		L/2	L/3	L/2	L/3
0	0	0	0	0	0
3 000	1 360,77710	0,015	-0,02350	0,0381	-0,0597
3 000	1 360,77710	0,016	-0,02250	0,0406	-0,0572
6 000	2 721,55420	0,019	-0,02175	0,0483	-0,0552
9 000	4 082,33130	0,019	-0,01900	0,0483	-0,0483
12 000	5 443,10830	0,017	-0,01600	0,0432	-0,0406
15 000	6 803,88540	0,015	-0,01100	0,0381	-0,0279
17 000	7 711,07020	0,012	-0,00250	0,0305	-0,0064
18 000	8 164,66250	0,012	0,00200	0,0305	0,0051
21 000	9 525,43960	0,012	0,01150	0,0305	0,0292
24 000	10 886,21670	0,015	0,02500	0,0381	0,0635
25 000	11 339,80910	0,023	0,03400	0,0584	0,0864
26 000	11 793 40140	0,040	0,05000	0,1016	0,1270
26 500	12 020,19760				

Continuación de la tabla XXXII.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación unitaria (cm/cm)	
		L/2	L/3
Área bruta	Área neta		
0	0	0	0
2,66819	5,32007	0,00148	-0,00348
2,66819	5,32007	0,00158	-0,00333
5,33638	10,64013	0,00188	-0,00322
8,00457	15,96019	0,00188	-0,00281
10,67276	21,28026	0,00168	-0,00237
13,34095	26,60032	0,00148	-0,00162
15,11974	30,14704	0,00118	-0,00037
16,00914	31,92039	0,00118	0,00029
18,67733	37,24046	0,00118	0,00170
21,34552	42,56052	0,00148	0,00369
22,23492	44,33388	0,00227	0,00503
23,12432	46,10723	0,00396	0,00739
23,56901	46,99391		

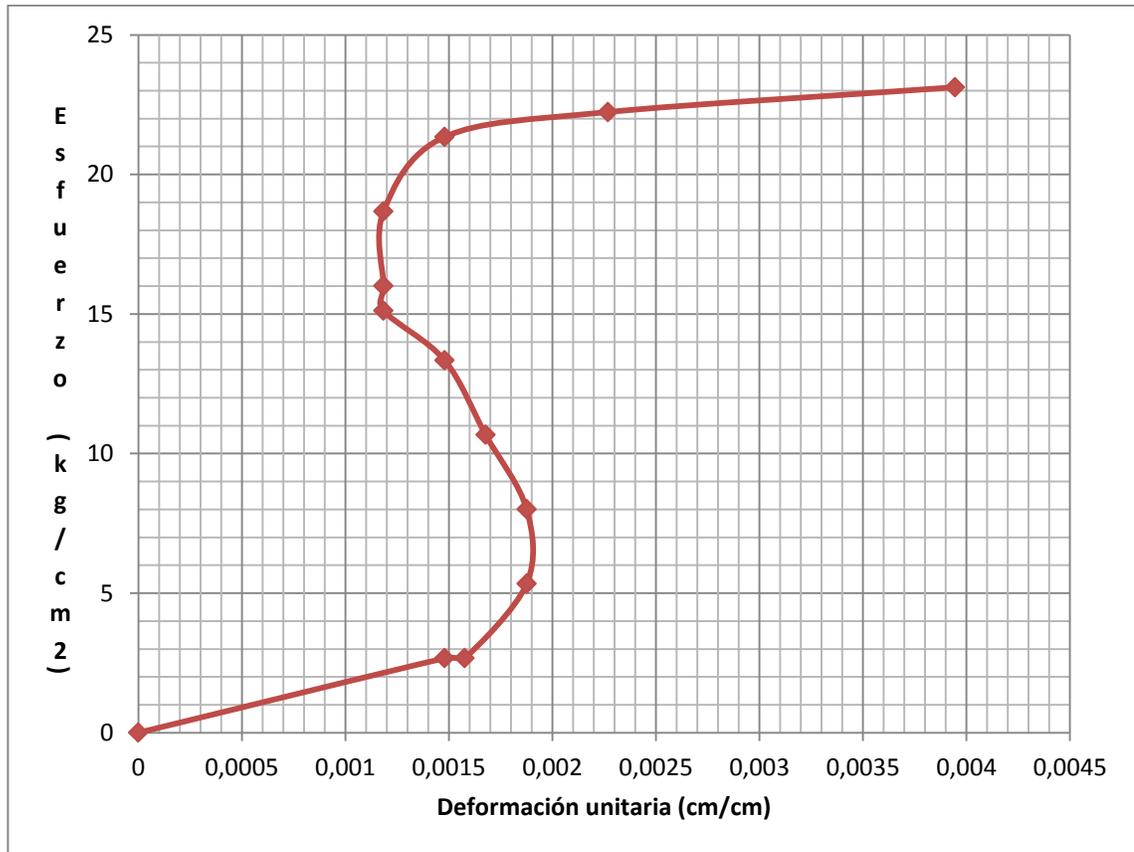
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Resultados que se usaron para plotear la curva de esfuerzo – deformación**

Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación unitaria (cm/cm)	
		L/2	L/3
0	0	0	0
2,66819	5,32006	0,00148	-0,00348
2,66819	5,32006	0,00157	-0,00333
5,33638	10,64013	0,00187	-0,00321
8,00457	15,96019	0,00187	-0,00281
10,67276	21,28026	0,00167	-0,00236
13,34095	26,60032	0,00147	-0,00162
15,11974	30,14704	0,00118	-0,00037
16,00914	31,92039	0,00118	0,00029
18,67733	37,24046	0,00118	0,00170
21,34552	42,56052	0,00147	0,00369
22,23491	44,33388	0,00226	0,00503
23,12431	46,10723	0,00394	0,00739
23,56901	46,99391		

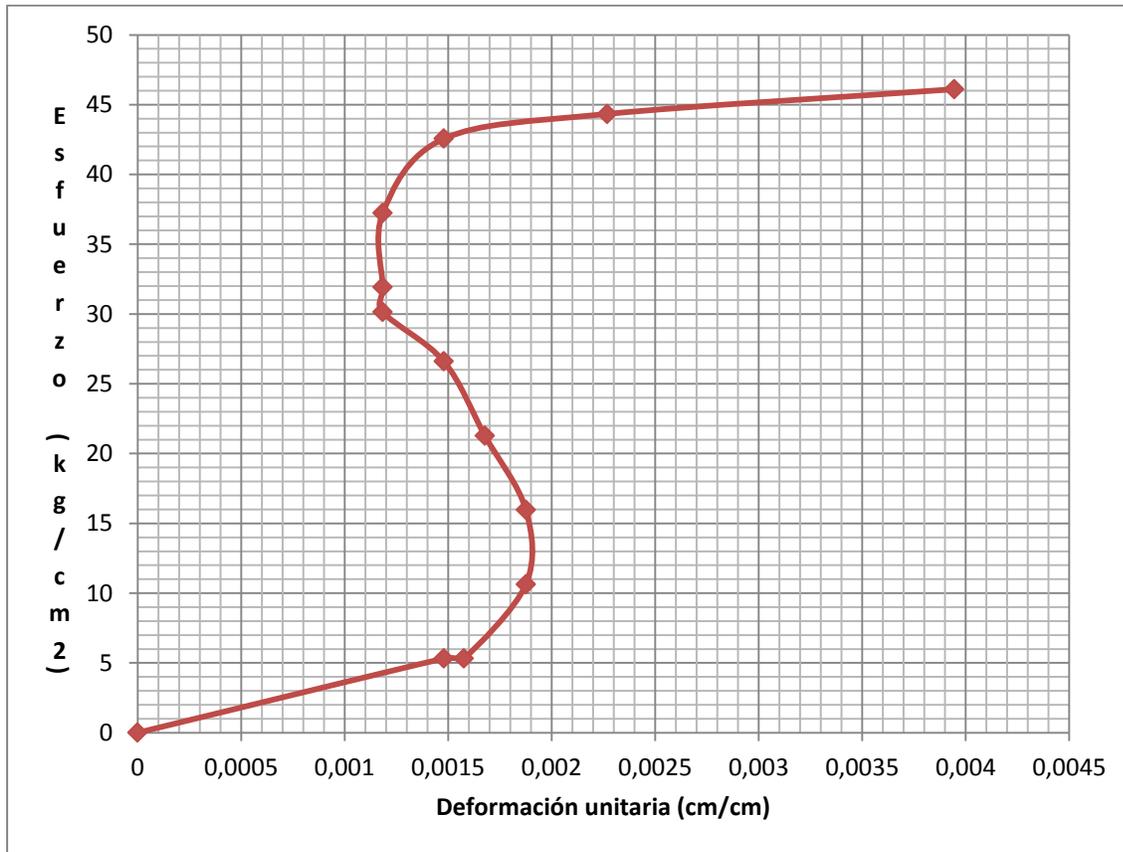
Fuente: elaboración propia.

Figura 67. Curva de esfuerzo bruto – deformación L/2



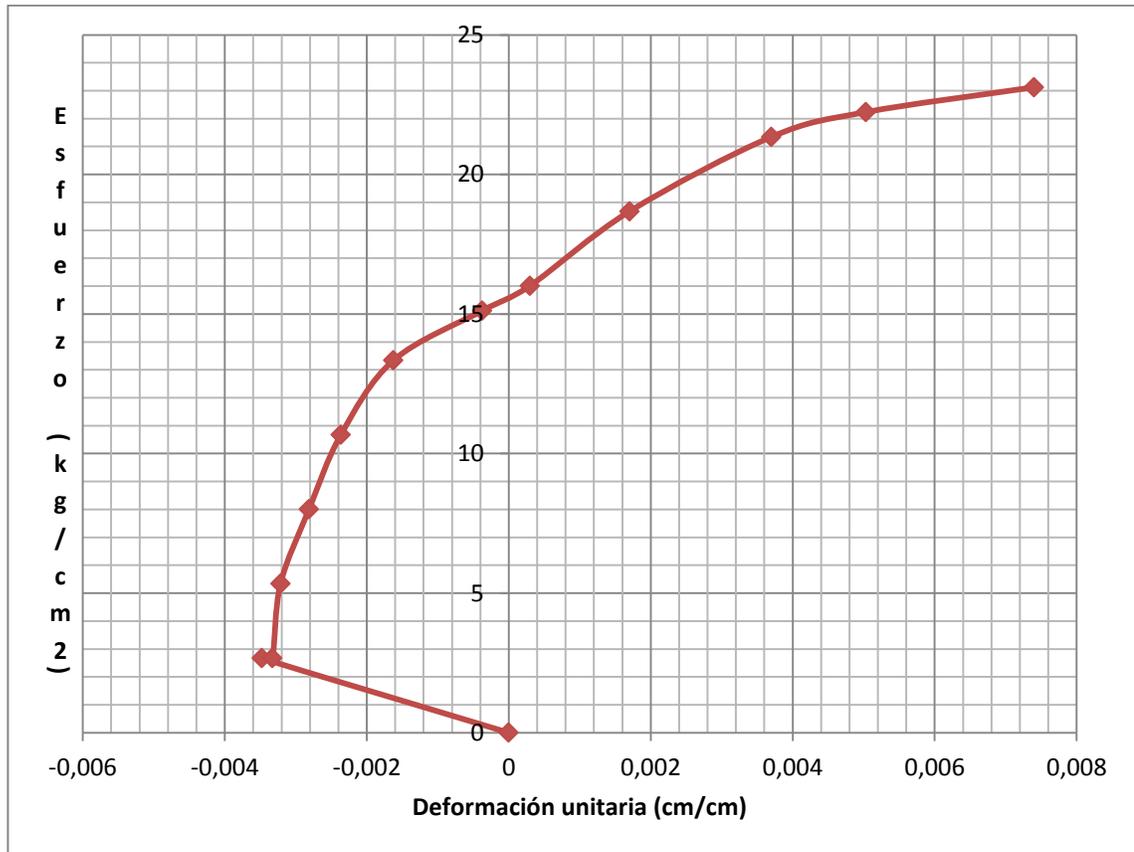
Fuente: elaboración propia.

Figura 68. Curva de esfuerzo neto – deformación L/2



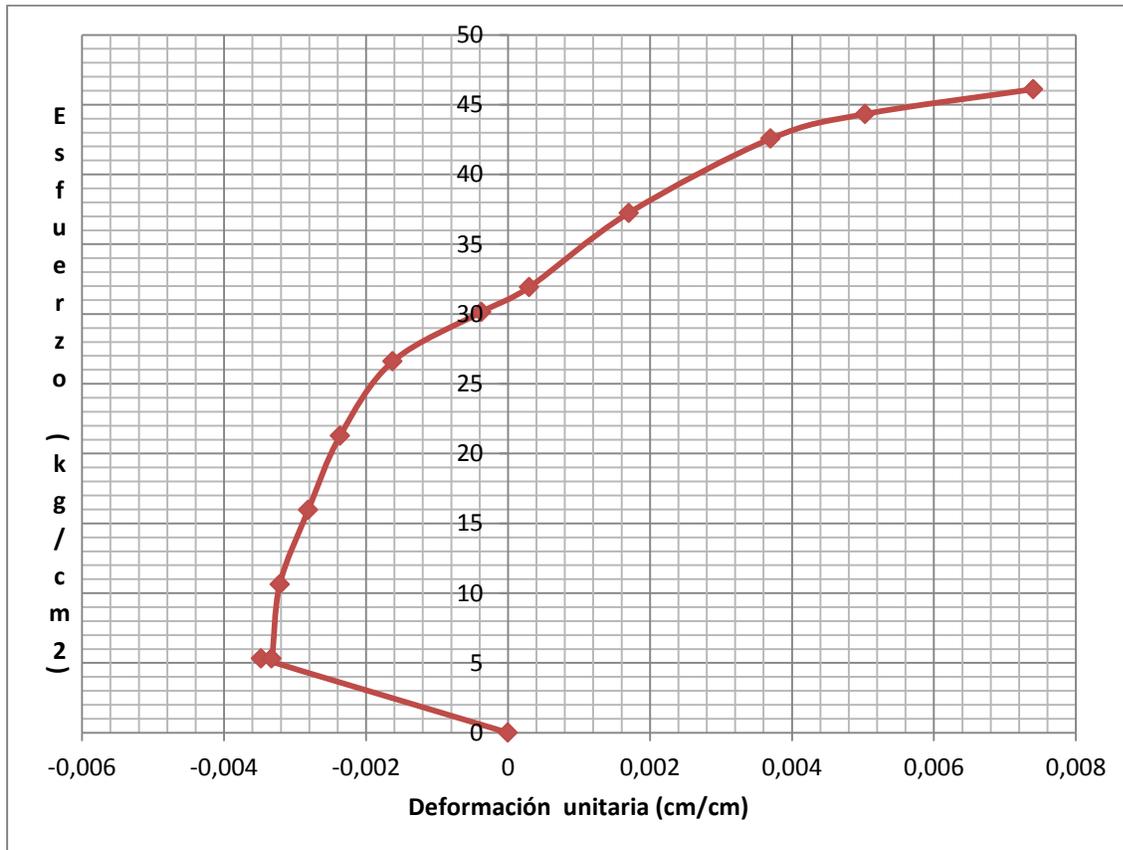
Fuente: elaboración propia.

Figura 69. Curva de esfuerzo bruto – deformación L/3



Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Curva de esfuerzo neto – deformación L/3**



Fuente: elaboración propia.

Los resultados que se registraron, y las curvas que con estos se proyectaron, son premisas que llevan a la conclusión de que sí es posible fabricar los ecopaneles con dimensiones mayores a las establecidas por los cálculos de las ecocolumnas.

En este caso, el valor del esfuerzo último sobre área neta es de 46,99 kg/cm², y el de la primera grieta es de 26,60 kg/cm². Estos valores confirman que para ser un bloque con revestimiento de mortero de 1,5 cm de espesor, con

maya de gallinero de media pulgada, además de tener en su interior columnas hechas con botellas de plástico, son valores mucho más elevados que los esperados.

Finalmente, como su deformación fue mínima ante valores de carga elevados, queda demostrado que sí cumple con las expectativas de resistencia y trabajabilidad necesarias para generar seguridad. De lo expuesto se deduce que sí es posible construir ecopaneles prefabricados con dimensiones superiores a las utilizadas para este pequeño bloque.

En el siguiente capítulo se someterán a estudio los procedimientos que ayudan a construir los ecopaneles prefabricados, usando dimensiones mayores a las utilizadas en el panel ensayado a compresión.

4. PROCEDIMIENTO PARA CONSTRUIR UN ECOPANEL PREFABRICADO CON DIMENSIONES DE 1,20x0,58x0,10 METROS

En el capítulo anterior se demostró que sí es posible construir ecopaneles con dimensiones mayores, pero primero se debe determinar un tamaño que se adapte al tipo de material que se emplea y a las especificaciones ordinarias vigentes en la construcción. Particularmente, porque se deben preparar los moldes con las medidas de los ecopaneles que se construirán.

Con el acompañamiento del ingeniero Corzo se examinaron las diferentes opciones para el tamaño de los ecopaneles. Finalmente, las dimensiones ideales quedaron determinadas y se pasó, entonces a la planeación del proceso para la construcción de los ecopaneles que posteriormente fueron sometidos a un proceso de evaluación.

Las medidas acordadas son las siguientes: altura, 1,20 m; espesor, 0,10 m; ancho, 0,60 m. Para determinar la altura se consideró que al colocar un ecopanel encima del otro se alcanzan los 2,40 m, que es la altura para muros más utilizada en la construcción. El espesor se determinó en 0,10 m debido a que las botellas plásticas utilizadas son de 0,068 m de diámetro más 0,015 m de recubrimiento a cada lado, lo cual suma en total 0,10 m aproximadamente.

El ancho del panel se determinó en 0,60 m, sin embargo, al hacer la modulación de las botellas y el recubrimiento, el ancho únicamente alcanzó 0,58 m por lo que se decidió trabajar con esta medida. Se construyeron 12

ecopaneles prefabricados que posteriormente fueron probados a compresión, corte, flexión e impacto, 28 días después de su fabricación.

El nombre: ecopaneles prefabricados, está ligado a la idea de armar los ecopaneles en un lugar distinto al de la construcción y, posteriormente, acudir únicamente a colocarlos en sus respectivos lugares, de este modo, en cuestión de días se puede contar con los muros de una casa.

El proceso para construir un ecopanel prefabricado es sumamente sencillo si se siguen los pasos que se muestran a continuación.

4.1. Paso 01: Molde de madera para hacer la fundición de los ecopaneles

En el proceso de la construcción de ecopaneles se necesita contar con uno o varios moldes. En el experimento que se describe en este informe se contó solamente con uno debido a la falta de espacio y de la necesaria mano de obra para fabricar los ecopaneles en conjunto. El molde que se usó en este experimento fue elaborado por el encargado del área de prefabricados, señor Fabio Sánchez, quien también tuvo a su cargo el acondicionamiento del lugar de trabajo para adaptarlo al tamaño del molde.

Se trabajó con un molde desarmable de cuatro piezas, unidas por tornillos y tuercas, que se pueden separar para hacer más fácil el desencofrado del ecopanel. La plancha de concreto sobre la que se fundieron los paneles cuenta con topes que evitan que el marco se mueva durante la fundición.

4.2. Paso 02: Construcción de las ecocolumnas

Para construir el ecopanel con las dimensiones que se indican en el encabezado de este capítulo se necesitan ocho ecocolumnas y se sigue el procedimiento descrito anteriormente, adecuándolo al tipo de botella que se utilice. Por tal razón, antes de comenzar la construcción debe hacerse una exploración del medio circundante para saber con que tipo de botellas se cuenta, a fin de seleccionar el que mejor se adapte a los propósitos del proyecto. Para el presente caso se tuvo a la disposición botellas de Coca Cola, agua pura Salvavidas, Aqua, Raptor, Pepsi, Tiky, 7 Up, Orange Crush.

Figura 71. **Proceso de selección de botellas plásticas**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Para la fabricación de las ecocolumnas se puede trabajar con cualquier tipo de botella siempre que cumpla con la condición fundamental: que los envases se puedan incrustar uno dentro del otro y que sea posible rellenarlos con basura inorgánica, limpia y seca.

Una vez que se efectúa la selección y la recolección de envases, se procede al armado de las ecocolumnas. El ecopanel objeto de este estudio tiene una altura de 1,20 m, pero como las ecocolumnas no pueden ser todas del mismo alto porque se les debe aplicar un recubrimiento de ferrocemento en la parte superior e inferior, para los efectos de este estudio tienen alturas que oscilan entre 1,15 a 1,17 m; dependiendo del tipo de botella que se utilizó en su fabricación.

Trabajando con botellas de Coca Cola son necesarias 17 unidades para conseguir una altura de 1,16 m. En este sentido, es importante recordar que la altura dependerá de qué tan bien medidas estén las botellas unas dentro de las otras.

De igual manera, para elaborar una ecocolumna con botellas de la marca Salvavidas (agua pura, Tiky, Orange Crush, 7 Up), Raptor, Aqua, se necesitan ocho botellas. Esto se debe a que su forma es diferente a la de las de Coca Cola, y por lo mismo, se emplean menos botellas para alcanzar la altura de 1,17 m. Cabe señalar que aunque al armar las ecocolumnas se empleen botellas de diferente marca, esto no ocasiona ningún problema porque el diseño de los envases es igual, o similar, lo cual permite que, al colocarlos uno dentro del otro, encajen a la perfección. Una vez terminada la fabricación de las ecocolumnas quedaron de la siguiente manera.

Figura 72. **Ecocolumnas de 1,17 m de altura**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

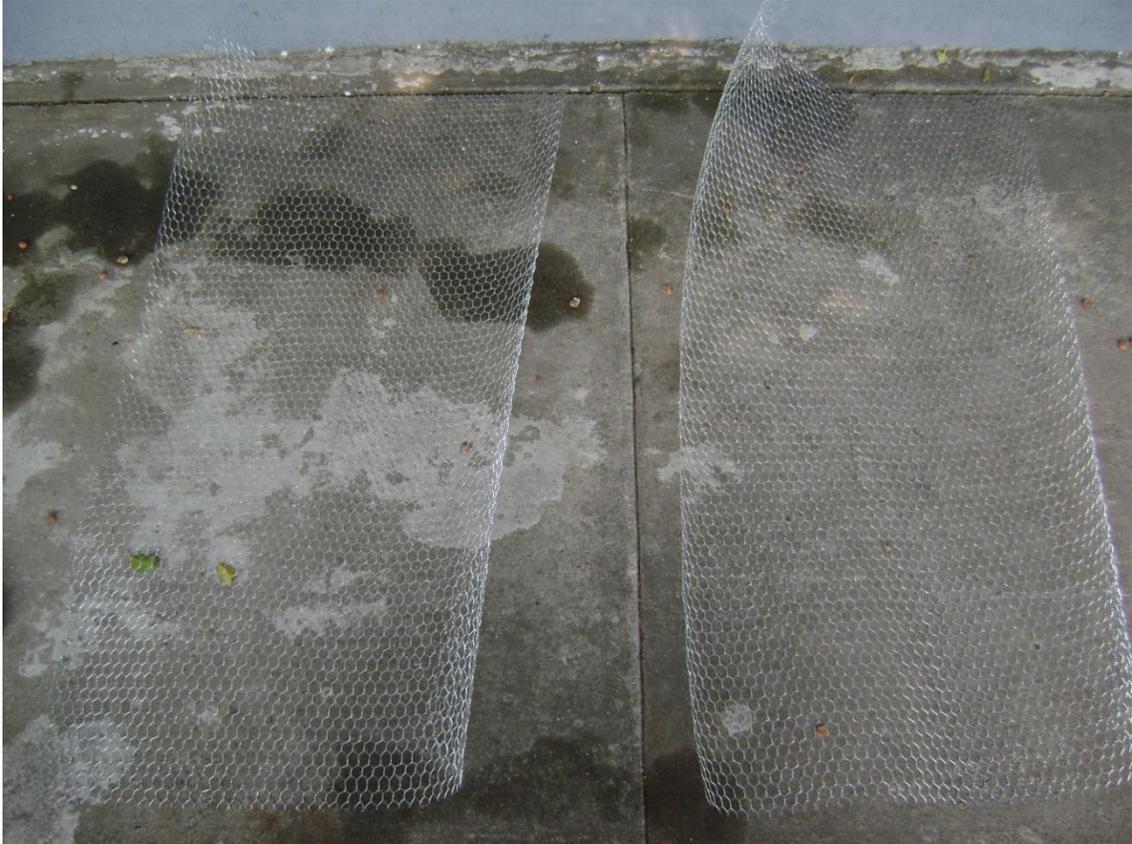
Para construir doce ecopaneles prefabricados se necesitan 96 ecocolumnas. Se pueden armar primero todas las ecocolumnas y tenerlas almacenadas en espera del momento para emplearlas o, como se hizo en este ensayo, en una semana se fabricaron las ecocolumnas necesarias para tres ecopaneles que posteriormente fueron fundidos. A la semana siguiente se repitió el mismo procedimiento y se continuó así sucesivamente hasta completar los doce ecopaneles prefabricados. Se procedió de esta manera porque en el área de trabajo sólo se tuvo espacio para la construcción simultánea de dos ecopaneles, y únicamente se contó con un marco.

4.3. Paso 03: Revestimiento con malla de gallinero de media pulgada

Los ecopaneles no se pueden construir sólo con las botellas y el mortero. Por tal razón surge la necesidad de un tercer material: la malla de gallinero. Esta cumple triple función: a) Actúa como un marco que le da forma al panel, b) Sostiene el mortero en estado fresco, y c) Evita que el panel se abra al ser sometido a carga axial.

Para preparar el marco con la malla de gallinero se procede de la siguiente manera: a) Se cortan dos lienzos de malla, con las medidas del panel, más unos cinco centímetros extra en cada lado, arriba y abajo, b) Las pestañas que se forman con los centímetros extra que se dejan en cada lado de los lienzos de malla, se doblan alrededor de las ecocolumnas, c) Se colocan los lienzos por debajo y por encima de las ecocolumnas, y d) Los lienzos de malla se entretejen para que queden seguros y no se desprendan.

Figura 73. Lienzo de malla de gallinero



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

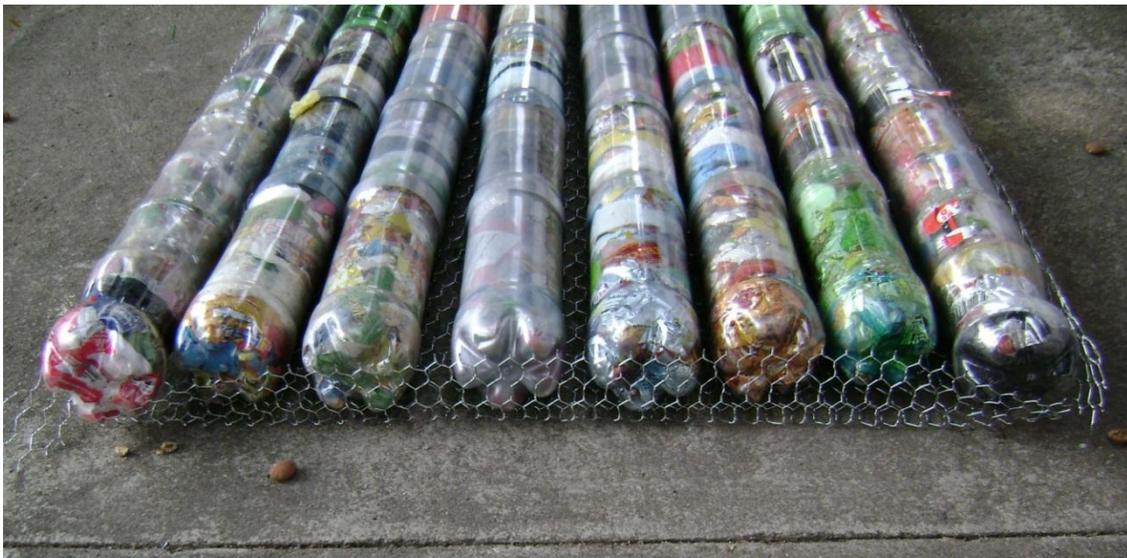
Tal y cómo se aprecia en la figura, fueron cortados los lienzos de malla de gallinero que se usaron para colocar alrededor de las ecocolumnas; estos lienzos ya tienen agregados los centímetros extras que serán doblados para formar una especie de cajón de malla y colocar dentro las ecocolumnas.

Figura 74. **Doblecetes necesarios en los lienzos de malla de gallinero**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 75. **Doblecetes de las orillas de la malla**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 76. **Forma de colocar las ecocolumnas dentro de la malla de gallinero**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

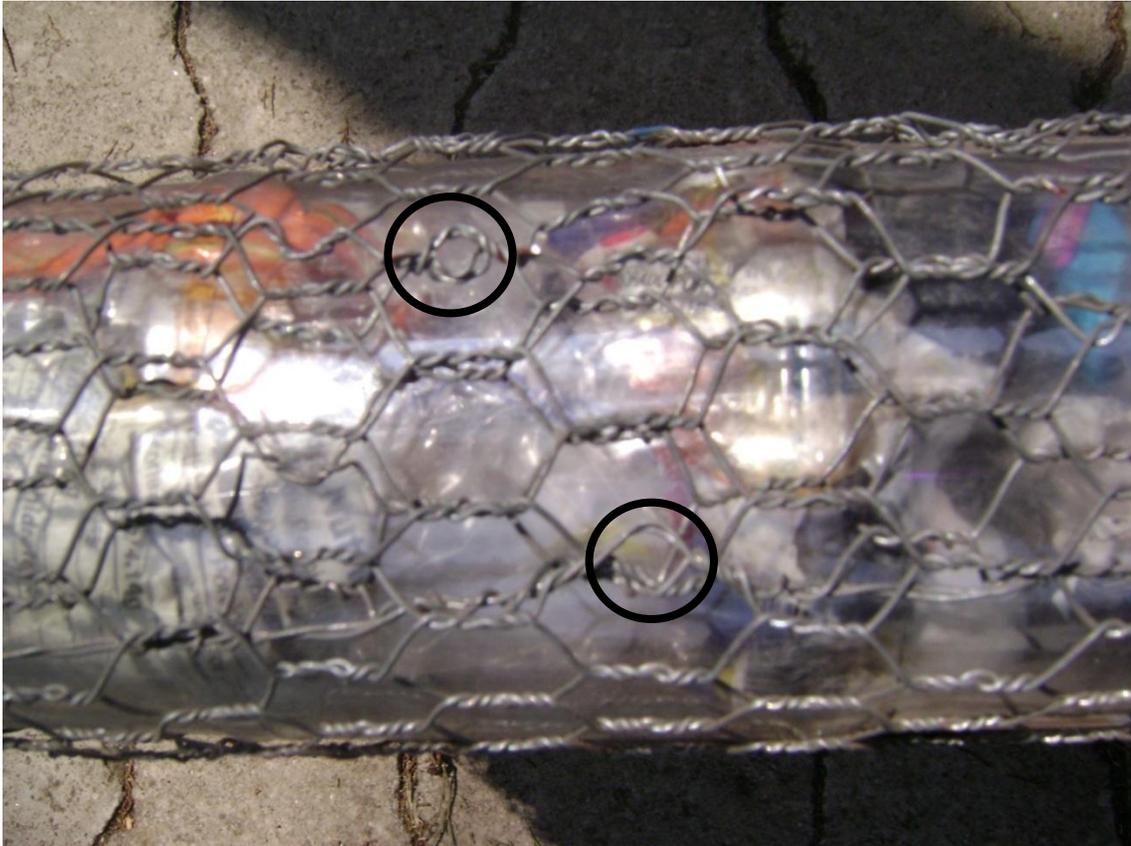
Una vez que se ha cumplido con la primera fase, y antes de colocarle encima el otro lienzo de malla de gallinero, se sitúan unos tapones de botella en medio del panel para producir entre las ecocolumnas un espacio vacío de aproximadamente 1,5 centímetros. Este espacio vacío cumple la función de un “nervio” que le brinda una mayor resistencia al panel. Luego se acomoda el otro lienzo de malla de gallinero y, con el auxilio de un gancho con punta, se entreteje con el lienzo que se encuentra abajo para que esté seguro y no se abra ni se desprenda. En la siguiente secuencia fotográfica se muestra la forma como debe hacerse el entretrejido de la malla de gallinero.

Figura 77. **Entretrejido de la malla utilizando un gancho con punta**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 78. La malla, después de entretejerla



Fuente: CII, Sección de Estructuras,

Cuando se concluye con el entretejido de la malla, en medio del “nervio” se coloca un *joist* de alambre galvanizado, calibre 1,45 mm. Con esto se logra que el ecopanel adquiera una mayor resistencia y que no se abra por el frente cuando se le somete a esfuerzos de carga. También se ubica sobre toda la superficie del panel una especie de ganchos que sujetan en mejor forma la malla para que esté pareja y no se produzcan bolsas que resalten del recubrimiento de mortero.

En la figura 79, mediante un diagrama producido con el programa *AutoCad*, se muestra la forma como debe colocarse el *joist*.

Figura 79. **Representación del armado del *joist* de alambre galvanizado**



Fuente: elaboración propia.

La línea roja representa el alambre que hace el recorrido de un extremo al otro y que, al llegar al extremo opuesto, da la vuelta y regresa al punto de inicio para ser tensado y amarrado. Las flechas muestran la dirección del movimiento.

Figura 80. **Joist de alambre dentro del “nervio”**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta imagen se observa el “joist” que, en línea horizontal, va de un extremo a otro en medio del “nervio”, en la parte central de la ecocolumna. En el extremo derecho del espacio vacío resalta un tapón de color azul. Es importante hacerlo procurando que quede de la misma forma en que se aprecia en la figura 79.

Figura 81. **Joist de alambre que va de un extremo al otro del “nervio”**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Al llegar al extremo opuesto de donde se empezó a hacer el *joist*, no hay que cortar el alambre galvanizado, simplemente se pasa al otro lado y se repite el mismo proceso de elaboración del *joist*, hasta llegar al extremo donde se inició; al estar las dos puntas en el mismo lado, se amarran de la misma forma que el alambre de amarre, y se tensan para que el *joist* quede bien estirado.

Figura 82. **Ganchos que sirven para sujetar mejor la malla**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Estos ganchos se colocan porque en ciertos lugares del panel, la malla de gallinero se abulta, quedando separada de las botellas; esto significa que al momento de fundir el ecopanel, estas partes que quedaron abultadas, se saldrán del recubrimiento de mortero, causando que la malla quede expuesta al exterior, y que se oxide con más facilidad. Los ganchos atraviesan el panel y se amarran tal y como se aprecia en la figura.

Figura 83. **Ecopanel terminado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

4.4. Paso 04: Preparación del área de trabajo y de la mezcla para hacer el ecopanel prefabricado

Los ecopaneles prefabricados se funden tendidos en el piso. Para ello, antes de colocar el molde, se extiende sobre la superficie del taller de trabajo una pieza de nilón que permite, después de desencofrar el ecopanel, levantarlo sin ningún esfuerzo y sin dañarlo. Este cuidado es de mucha importancia ya que en ese mismo lugar se fundirán más ecopaneles. También es importante untar el marco con aceite de carro, que no esté quemado, para que el desencofrado del panel se lleva a cabo sin ningún problema de adherencia a la superficie.

Figura 84. **Marco listo para hacer la fundición del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Cuando se terminó de acondicionar el marco se procedió a preparar la mezcla del mortero. Para este propósito se trabajó con la proporción 1:2 (uno de cemento por dos de arena). Con base en un cálculo estimado de la cantidad de material que se iba a utilizar, se determinó que para fundir un ecopanel se necesitaban tres cubetas de cemento y que, en consecuencia, de acuerdo con la fórmula, se requerían seis cubetas de arena.

Después de culminar la construcción del ecopanel pequeño y de conocer la cantidad de material utilizado, así como su volumen, se planteó y se resolvió una regla de tres, la cual permitió conocer la cantidad de material que se necesitaba para construir el ecopanel de 1,20x0,58x0,10 m, ya que se conocía el volumen que iba a ser fundido.

Después de preparar la mezcla, el procedimiento para fundir el ecopanel fue el siguiente:

- a) Se coloca una base de mezcla dentro del marco, cuidando que lo cubra todo y que su espesor sea uniforme para que no queden espacios vacíos.
- b) Se recomienda que el espesor de la capa de mortero sea mayor que el recubrimiento requerido.
- c) En el ensayo que aquí se describe, el espesor fue de 1,5 centímetros. Esto permite que al colocar las botellas dentro del marco, el mortero penetre en los canales que hay entre botella y botella y que de esta manera se obtenga un panel igual al que se muestra en la figura 52.

Figura 85. **Capa de mortero antes de colocar las ecocolumnas**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

- En el siguiente paso se procede así: a) Se colocan las ecocolumnas, b) Se les mueven de manera que la mezcla penetre en los canales que hay entre columna y columna, y c) Se debe tratar que en la parte inferior del ecopanel quede el recubrimiento de 1,5 centímetros.

Figura 86. **Ecocolumnas dentro del marco**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

- En el tercer paso se procede así: a) Se rellena el “nervio” que está a la mitad del mismo para que no quede vacío, b) El relleno se efectúa con la cuchara, c) Se pasa la punta de la cuchara para lograr que penetre el mortero y que alcance lo más profundo, y d) Se cubre el resto del ecopanel con la mezcla.

Figura 87. **Ecopanel prefabricado al terminar de cubrirlo con el mortero**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Una vez terminado el proceso de fundición del ecopanel se espera al siguiente día para desencofrarlo e iniciar la fundición del siguiente.

El desencofrado, sin embargo, no significa que el ecopanel pueda ser removido de su lugar, para el levantado del ecopanel se deben esperar, por lo menos, un día más. Después de ese lapso se le traslada a un lugar seguro para que fragüe bien y para protegerlo de cualquier daño.

Para que el proceso de fraguado se desarrolle con éxito, el ecopanel debe ser remojando constantemente, por lo menos durante una semana. Es también importante cuidar la orientación de las ecocolumnas para no incurrir en el error de ensayar al revés el panel.

Terminado el proceso se espera el paso de 28 días y se procede a efectuar los ensayos correspondientes.

Figura 88. **Ecopanel prefabricado terminado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

5. NORMAS DE ENSAYO A ECOPANELES PREFABRICADOS

5.1. Ensayo a compresión, según la Norma ASTM E 72-02 sección 9

Los procedimientos que se describen sirven para evaluar el comportamiento de segmentos de muros de construcción, en condiciones que representan a las encontradas en servicio. Los criterios de desempeño, basados en los datos de esos procedimientos, garantizan la adecuación estructural y vida útil de los elementos evaluados.

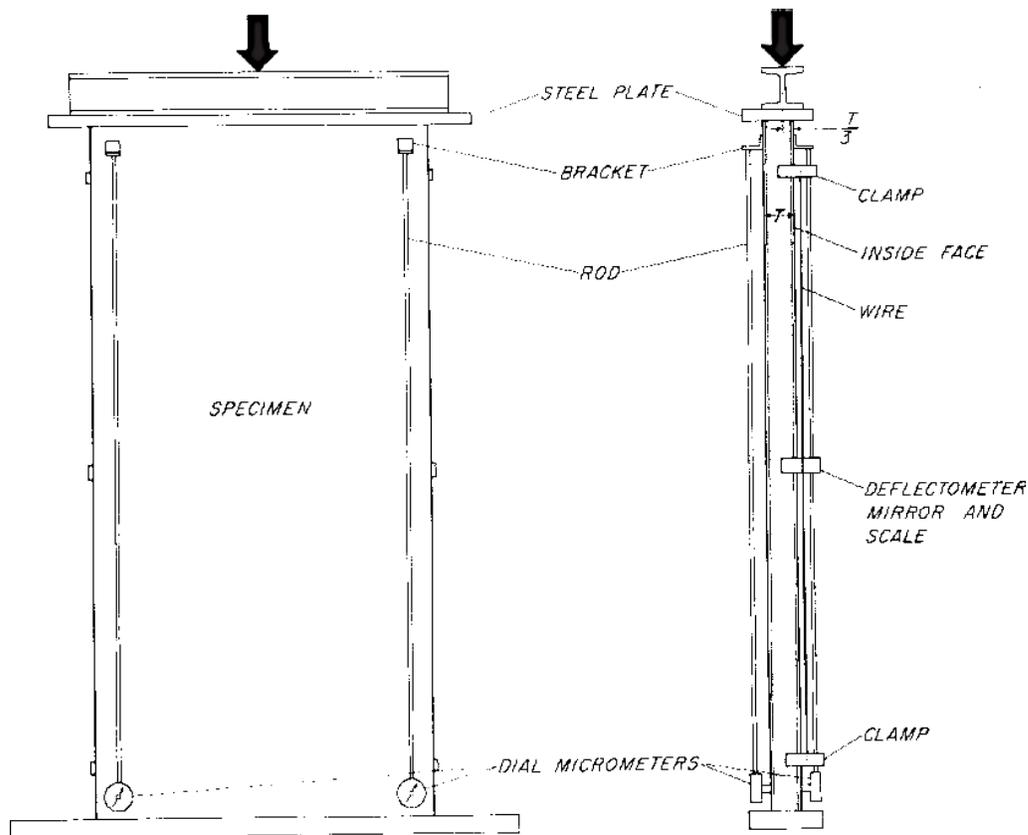
5.1.1. Muestras de prueba

Las pruebas se desarrollaron en tres modelos iguales, cada uno con altura igual a la longitud del elemento y anchura nominal de 1,2 m (4 pies). Se exceptúan los paneles prefabricados, donde el ancho real será la anchura del panel utilizado.

5.1.2. Equipo

Para ensamblar el equipo se procede como se muestra en la figura 89, y se ajusta a los requisitos especificados para los componentes que se describen en 5.1.2.1 y 5.1.2.2, o de una forma equivalente.

Figura 89. Prueba de carga de compresión en muestras de pared



Fuente: Norma ASTM E72-02. p. 3.

5.1.2.1. Compresómetro

Cerca del extremo superior deberá ligarse a la muestra un soporte, apoyado en una barra de metal. También se le unirá un soporte a la muestra, cerca de su extremo inferior. El extremo cónico de la barra se asienta en un agujero, en el extremo del eje, y la varilla y el eje se mantienen en contacto por medio de bandas de goma estirada. El dispositivo de medición de la desviación se debe graduar a 0,025 mm (0,001 pulgadas), o menos.

5.1.2.2. Deflectómetro

Un alambre fino deberá unirse a una pinza cerca del extremo superior de la muestra. El extremo libre conectado a la banda de goma estirada deberá enlazarse a una pinza cerca del extremo inferior de la muestra. Un espejo, con una escala de papel a la mitad de su ancho, se juntará horizontalmente al borde de la muestra, a media altura. La escala estará graduada a 2,5 mm (0,1 pulgadas) o menos.

5.1.3. Procedimiento

A continuación se explica la forma en que se debe llevar a cabo el ensayo; también se describe cómo es que se colocan cada uno de los instrumentos utilizados.

5.1.3.1. Aplicación de la carga

La muestra se evalúa como una columna que tiene un extremo plano en su parte inferior (fig. 89). La carga de compresión se aplica a la placa de acero que cubre el extremo superior de la muestra, y se distribuye de manera uniforme a lo largo de una línea paralela a la cara interior, y a un tercio del espesor de la muestra de la antedicha cara interior.

5.1.3.2. Datos de carga-deformación

Para medir el acortamiento de la muestra se conectan cuatro compresómetros a sus caras, uno cerca de cada una de sus esquinas, como se observa en la figura 89. Las lecturas se registran con una precisión de 0,025 mm (0,001 pulgadas).

5.1.3.3. Desviación lateral

Se trabaja con dos deflectómetros, uno para cada lado de la muestra, como se ve en la figura 89. Registre las lecturas cuando la imagen del cable coincida con el cable, con una precisión de 0,25 mm (0,01 plg)

5.1.4. Cálculos y reporte

De los datos obtenidos del ensayo, para presentar un reporte es necesario hacer una serie de cálculos para obtener resultados que se puedan interpretar y llegar a una conclusión acerca de la muestra ensayada. A continuación se explica la forma de obtener estos resultados.

5.1.4.1. Deformación

Para cada compresómetro, calcule la reducción en cada carga, como la diferencia entre la lectura del compresómetro cuando se aplica la carga y la lectura inicial. Estime el acortamiento de la muestra, como la media de los acortamientos para cada uno de los cuatro compresómetros multiplicado por la relación de la longitud del espécimen dividida por la longitud del compresómetro indicador. Obtenga los conjuntos de una manera similar.

5.1.4.2. Desviación lateral

Calcule la desviación lateral y el conjunto en cada carga lateral para cada deflectómetro, como la diferencia entre la lectura del deflectómetro cuando se aplica la carga y la lectura inicial. Calcule la desviación lateral y el conjunto lateral de la muestra, como el promedio de la desviación lateral y el ajuste lateral de los dos deflectómetros.

5.1.4.3. Presentación de datos

Lleve un registro de la carga máxima para cada muestra y reporte los resultados de las mediciones de carga-deformación y carga-deflexión, en la forma de un gráfico. Informe de todas las longitudes de los medidores de deflexión o medidores de deformación.

5.1.5. Descripción y resultados obtenidos en el ensayo a compresión realizado en la sección de estructuras del CII de la USAC

Para el ensayo a compresión se fabricaron tres ecopaneles idénticos, y se trató de que no existieran diferencias marcadas, tanto en su construcción como en su mano de obra. Las dimensiones de dichos ecopaneles fueron las siguientes: 1,20 m de alto, 0,58 m de ancho y 0,10 m de espesor. En su interior había ocho ecocolumnas.

El ensayo consistió en aplicarles carga axial a los ecopaneles utilizando la máquina universal de la sección de estructuras de ingeniería, hasta que estos fallaran. Se utilizaron dos deformómetros en cada ecopanel: uno para medir el pandeo o deflexión, colocado a $L/2$, como puede observarse en la figura 90, y otro para medir el aplastamiento de la muestra, con una luz de 0,50 m, como puede verse en la figura 91. Los tres ecopaneles prefabricados fueron ensayados 28 días después de su fabricación.

Figura 90. **Deformómetro colocado a $L/2$ del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 91. Deformómetro midiendo aplastamiento con una luz de 0,50 m



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 92. **Deformómetros colocados para el ensayo a compresión**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En la gráfica se observa cómo quedan colocados los dos deformómetros que se usaron en el ensayo a compresión, de cada ecopanel prefabricado.

5.1.5.1. Ecopanel prefabricado No. 1

Luego del ensayo al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 1 se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla que sigue.

Tabla XXXIV. **Datos obtenidos del ensayo a compresión**

Peso	174	lb	78,93	kg	
Carga (libras)	Deformómetro horizontal (0,001 in)		Deformómetro vertical (0,01 mm)		
0	4	19,0	31	0,0	
3 000	4	20,2	31	4,8	
6 000	4	23,4	31	8,9	
9 000	4	25,9	31	12,1	
12 000	4	28,1	31	15,2	
15 000	4	30,6	31	19,1	
18 000	4	32,1	31	25,0	
21 000	4	34,3	31	28,3	
24 000	4	36,6	31	31,1	
27 000	4	38,9	31	34,6	Primera grieta
30 000	4	41,0	31	38,0	
33 000	4	43,9	31	41,8	
36 000	4	49,2	31	47,4	Segunda grieta
39 000	4	75,0	31	55,8	
45 500	Falla, carga última				
Tipo de falla: aplastamiento					

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. Resultados de deformación obtenidos del análisis y la interpretación de los datos de la tabla XXXIV

Deformación horizontal (0,001 in)		Deformación vertical (0,01 mm)		Deformación horizontal convertida a mm
0,4190	0	31,000	0	0
0,4202	0,0012	31,048	0,048	0,03048
0,4234	0,0044	31,089	0,089	0,11176
0,4259	0,0069	31,121	0,121	0,17526
0,4281	0,0091	31,152	0,152	0,23114
0,4306	0,0116	31,191	0,191	0,29464
0,4321	0,0131	31,250	0,250	0,33274
0,4343	0,0153	31,283	0,283	0,38862
0,4366	0,0176	31,311	0,311	0,44704
0,4389	0,0199	31,346	0,346	0,50546
0,4410	0,0220	31,380	0,380	0,55880
0,4439	0,0249	31,418	0,418	0,63246
0,4492	0,0302	31,474	0,474	0,76708
0,4750	0,0560	31,558	0,558	1,42240
			0,650	1,43000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Resultados de esfuerzo y deformación unitaria**

Longitud del deformómetro	500	mm			
Área bruta	580	cm ²			
Área neta	289,4655	cm ²			
Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo bruto (Kg/cm ²)	Esfuerzo neto (Kg/cm ²)	Def. vertical (0,01 mm)	Def. unitaria (mm/mm)
0	0	0	0	0	0
3 000	1 363,63636	2,35109	4,71087	0,048	9,6E-05
6 000	2 727,27272	4,70219	9,42175	0,089	0,00018
9 000	4 090,90909	7,05329	14,13263	0,121	0,00024
12 000	5 454,54545	9,40438	18,84350	0,152	0,00030
15 000	6 818,18181	11,75548	23,55438	0,191	0,00038
18 000	8 181,81818	14,10658	28,26526	0,250	0,00050
21 000	9 545,45454	16,45768	32,97613	0,283	0,00057
24 000	10 909,09091	18,80877	37,68701	0,311	0,00062
27 000	12 272,72727	21,15987	42,39789	0,346	0,00069
30 000	13 636,36364	23,51097	47,10876	0,380	0,00076
33 000	15 000,00000	25,86206	51,81964	0,418	0,00084
36 000	16 363,63636	28,21316	56,53052	0,474	0,00094
39 000	17 727,27273	30,56426	61,24140	0,558	0,00112
45 500	20 681,81818	35,65831	71,44830	0,650	0,00130

Fuente: elaboración propia.

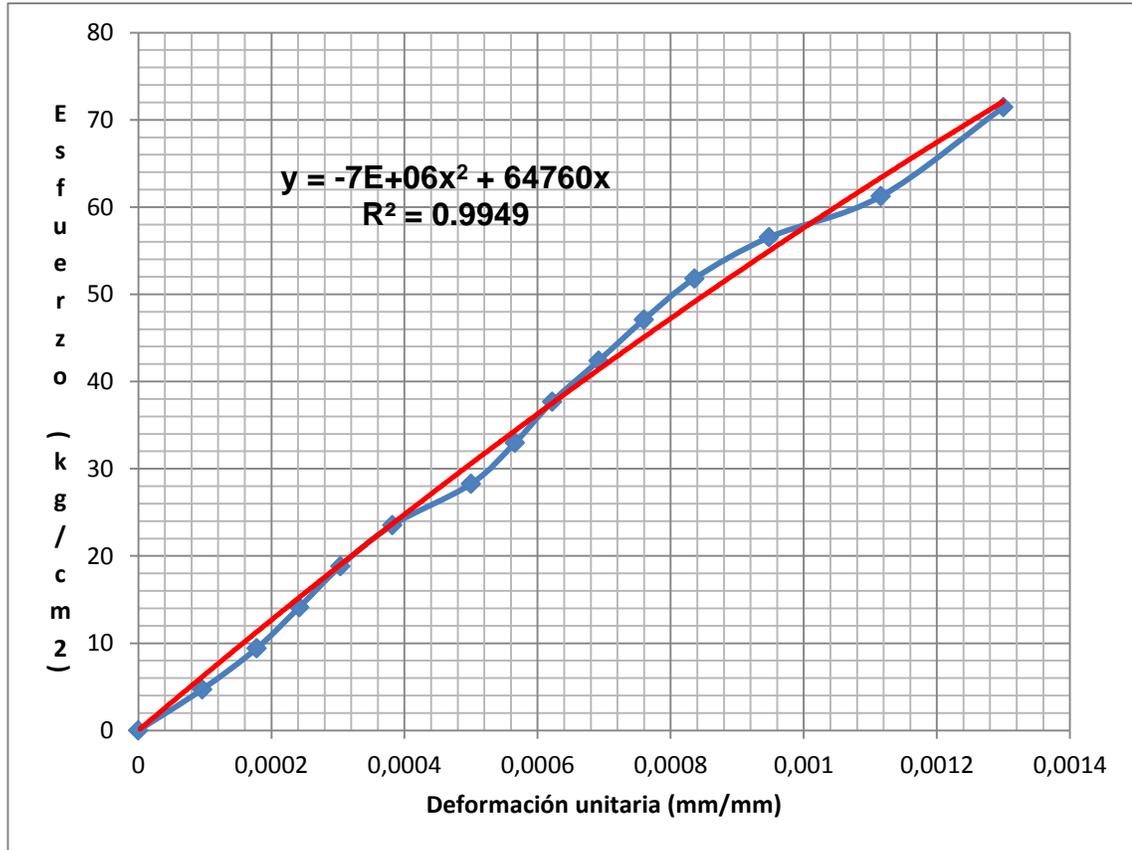
La deformación unitaria es el resultado de dividir la deformación obtenida de los deformómetros, que en este caso es la del deformómetro que mide el aplastamiento o acortamiento, entre una longitud conocida que será la longitud que cubrió dicho deformómetro. En esta forma se obtuvo la deformación unitaria, indispensable para trazar la curva de esfuerzo – deformación.

Tabla XXXVII. Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación

Esfuerzo neto (kg/cm ²)	Deformación unitaria (mm/mm)
0	0
4,71087	9,6E-05
9,42175	0,00018
14,13263	0,00024
18,84350	0,00030
23,55438	0,00038
28,26526	0,00050
32,97613	0,00057
37,68701	0,00062
42,39789	0,00069
47,10876	0,00076
51,81964	0,00084
56,53052	0,00094
61,24140	0,00112
71,44830	0,00130

Fuente: elaboración propia.

Figura 93. Curva de esfuerzo – deformación del ecopanel prefabricado No. 1 con su línea de tendencia



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se observa que cuando el ecopanel alcanza un valor de esfuerzo de 4,71 kg/cm² presenta un comportamiento de resiliencia. Esto se debe a que en este punto en donde el panel tiene la capacidad de volver a su forma inicial si se deja de aplicar la carga y no presenta ningún daño a la estructura.

Las botellas, cuando alcanzan el valor de esfuerzo de $28,26 \text{ kg/cm}^2$, comienzan a ser aplastadas. Esto significa que hasta este punto las botellas estuvieron soportando los esfuerzos aplicados, pero después de este valor comienzan a perder su capacidad de absorber y disipar las deformaciones, por lo tanto el ecopanel comenzará a presentar micro fisuras que, posteriormente, se convertirán en fisuras deformadoras que harán fallar completamente al ecopanel prefabricado.

Después del valor de $32,97 \text{ kg/cm}^2$ de esfuerzo, comienzan a trabajar conjuntamente, como sistema, el ferrocemento y las botellas plásticas, soportan los esfuerzos aplicados, y es después de este valor de esfuerzo cuando aparecen las primeras fisuras. Esto indica que las deformaciones que sufre el panel serán considerables e irán comprometiendo estructuralmente al ecopanel prefabricado.

Es dentro de este rango cuando alcanza su valor de esfuerzo de ruptura y esfuerzo de diseño, reacciones que posteriormente se explicará la forma como se pueden obtener.

En cuanto al comportamiento que presenta la gráfica, se debe a que al momento de la elaboración del ecopanel se le colocaron unos ganchos cuya función consistía en evitar que la malla de gallinero se abultara, como se indica en el capítulo 4. Pero se concluyó en que, dependiendo de la cantidad de ganchos que se coloquen, estos aportan al sistema, como tal, una ayuda considerable, al momento de soportar los esfuerzos aplicados.

5.1.5.2. Ecopanel prefabricado No. 2

Luego del ensayo al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 2 se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla que sigue.

Tabla XXXVIII. Datos obtenidos del ensayo a compresión

Peso	168	lb	76,2	kg	
Carga (lb)	Deformómetro horizontal (0,001 in)		Deformómetro vertical (0,01 mm)		
0	3	92,0	30	46,0	
3 000	3	91,2	30	48,0	
6 000	3	91,2	30	49,9	
9 000	3	92,5	30	52,0	
12 000	3	95,5	30	54,2	
15 000	4	0,0	30	56,9	
18 000	4	4,5	30	59,5	
21 000	4	9,0	30	62,5	
24 000	4	14,0	30	65,5	
27 000	4	21,0	30	71,2	
30 000	4	30,0	30	79,9	
33 000	4	41,0	30	89,0	Primera grieta
36 000	4	54,0	30	99,0	Segunda grieta
39 000	4	71,0	31	9,0	
41 000	Falla, carga última				
Tipo de falla: aplastamiento					

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Resultados de deformación obtenidos después de su análisis e interpretación**

Deformación horizontal (0,001 in)		Deformación vertical (0,01 mm)		Deformación horizontal convertida a mm
0,3920	0	30,46	0	0
0,3912	-0,0008	30,48	0,020	-0,02032
0,3912	-0,0008	30,49	0,039	-0,02032
0,3925	0,0005	30,52	0,060	0,01270
0,3955	0,0035	30,54	0,082	0,08890
0,4000	0,0080	30,57	0,109	0,20320
0,4045	0,0125	30,59	0,135	0,31750
0,4090	0,0170	30,62	0,165	0,43180
0,4140	0,0220	30,65	0,195	0,55880
0,4210	0,0290	30,71	0,252	0,73660
0,4300	0,0380	30,79	0,339	0,96520
0,4410	0,0490	30,89	0,430	1,24460
0,4540	0,0620	30,99	0,530	1,57480
0,4710	0,0790	31,09	0,630	2,00660
			0,730	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Resultados de esfuerzo y deformación unitaria**

Longitud del deformómetro	500	mm				
Área bruta	580	cm ²				
Área neta	289,4655	cm ²				
Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo bruto (kg/cm ²)	Esfuerzo neto (kg/cm ²)	Def. Vertical (0,01 mm)	Def. unitaria (mm/mm)	
0	0	0	0	0	0	
3 000	1 363,63636	2,35109	4,71087	0,020	4E-05	
6 000	2 727,27272	4,70219	9,42175	0,039	7,8E-05	
9 000	4 090,90909	7,05329	14,13263	0,060	0,00012	
12 000	5 454,54545	9,40438	18,84350	0,082	0,00016	
15 000	6 818,18181	11,75548	23,55438	0,109	0,00022	
18 000	8 181,81818	14,10658	28,26526	0,135	0,00027	
21 000	9 545,45454	16,45768	32,97613	0,165	0,00033	
24 000	10 909,09091	18,80877	37,68701	0,195	0,00039	
27 000	12 272,72727	21,15987	42,39789	0,252	0,00050	
30 000	13 636,36364	23,51097	47,10876	0,339	0,00068	
33 000	15 000,00000	25,86206	51,81964	0,430	0,00086	
36 000	16 363,63636	28,21316	56,53052	0,530	0,00106	
39 000	17 727,27273	30,56426	61,24140	0,630	0,00126	
41 000	18 636,36364	32,13166	64,38198	0,730	0,00146	

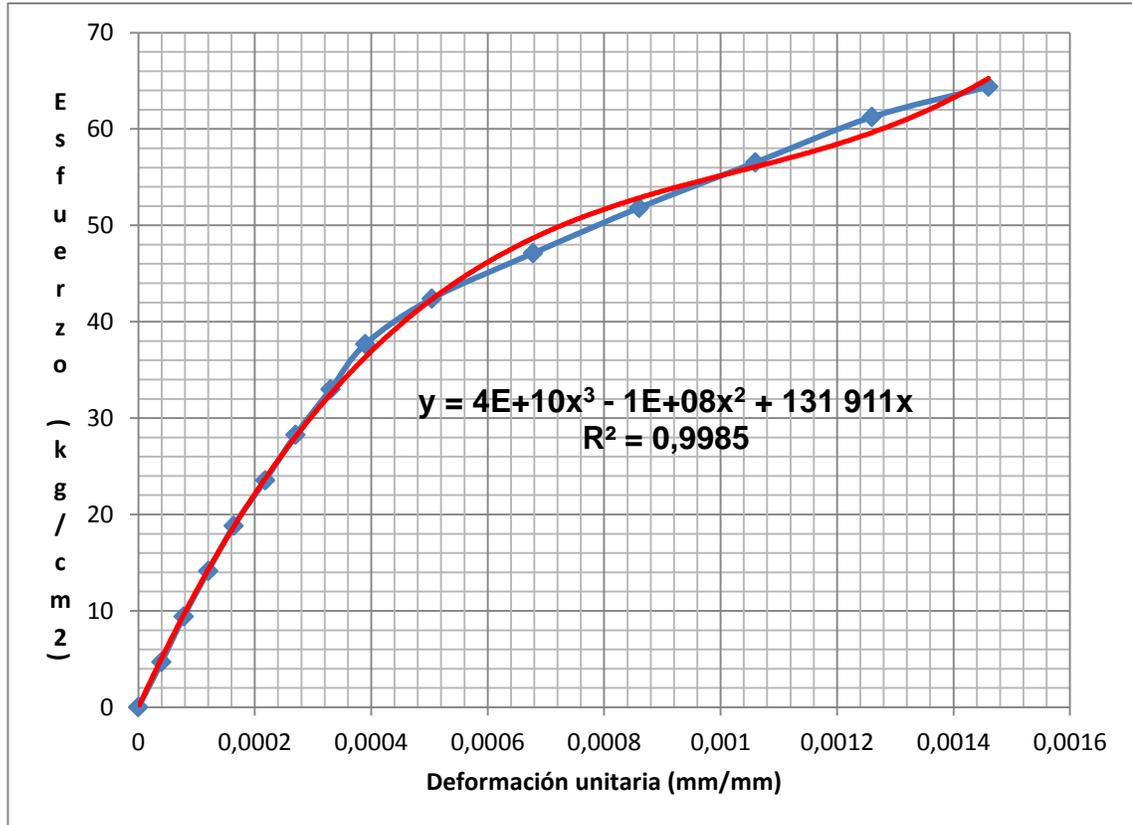
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación**

Esfuerzo neto (kg/cm ²)	Deformación unitaria (mm/mm)
0	0
4,71087	4E-05
9,42175	7,8E-05
14,13263	0,00012
18,84350	0,00016
23,55438	0,00022
28,26526	0,00027
32,97613	0,00033
37,68701	0,00039
42,39789	0,00050
47,10876	0,00068
51,81964	0,00086
56,53052	0,00106
61,24140	0,00126
64,38198	0,00146

Fuente: elaboración propia.

Figura 94. **Curva de esfuerzo – deformación del ecopanel prefabricado No. 2 con su línea de tendencia**



Fuente: elaboración propia.

El panel número dos presenta un comportamiento de resiliencia un poco mayor que el número uno, ya que éste alcanza un valor de 9,42 kg/cm² y, como se indicó, es en esta zona donde posee la capacidad de volver a su estado inicial si se deja de aplicar la carga axial. También se puede observar que las botellas soportaron los esfuerzos hasta un valor de 32,97 kg/cm², con lo que se logró que el panel no sufriera grandes deformaciones ni presentara daños considerables en la estructura. Es después de este valor cuando el ferrocemento y las botellas comienzan a trabajar como un sistema.

La tendencia de los datos que se observan en esta gráfica es muy diferente a la gráfica anterior (la figura 93). Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente, al fabricar los ecopaneles se colocaron ganchos para sujetar la malla, pero sin seguir una configuración establecida. A la larga no afecta de manera marcada a la resistencia del ecopanel, pero sí aporta al sistema, una mayor estabilidad al momento de soportar los esfuerzos aplicados.

5.1.5.3. Ecopanel prefabricado No. 3

Luego del ensayo al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 3 se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla que sigue.

Tabla XLII. **Datos obtenidos del ensayo a compresión**

Peso	163	lb	73,94	kg	
Carga (lb)	Deformómetro horizontal (0,01 mm)		Deformación vertical (0,001 in)		
0	48	0	2	0	
5 000	47	89	2	1	
10 000	47	96	2	3	
15 000	48	3	2	5	
20 000	48	9	2	7	
25 000	48	9	2	8	
28 000	48	40	2	8	Primera grieta
30 000	48	44	2	9	Grieta en medio
35 000	48	64	2	12	Grieta lateral
40 000	49	76	2	15	Más grietas
44 000	49	73	2	26	Falla
Tipo de falla: Aplastamiento					

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Resultados de deformación obtenidos después de su análisis e interpretación**

Deformación horizontal (0,01 mm)		Deformación vertical (0,001 in)		Deformación vertical convertida a mm
48,00	0	0,200	0	0
47,89	-0,11	0,201	0,001	0,0254
47,96	-0,04	0,203	0,003	0,0762
48,03	0,03	0,205	0,005	0,1270
48,09	0,09	0,207	0,007	0,1778
48,09	0,09	0,208	0,008	0,2032
48,40	0,40	0,208	0,008	0,2032
48,44	0,44	0,209	0,009	0,2286
48,64	0,64	0,212	0,012	0,3048
49,76	1,76	0,215	0,015	0,3810
49,73	1,73	0,226	0,026	0,6604

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Resultados de esfuerzo y deformación unitaria**

Longitud del deformómetro	400	mm				
Área bruta	580	cm ²				
Área neta	289,4655	cm ²				
Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo bruto (kg/cm ²)	Esfuerzo neto (kg/cm ²)	Def. vertical (0,001 in)	Def. unitaria (mm/mm)	
0	0	0	0	0	0	
5 000	2 272,72727	3,91849	7,85146	0,0254	6,35E-05	
10 000	4 545,45455	7,83699	15,70292	0,0762	0,00019	
15 000	6 818,18182	11,75548	23,55438	0,1270	0,00031	
20 000	9 090,90909	15,67398	31,40584	0,1778	0,00044	
25 000	11 363,63640	19,59247	39,25730	0,2032	0,00050	
28 000	12 727,27270	21,94357	43,96818	0,2032	0,00050	
30 000	13 636,36360	23,51097	47,10876	0,2286	0,00057	
35 000	15 909,09090	27,42946	54,96023	0,3048	0,00076	
40 000	18 181,81820	31,34796	62,81169	0,3810	0,00095	
44 000	20 000,00000	34,48275	69,09286	0,6604	0,00165	

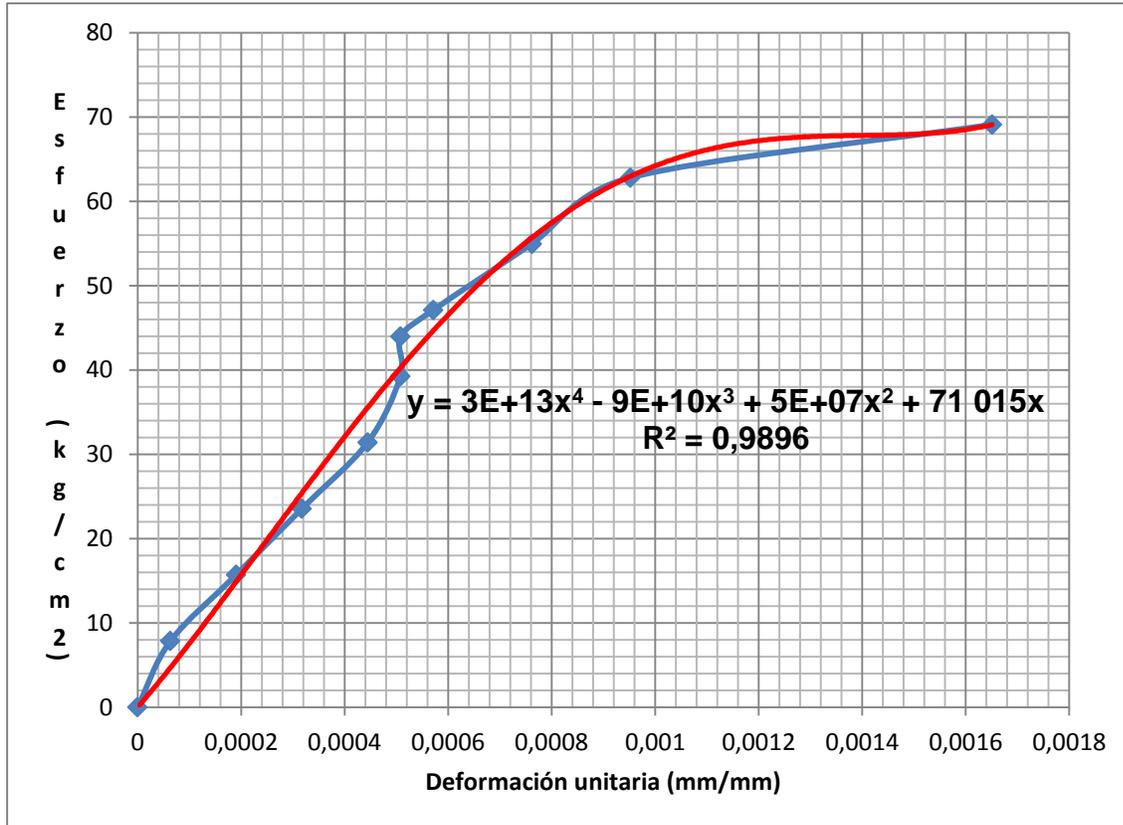
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación**

Esfuerzo neto (kg/cm ²)	Deformación unitaria (mm/mm)
0	0
7,85146	6,35E-05
15,70292	0,00019
23,55438	0,00031
31,40584	0,00044
39,25730	0,00050
43,96818	0,00050
47,10876	0,00057
54,96023	0,00076
62,81169	0,00095
69,09286	0,00165

Fuente: elaboración propia.

Figura 95. Curva de esfuerzo – deformación del ecopanel prefabricado No. 3 con su línea de tendencia



Fuente: elaboración propia.

La zona de resiliencia de este ecopanel va hasta un valor de esfuerzo de 7,85 kg/cm². En comparación con los paneles anteriores se mantiene dentro del mismo rango de acción, lo cual significa que los resultados del estudio son válidos porque los tres ecopaneles mostraron comportamientos similares, y esto fue, precisamente, lo que el ensayo se propuso comprobar.

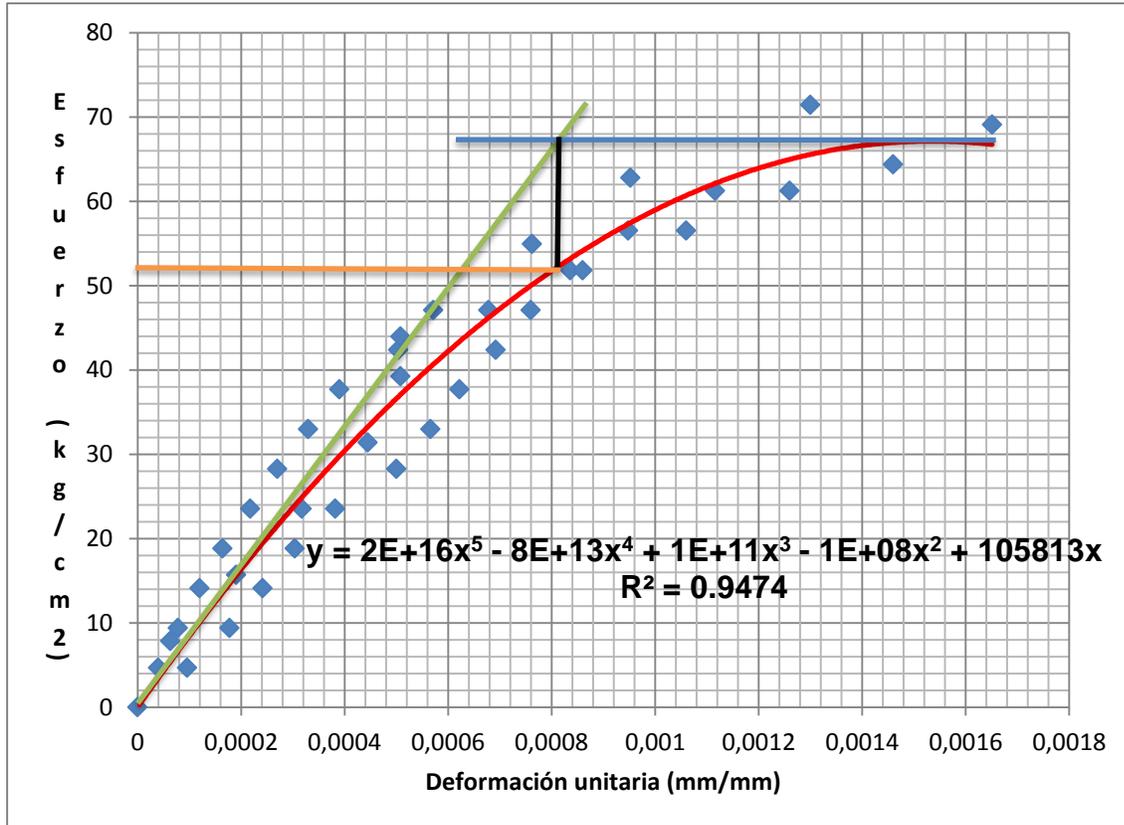
En este ecopanel las botellas soportaron hasta un valor de $31,40 \text{ kg/cm}^2$ los esfuerzos aplicados. Este dato refuerza la teoría de que todos los paneles poseen comportamientos similares. Indica, asimismo, que después de este valor el ferrocemento y las botellas trabajan como un sistema. En este punto empiezan las deformaciones mayores, lo cual demuestra que en este rango el ecopanel pierde la capacidad de soportar los esfuerzos sin presentar daños en la estructura. Es aquí donde se encuentra su esfuerzo último o de ruptura, y su esfuerzo de diseño, el cual se calcula a partir del esfuerzo último. La metodología para calcularlo se presenta a continuación.

5.1.6. Promedio entre gráficas para determinar el valor del esfuerzo último y el esfuerzo de diseño del ecopanel prefabricado

En el siguiente paso se plotearon, en un solo gráfico, los datos de los tres ecopaneles prefabricados. Esto permitió, con la ayuda del software Microsoft Excel, trazar la línea de tendencia. A partir de este trazo se determinó el valor del esfuerzo último y el esfuerzo de diseño, información que se obtuvo mediante la aplicación del método empírico ideado por el ingeniero Mario Corzo, sobre la base de su amplia experiencia profesional.

El método comprende los siguientes pasos: a) Se traza una línea tangente sobre la curva de tendencia, b) Se traza una recta horizontal que sea tangente al punto de inflexión, o punto máximo, de la línea de tendencia, c) en el punto de intersección de las rectas a) y b) se traza una línea vertical convergente sobre un valor de la línea de tendencia, y d) el resultado que se obtiene es el valor del esfuerzo de diseño.

Figura 96. Promedio de la curva de esfuerzo – deformación de los tres ecopaneles con su línea de tendencia



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. Simbología de colores

	Recta tangente a la curva
	Recta horizontal a la curva
	Recta vertical que converge sobre la línea de tendencia
	Recta señalando el valor del esfuerzo de diseño

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con el método Corzo, para el cálculo de los valores de esfuerzo representados en la figura 96, con la simbología de colores de la tabla XLVI: a) El valor de esfuerzo último es igual a 67,5 kg/cm² aproximadamente. Este es el valor de f_m . b) El valor de esfuerzo de diseño, o esfuerzo de trabajo, f'_m , es de 51 kg/cm². Este es el valor que se utiliza cuando se diseña una construcción con el sistema de ecopaneles prefabricados. Y c) Este resultado también se puede expresar así: el valor de esfuerzo de diseño es el 75 % del esfuerzo último.

El siguiente paso consiste en determinar el valor del módulo de elasticidad (E) del ecopanel. Este se obtiene al despejar la ecuación del ACI 318-08, de la sección 8.5.1, que se muestra a continuación.

$$E = wc^{1,5} * 0,14 * \sqrt{f'_m}$$

Donde:

- E = módulo de elasticidad en kg/cm²
 wc = peso específico del panel
 f'c = esfuerzo de trabajo

El cálculo del peso específico del panel se obtiene de la siguiente manera:

$$\gamma = (\gamma_{botella} * \frac{A_{botella}}{A_{Total}}) + (\gamma_{mortero} * \frac{A_{mortero}}{A_{Total}})$$

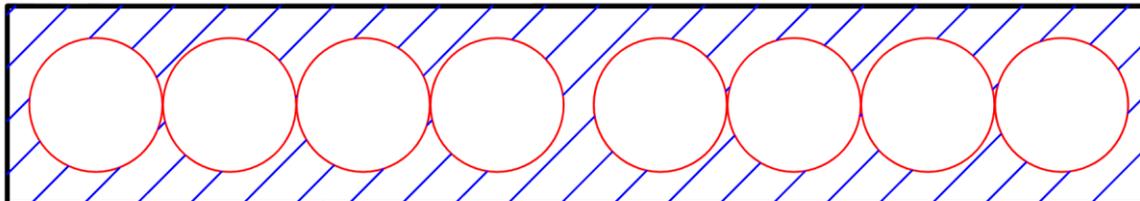
Donde:

- γ = Peso específico
 A = Área

El proceso implica conocer, primero, el peso específico de los materiales. En el presente informe, el peso específico de las botellas está registrado en la tabla No. III, del capítulo 2. Ahora bien, debe aclararse que, aunque los valores que aparecen en dicha tabla son los de densidad, estos son equivalentes a los valores del peso específico de los materiales. Debido a que por poseer las mismas dimensionales, tanto el peso específico como la densidad, son fácilmente confundidos por las personas que nominan como densidad lo que es peso específico, o a la inversa. El valor que aquí se alude es igual a $0,92 \text{ g/cm}^3$ (920 kg/m^3). De igual manera, el valor del peso específico del mortero, según el numeral 2.2.2.4.1, del capítulo 2, es igual a $2\,300 \text{ kg/m}^3$.

El cálculo de las áreas se efectúa desde una vista en planta, con las siguientes observaciones: primero, el área de las botellas comprende únicamente el área ocupada por el espesor de la pared de la botella, dato que consta en el capítulo 3 y que se representa como: $A_{\text{botella}}=0,63806 \text{ cm}^2$. Este valor se multiplica por ocho, porque ocho es el número de ecocolumnas que contiene el ecopanel prefabricado. Segundo, el área del mortero es igual a: $A_{\text{mortero}}=0,028946 \text{ m}^2$, ashurada con color azul en el diagrama de la figura 97, elaborado con la ayuda del *software AutoCad*.

Figura 97. **Vista en planta de un ecopanel prefabricado**



Fuente: elaboración propia.

5.1.6.1. Cálculos

$$\gamma_{botella} = 920 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{mortero} = 2\,300 \text{ kg/m}^3$$

$$A_{botella} = 0,63806 \text{ cm}^2 = 63,80574 * 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$A_{bot} = 63,80574 * 10^{-6} * 8 = 510,44596 * 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$A_{mortero} = 0,02894 \text{ m}^2$$

$$A_{Total} = 0,02894 + 0,00051 = 0,02946 \text{ m}^2$$

$$A_{bot}/A_T = 510,44596 * 10^{-6} / 0,02945 = 0,01732$$

$$A_{mort}/A_T = 0,02894 / 0,02945 = 0,98267$$

Entonces, para calcular el peso específico del panel se multiplica el peso específico del material por el porcentaje de área ocupado por cada material. De esta forma se obtiene el peso específico total del ecopanel prefabricado. Dato que, posteriormente, permitirá calcular el módulo de elasticidad.

$$\gamma_{bot} * (A_{bot}/A_T) = (920) * (0,01732) = 15,94220 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{mort} * (A_{mort}/A_T) = (2\,300) * (0,98267) = 2\,260,14449 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_T = 15,94220 + 2\,260,14449 = 2\,276,08669 \text{ kg/m}^3$$

Para determinar $f'm$ se emplea el valor de esfuerzo de trabajo representado en la figura 96, y que equivale a 51 kg/cm^2 , de donde se infiere que el módulo de elasticidad del ecopanel prefabricado es igual a:

$$E = (2\,276,08669)^{1,5} * 0,14 * \sqrt{51}$$

$$E = 10\,7496,9737 \text{ kg/cm}^2$$

En cuanto al área que ocupan las botellas solamente se toma la que ocupa el área del espesor de la pared de estas porque, aunque se encuentren rellenas con basura inorgánica, limpia y seca, como se apuntó en el capítulo 3, la basura sólo contribuye a que las ecocolumnas sean más estables y se muestren más resistentes a la flexión, aunque no aumente en grado considerable su resistencia a la compresión.

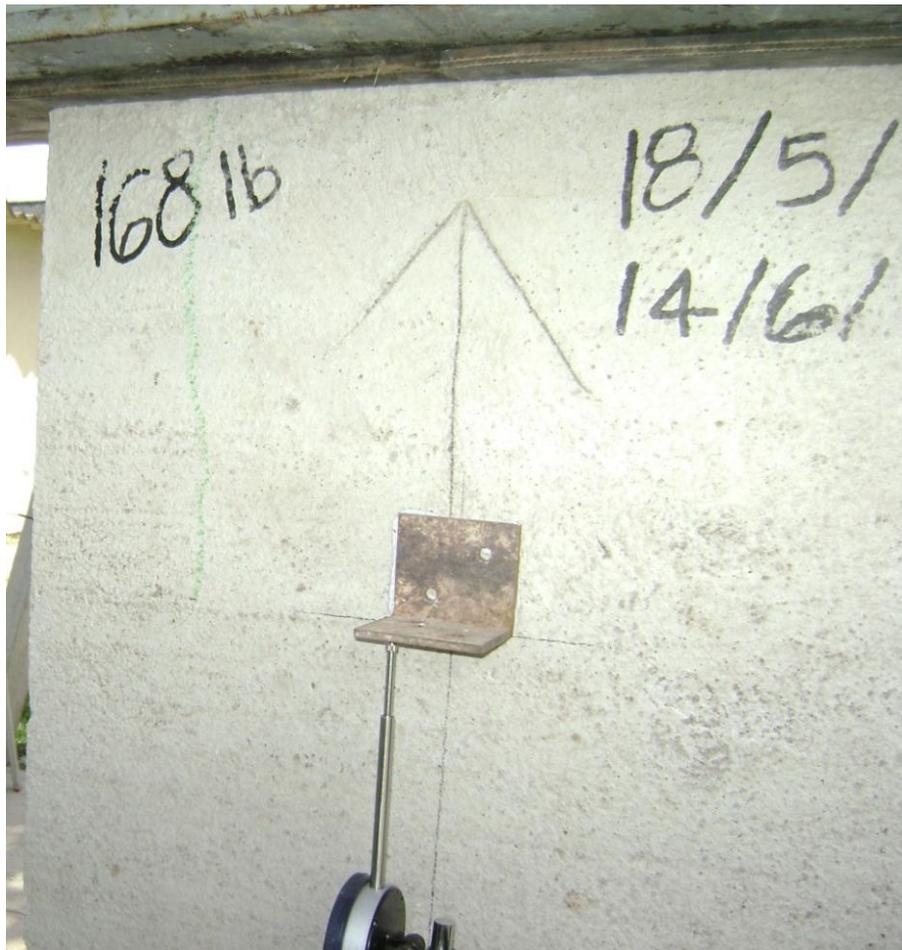
Por otra parte, aunque podría considerarse que la resistencia del ecopanel prefabricado a compresión no es tan elevada, es importante resaltar que sólo el área neta es la que soporta dicho esfuerzo. Esto significa que únicamente el recubrimiento de 1,5 centímetros a cada lado, y ocho ecocolumnas con un área de $63,80574 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ cada una, soportan todo el esfuerzo a compresión.

Lo que ocurre aquí es similar a lo que ocurriría en una columna armada, si se la construyera sin el refuerzo de acero, y se ensayara a compresión. No soportaría grandes esfuerzos de compresión y se fracturaría, pero al colocarle el refuerzo de acero se incrementa en grado considerable su esfuerzo a compresión y se evita que esta se fracture.

Si se aplica este concepto a los ecopaneles prefabricados se deduce que: un panel que en su interior no tenga ningún tipo de refuerzo y que tenga un recubrimiento de 1,5 cm, si se le aplica una carga de compresión, por muy pequeña que fuere, esta lo fracturaría. Pero si se le coloca un refuerzo en su interior, que para el caso son las ecocolumnas fabricadas con botellas plásticas, se aumentará su resistencia a compresión, flexión, corte e impacto, en forma considerable.

En la siguiente secuencia fotográfica se muestran diferentes fases de los ensayos a compresión a los que fueron sometidos los tres ecopaneles prefabricados.

Figura 98. **Agrietamiento en la parte de arriba del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Grietas de este tipo se deben a que el recubrimiento de la zona ubicada frente a las botellas no tiene el espesor indicado, razón por la que se convierte en el punto más vulnerable del ecopanel.

Figura 99. **Agrietamiento del ecopanel en la parte de en medio**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Esta grieta, aunque no está unida a la que se muestra en la fotografía anterior, se la puede analizar con el mismo criterio: el espesor del recubrimiento de esta sección no es igual al del resto del ecopanel, por lo que se convierte en un punto más susceptible para agrietarse.

Figura 100. **Agrietamiento de la parte de abajo del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

El tipo de falla que se muestra en esta fotografía se debe a que durante la aplicación de la carga axial, tanto las botellas de arriba como las de abajo tienden a aplastarse. Esto debilita al elemento estructural en esos puntos, y es la causa de que surja este tipo de fallas.

Figura 101. **Agrietamiento a un costado, en la parte de abajo**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Este tipo de grieta resulta del aplastamiento, en la base, tanto de las botellas como de su recubrimiento.

Figura 102. **Agrietamiento a un costado, en la parte de arriba**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Este tipo de grietas se debe al ensanchamiento del ecopanel, causado por la aplicación de la carga. El ensanchamiento produce la separación de las caras frontales del elemento por lo que sus costados se agrietan.

Figura 103. **Agrietamiento del ancho del recubrimiento del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La aplicación de la carga y el aplastamiento de las botellas produce la separación de las caras del ecopanel. Esto causa la grieta en el recubrimiento y no en el centro del panel debido a que el recubrimiento se separa de las ecocolumnas.

Figura 104. **Aplastamiento y descascaramiento de la parte superior del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Las botellas de la parte superior se comprimieron y empezaron a deformarse. Esto produjo la falla del mortero y las fallas del ecopanel, que se observan en la fotografía.

Figura 105. **Agrietamiento horizontal en la parte de arriba del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La grieta que se muestra en la fotografía se debe al aplastamiento de las botellas. Esta es la causa de que el mortero pierda su forma y la estabilidad, y empiece a deformarse y a agrietarse.

Figura 106. Descascaramiento a un costado de la parte superior



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Este tipo de falla también se debe al aplastamiento de las botellas, lo cual causa el descascaramiento del mortero, como se observa en la parte superior del ecopanel.

Figura 107. **Aplastamiento en la parte superior del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La misma falla que se ha mostrado en las fotografías anteriores: las botellas se aplastan y esto produce el desprendimiento del mortero, y la pérdida de su forma. El ecopanel queda inservible.

Figura 108. **Aplastamiento del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Vista, desde otro ángulo, del aplastamiento del ecopanel prefabricado. Esta falla produce su inutilidad.

Figura 109. **Aplastamiento de la parte inferior del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Cuando el aplastamiento ocurre en la base del ecopanel, esto causa las consecuentes fallas que se observan en la fotografía.

5.2. Ensayo a flexión vertical, según la Norma ASTM E72-02 sección 12

Para llevar a cabo el ensayo a flexión vertical, es importante tomar en consideración los procedimientos descritos a continuación, así como las recomendaciones en cuanto a la colocación de los instrumentos utilizados.

5.2.1. Muestras de prueba

Las pruebas se efectuarán en tres ejemplares iguales, en montajes simétricos, y en seis muestras iguales, en conjuntos asimétricos. Cada una con una longitud igual a la del elemento, y una anchura nominal de 1,2 m (4 pies), excepto en los paneles prefabricados, donde el ancho real es equivalente a la anchura del panel utilizado.

5.2.2. Equipo

El equipo debe ensamblarse cumpliendo con los requisitos de los componentes, o con una configuración equivalente, como se observa en la figura 110, de la página 209, rigiéndose por el orden que se cita a continuación.

- Canal de acero
- Rodillos: rodillos cilíndricos, dos rodillos de apoyo, dos ruedas de carga.
- Gato hidráulico
- Dinamómetro de anillo
- Deflectómetros: dos deflectómetros de cables tensionados, con escala de espejo

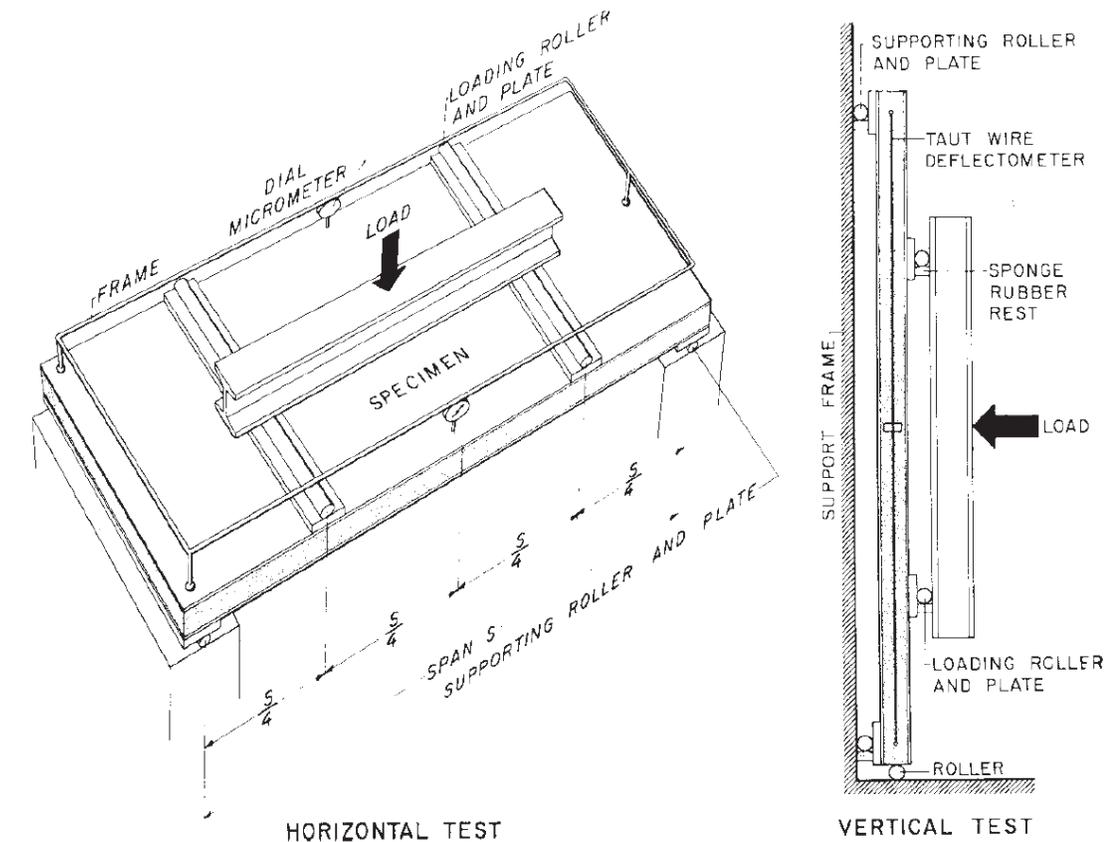
5.2.3. Procedimiento

Las cargas transversales no se pueden aplicar de manera satisfactoria a algunas construcciones de paredes, como las de mampostería, con la muestra en posición horizontal. Para tales construcciones se aplican las cargas con la muestra en posición vertical, como se muestra en la figura 110, simulando condiciones de servicio.

La muestra, en un canal de acero, debe descansar sobre rodillos cilíndricos para evitar las condiciones de restricción final. Los ejes de los cilindros deben ser paralelos a las caras de la muestra. Los dos rodillos de apoyo mantienen contacto con la superficie vertical del marco y cada rodillo debe descansar, en posición horizontal, sobre goma espuma de 10 mm (0,4 pulgadas) de espesor, para evitar tensiones longitudinales. Cada uno de los dos rodillos de carga también debe descansar en goma espuma. Las cargas deben aplicarse horizontalmente, con un gato hidráulico, y deben medirse con un dinamómetro de anillo entre el conector y el espécimen.

El error en la carga que indica el dinamómetro no puede superar el uno por ciento. Uno a cada lado vertical de la muestra deben colocarse dos deflectómetros de cables tensionados con escala de espejo.

Figura 110. Prueba de carga transversal en muestras de pared



Fuente: Norma ASTM E72-02. p. 5.

5.2.4. Cálculos y reporte

Consiste en calcular los resultados de la prueba e informar al respecto, como se indica en los dos acápites siguientes. También debe cumplirse con el reporte de las lecturas del deflectómetro, con una precisión de 0,25 mm (0,01 pulg.)

5.2.4.1. Datos de carga-deflexión

Para cada micrómetro se calcula la flecha, bajo una carga dada, como la diferencia entre la lectura, con una precisión de la división del micrómetro cuando se aplica la carga y la lectura inicial. Seguidamente se calcula la desviación de la muestra para el período de la media de las deflexiones obtenidas de cada uno de los dos micrómetros. También se calculan los conjuntos en la carga inicial, mediante el uso de un método similar. En igual forma debe registrarse la carga máxima para cada muestra.

5.2.5. Descripción y resultados obtenidos del ensayo a flexión realizado en la Sección de Estructuras del CII de la USAC

Para el ensayo a flexión vertical se fabricaron tres ecopaneles idénticos. Para ello, se trató de reducir al máximo la presencia de diferencias marcadas, tanto en su construcción como en su mano de obra. Los ecopaneles miden 1,20 m de alto, 0,58 m de ancho y 0,10 m de espesor. Además, en su interior están formados por ocho ecocolumnas. Se utilizó un deformómetro colocado en la parte posterior con el que se midió el pandeo o flexión. Se colocó a $L/2$ del ecopanel, como se observa en las figuras 111 y 112 (Páginas 211 y 212).

Los rodillos de carga fueron colocados a $L/3$ del ecopanel. La barra de acero que se utilizó para distribuir la carga aplicada por el gato hidráulico fue instalada en el centro del ecopanel, tanto en sentido horizontal como vertical. La figura 113 muestra el resultado de este proceso. (Ver página 213).

Figura 111. **Montaje del equipo y el ecopanel para ser ensayado a flexión vertical**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 112. **Deformómetro colocado para medir la flexión que produce la aplicación de la carga transversal**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta figura se aprecia cómo es que se colocó el deformómetro a $L/2$ del ecopanel prefabricado; se coloca a $L/2$ porque esta es la parte del panel que más va a soportar los esfuerzos, y donde se van a apreciar las deformaciones.

Figura 113. Aplicación de la carga transversal por medio de un gato hidráulico ENERPAC



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

5.2.5.1. Ecopanel prefabricado No. 01

Luego del ensayo a flexión al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 1 se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla siguiente.

Tabla XLVII. **Datos obtenidos en el ensayo a flexión vertical**

Peso	173	lb	
Esfuerzo (psi)	Deformómetro (0,01 mm)		
0	7	0	
100	7	40	
200	8	40	
300	9	60	
400	10	53	
500	10	94	
600	11	8	
700	11	23	
800	11	37	
850	12	87	Primera grieta
900	13	81	
900	16	30	
950	1	55	

Fuente: elaboración propia.

Este esfuerzo, cuyos registros están anotados en la primera columna de la tabla número XLVII, es el aplicado por el gato hidráulico, pero para trazar la curva esfuerzo-deformación es necesario que el esfuerzo sea el soportado por el ecopanel. Esto significa que el esfuerzo del gato tiene que ser multiplicado por el área del gato, la cual se obtiene de las especificaciones que proporciona el fabricante, según la marca y el modelo del gato. En este caso, el gato

utilizado fue un ENERPAC RC1010, de 10 toneladas, y con un área de 2,24 plg². Al multiplicar el área por el esfuerzo del gato se obtiene la carga, en libras, aplicada por el gato.

Luego se convierte a kilogramos y como ya se conoce el área del ecopanel, se despeja cuál es el esfuerzo a flexión que soporta dicho elemento. Todos estos cálculos se trabajaron con la ayuda del software Microsoft Excel. A continuación se muestran los resultados.

Tabla XLVIII. **Resultados obtenidos después de trabajar los datos en Excel**

Área panel	580	cm ²		
Área gato	2,24	plg ²		
Esfuerzo (psi)	Carga (lb)	Carga (kg)	Deformación (mm)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
0	0	0	0	0
100	224	492,8	0,40	0,84965
200	448	985,6	1,40	1,69931
300	672	1 478,4	2,60	2,54896
400	896	1 971,2	3,53	3,39862
500	1 120	2 464,0	3,94	4,24827
600	1 344	2 956,8	4,08	5,09793
700	1 568	3 449,6	4,23	5,94758
800	1 792	3 942,4	4,37	6,79724
850	1 904	4 188,8	5,87	7,22206
900	2 016	4 435,2	6,81	7,64689
900	2 016	4 435,2	9,30	7,64689
950	2 128	4 681,6	14,55	8,07172

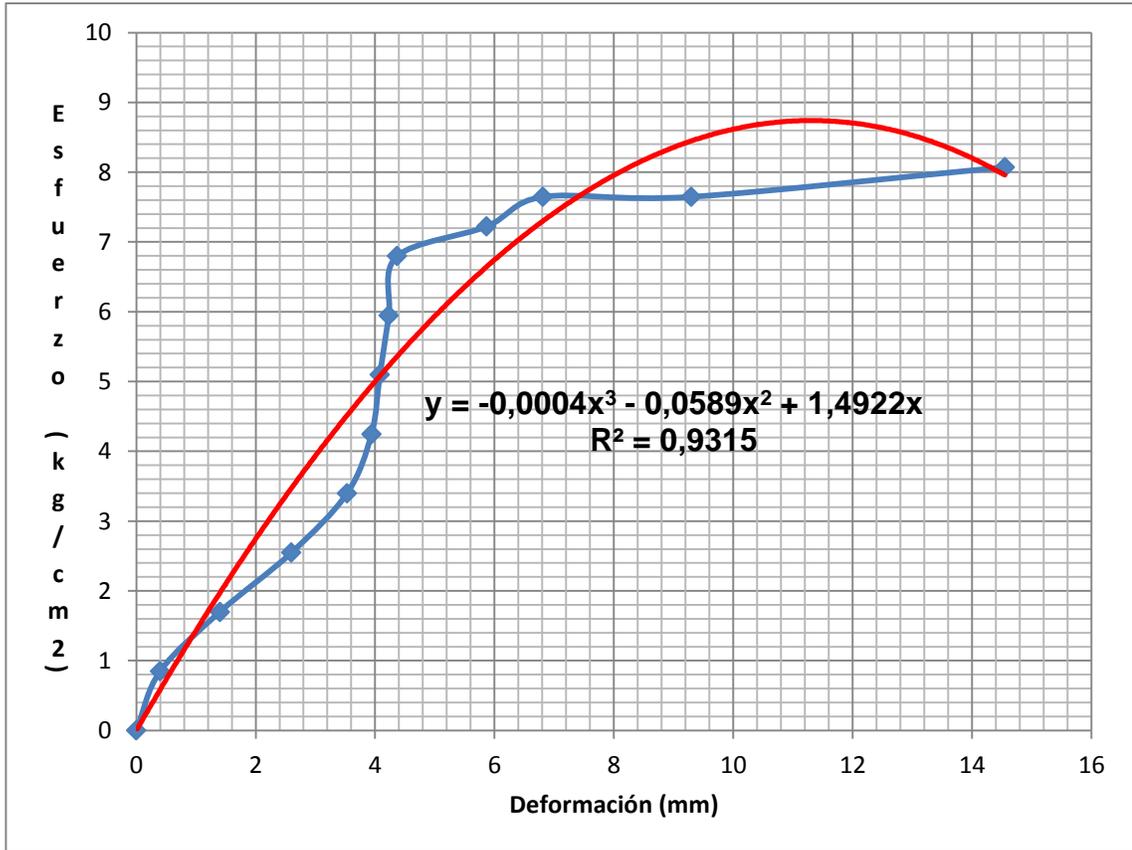
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación**

Esfuerzo (Kg/cm ²)	Deformación (mm)
0	0
0,84965	0,40
1,69931	1,40
2,54896	2,60
3,39862	3,53
4,24827	3,94
5,09793	4,08
5,94758	4,23
6,79724	4,37
7,22206	5,87
7,64689	6,81
7,64689	9,30
8,07172	14,55

Fuente: elaboración propia.

Figura 114. **Curva de esfuerzo – deformación del ensayo a flexión vertical del ecopanel No. 1**



Fuente: elaboración propia.

En este gráfico se muestra que el panel se deformó uniformemente entre los indicadores 0 a 3,53 mm. Esta es su zona elástica. Y en ella posee la capacidad de que al descargar el gato, el panel regresa a su forma inicial, sin presentar daños mayores a la estructura.

Pero en la zona de deformación comprendida entre los valores 3,53 a 4,37 mm, la malla de gallinero comenzó a fluir. Esta es, entonces, su zona de fluencia. En ella, el mortero y la malla soportan los esfuerzos de flexión. Es en este punto donde la malla de refuerzo comienza a trabajar.

Después de la deformación 4,37 mm se observa la zona plástica del panel. Es aquí donde este pierde la capacidad de volver a su forma original porque cada esfuerzo aplicado causa un daño considerable a la estructura. Como consecuencia de este hecho, el ecopanel deja de ser seguro estructuralmente.

5.2.5.2. Ecopanel prefabricado No. 02

Luego del ensayo a flexión al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 2 se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla que sigue.

Tabla L. **Datos obtenidos del ensayo a flexión vertical**

Peso	163,5	lb	
Esfuerzo (psi)	Deformómetro (0,01 mm)		
0	6	0,0	
100	7	5,0	
200	7	91,0	
300	8	75,0	
400	9	66,5	
500	10	37,0	Primera grieta
600	11	72,0	Segunda grieta

Continuación de la tabla L.

700	13	22,0	
800	15	5,0	Tercera grieta
850	3	35,0	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Resultados obtenidos después de trabajar los datos con Excel**

Área panel	580	cm ²		
Área gato	2,24	plg ²		
Esfuerzo (psi)	Carga (lb)	Carga (kg)	Deformación (mm)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0
100	224	492,8	1,05	0,84965
200	448	985,6	1,91	1,69931
300	672	1 478,4	2,75	2,54896
400	896	1 971,2	3,66	3,39862
500	1 120	2 464,0	4,37	4,24827
600	1 344	2 956,8	5,72	5,09793
700	1 568	3 449,6	7,22	5,94758
800	1 792	3 942,4	9,05	6,79724
850	1 904	4 188,8	17,35	7,22206

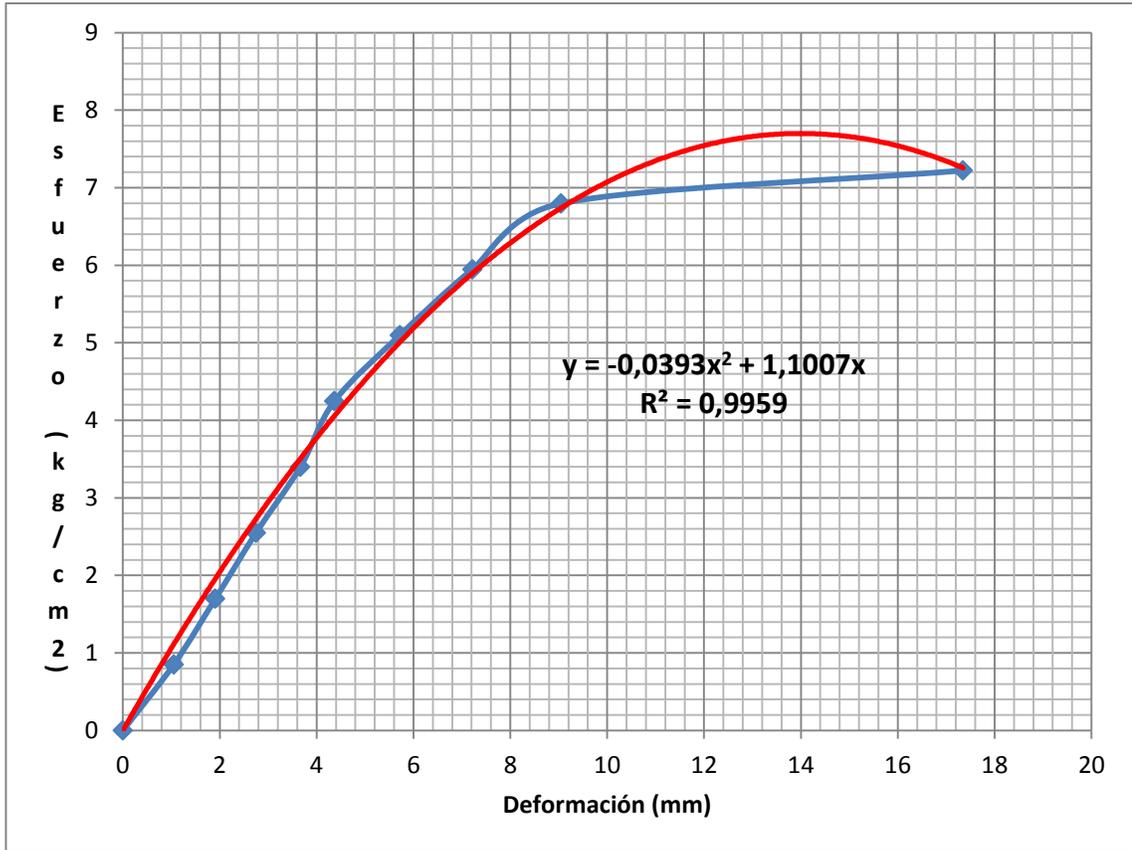
Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación**

Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación (mm)
0	0
0,84965	1,05
1,69931	1,91
2,54896	2,75
3,39862	3,65
4,24827	4,37
5,09793	5,72
5,94758	7,22
6,79724	9,05
7,22206	17,35

Fuente: elaboración propia.

Figura 115. **Curva de esfuerzo – deformación del ensayo a flexión vertical del ecopanel No. 2**



Fuente: elaboración propia.

Se espera que los elementos iguales se comporten de manera igual o similar: igual resistencia, iguales deformaciones. Esto es lo que da la pauta para poder utilizarlos en el diseño de una estructura con la seguridad de que todos los elementos utilizados responderán igual ante condiciones de servicio, y que no habrá ningún elemento que falle y provoque puntos débiles en la estructura.

En el caso del ecopanel evaluado en este trabajo de graduación, se observa que su zona elástica se encuentra dentro del mismo rango de deformaciones y esfuerzos del panel anterior. Esta condición transmite la seguridad de que al utilizar los ecopaneles prefabricados en una estructura, todos se comportarán de manera muy similar, sin tener elementos más débiles.

En este caso, la zona de fluencia muestra algún cambio, pues por lo que se observa, la malla mostró mayor resistencia ante los esfuerzos de flexión, y este comportamiento prolongó su zona de fluencia a un rango comprendido de 3,65 mm hasta 7,22 mm. Después de estos valores la gráfica muestra que las deformaciones son mayores respecto de la carga aplicada. Esto indica que el ecopanel está a punto de fallar y de llegar a su esfuerzo último que es igual a $7,22 \text{ kg/cm}^2$.

5.2.5.3. Ecopanel prefabricado No. 03

Luego del ensayo a flexión al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 3 se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla siguiente.

Tabla LIII. Datos obtenidos del ensayo a flexión vertical

Peso	173,5	lb	
Esfuerzo (psi)	Deformómetro (0,01 mm)		
0	19	0,0	
100	19	65,0	
200	0	45,0	
300	1	26,5	
400	2	8,5	
500	2	51,0	
600	2	63,5	Primera grieta
700	3	43,5	
800	5	10,0	
850	9	40,0	
850	15	0,0	
650	15	49,0	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. **Resultados obtenidos después de trabajar los datos en Excel**

Área panel	580	cm ²			
Área gato	2,24	plg ²			
Esfuerzo (psi)	Carga (lb)	Carga (kg)	Deformación (mm)	Esfuerzo (kg/cm ²)	
0	0	0	0	0	
100	224	492,8	0,65	0,38620	
200	448	985,6	1,45	0,77241	
300	672	1 478,4	2,26	1,15862	
400	896	1 971,2	3,08	1,54482	
500	1 120	2 464,0	3,51	1,93103	
600	1 344	2 956,8	3,63	2,31724	
700	1 568	3 449,6	4,43	2,70344	
800	1 792	3 942,4	6,10	3,08965	
850	1 904	4 188,8	10,40	3,28275	
850	1 904	4 188,8	16,00	3,28275	
650	1 456	3 203,2	16,49	2,51034	

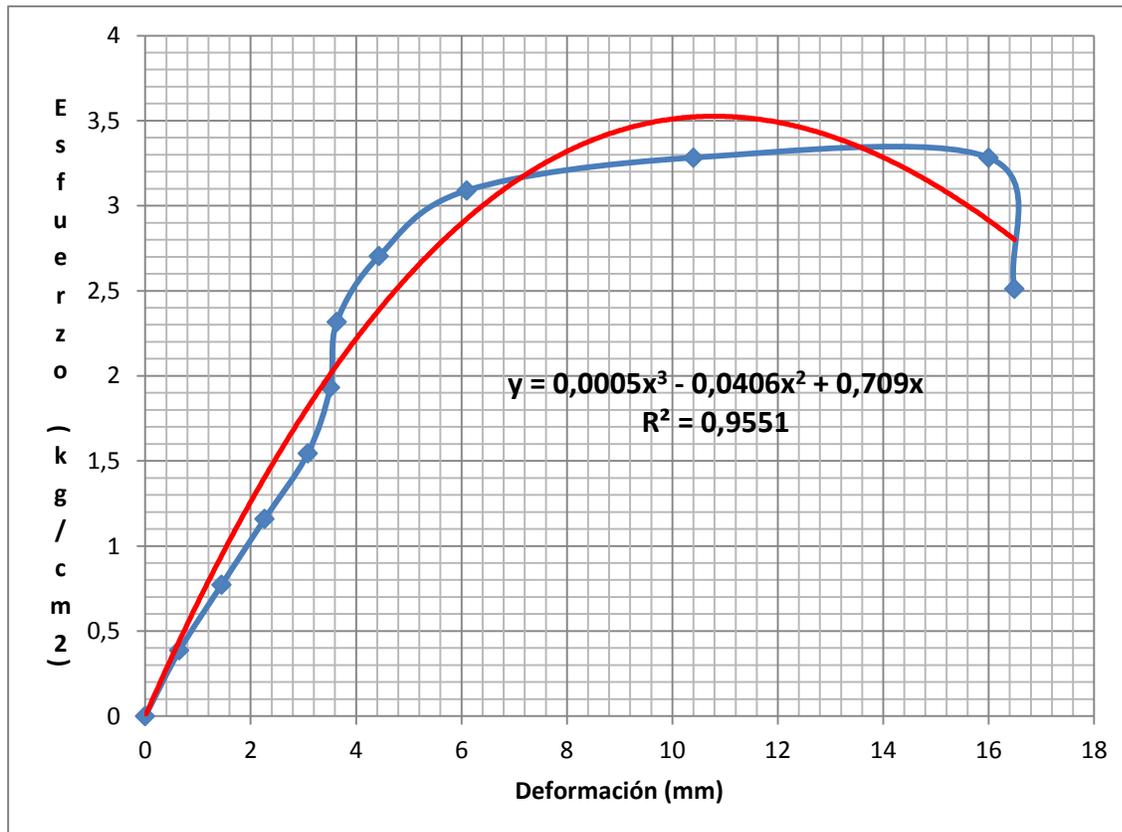
Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Datos utilizados para plotear la curva de esfuerzo – deformación**

Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación (mm)
0	0
0,38620	0,65
0,77241	1,45
1,15862	2,26
1,54482	3,08
1,93103	3,51
2,31724	3,63
2,70344	4,43
3,08965	6,10
3,28275	10,40
3,28275	16,00
2,51034	16,49

Fuente: elaboración propia.

Figura 116. **Curva de esfuerzo – deformación del ensayo a flexión vertical del ecopanel No. 3**



Fuente: elaboración propia.

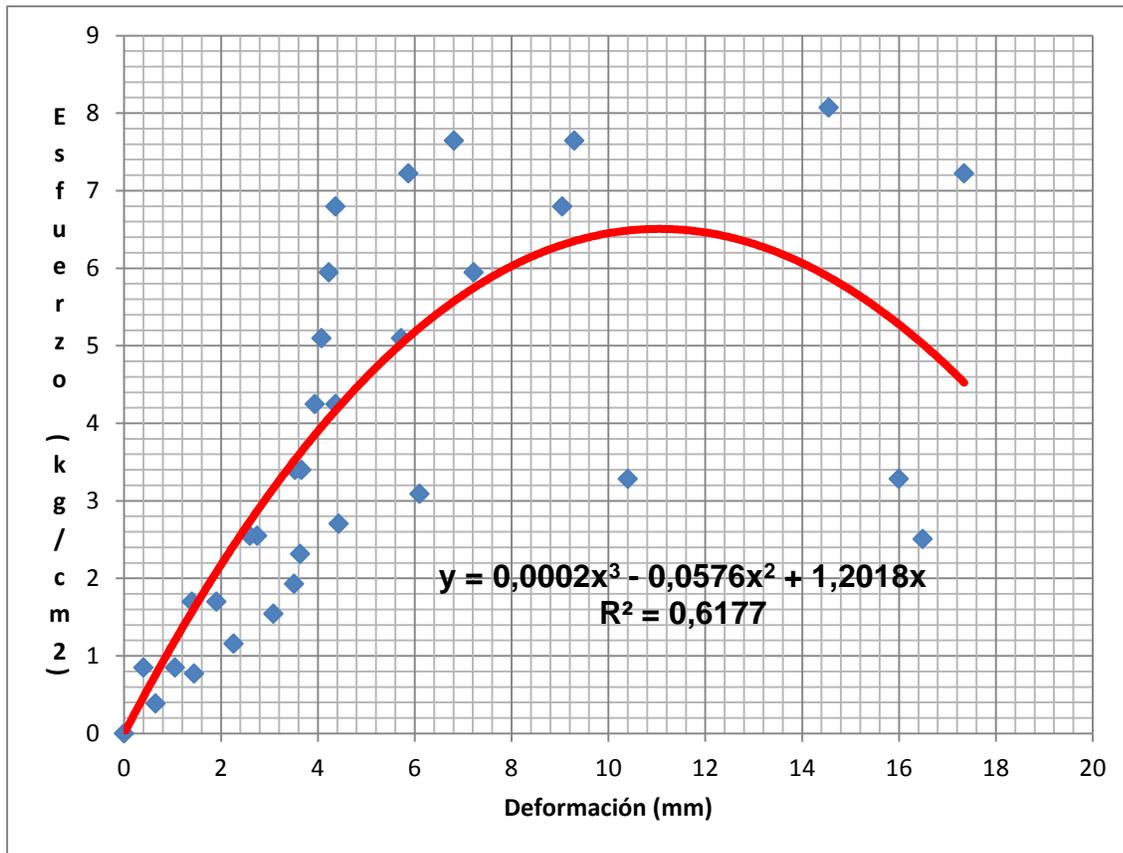
En este gráfico se observa que la zona elástica se mantiene dentro del mismo rango de deformaciones, aunque no ocurre lo mismo en el caso de la resistencia a los esfuerzos, puesto que aun cuando sus deformaciones son similares a las de los otros paneles, sus esfuerzos son menores. Esta disminución de los esfuerzos soportados podría deberse a que la cara posterior a la aplicación de la carga, que es la que soporta en mayor grado los esfuerzos a flexión, no tiene el espesor adecuado y necesario en el recubrimiento, y esta deficiencia provoca la reducción de esfuerzos.

También se observa que la zona de fluencia se mantiene dentro del mismo rango de deformaciones, pero muestra esfuerzos menores a los de los otros dos ecopaneles. Esfuerzos ubicados desde la deformación 3,51 mm hasta la deformación 6,10 mm. El resto de la gráfica se entiende como su zona plástica, que es donde el panel perdió toda la capacidad de volver a su condición inicial sin presentar daños en su estructura y está a punto de alcanzar su esfuerzo último que es igual a 2,51 kg/cm².

5.2.6. Promedio entre gráficas

Con la ayuda del software Excel se plotearon en una sola gráfica los datos de los tres ecopaneles mostrados anteriormente. Esto se hace con el propósito de que se observen en mejor forma el comportamiento que presentan los paneles y que, al diseñar una estructura a flexión, se cuente con la información necesaria, basada en los datos que se obtuvieron del promedio entre gráficas o, lo que es igual, de la línea de tendencia que se visualiza en la imagen.

Figura 117. Promedio de la curva de esfuerzo – deformación de los tres ecopaneles, con su línea de tendencia



Fuente: elaboración propia.

En esta gráfica se observan los valores de los tres ecopaneles. En concordancia con lo expuesto en los gráficos anteriores, sus zonas elásticas, aunque con valores de esfuerzo diferentes, se encuentran dentro del mismo rango de deformaciones. De igual forma, la zona de fluencia de cada panel es similar a la de los otros, así como su zona plástica.

Esta comparación que se hace entre un panel y otro es importante para saber que, aun con valores de esfuerzo diferentes, siempre se puede esperar que los ecopaneles se deformen de manera similar ante condiciones de servicio.

En la siguiente secuencia fotográfica se muestran escenas del ensayo que se realizó con los ecopaneles en la sección de estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 118. **Agrietamiento en la parte posterior del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La pequeña grieta horizontal, resaltada con color negro, debajo del deformómetro, está ubicada exactamente detrás del rodillo de carga colocado a $L/3$. Este es el punto donde el panel soporta la carga aplicada por el gato.

Figura 119. **Agrietamiento del ecopanel, resaltado con color negro**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta fotografía se observan con mayor precisión las grietas que se muestran en la figura 118: están ubicadas exactamente atrás de los rodillos de carga, colocados a $L/3$ del ecopanel.

Figura 120. **Agrietamiento tanto en la parte de atrás como a un costado del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La constante aplicación de la carga causa el agrandamiento de las grietas y su desplazamiento hacia los costados del ecopanel. Consecuentemente el mortero empieza a fallar.

Figura 121. Fractura del recubrimiento del ecopanel debido a la aplicación de la carga transversal



Fuente: CII, Sección de Estructuras

La cámara captó el punto donde el mortero comenzó a desprenderse. Esta falla es la causa de que la malla de refuerzo, junto con las secciones de mortero que no han fallado, empiecen a soportar los esfuerzos flexionantes. Dicho en otras palabras, lo que se observa es la zona de fluencia del ecopanel.

Figura 122. **Grietas resaltadas con líneas de colores**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En el ensayo de este ecopanel se produjeron las grietas típicas en la parte de atrás de los rodillos de carga. También se mira en la gráfica cómo aparecen otras grietas, en la zona que está soportando los esfuerzos de flexión, resaltados con líneas de colores.

Figura 123. **Fractura del recubrimiento, a un costado del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Esta fotografía muestra la forma como se abren las grietas en la parte de atrás de los ecopaneles. Conforme se sigue aplicando carga con el gato, las grietas se agrandan y se prolongan hasta los costados del panel, como se observa en la imagen.

Figura 124. **Ecopanel prefabricado, pandeado después de aplicarle la carga transversal**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La fotografía muestra cómo el panel se va flexionando conforme se produce la aplicación de la carga.

Figura 125. **Descascaramiento del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Esta es la zona de fluencia del ecopanel. El mortero se fractura y la malla comienza a fluir, conforme recibe los esfuerzos aplicados por el gato hidráulico.

Figura 126. **Falla transversal del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La continua aplicación de la carga fractura al mortero, mientras que la malla comienza a fluir ante la presión que ejercen sobre ella los esfuerzos de flexión.

Figura 127. **Fractura del recubrimiento posterior del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La fotografía muestra la falla del ecopanel. El mortero dejó de trabajar y la malla de gallinero ya no soportó los esfuerzos aplicados por el gato hidráulico.

5.3. Ensayo a carga de impacto, según la Norma ASTM E695-03

Para llevar a cabo el ensayo a carga de impacto, según la norma, es necesario poner especial atención a los procedimientos y recomendaciones descritos a continuación.

5.3.1. Alcances

- Este método de prueba se refiere a la medición de la resistencia relativa a cargas de impacto en la construcción de paredes, pisos y techos. La prueba no es aplicable a las puertas.
- Los valores indicados en unidades del sistema internacional (SI) deben ser considerados, según la norma.
- Esta norma no pretende señalar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de la norma establecer la seguridad, las prácticas apropiadas de salud, y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.

5.3.2. Significado y uso

- Los procedimientos descritos ofrecen datos que pueden ser utilizados para evaluar el desempeño relativo de paredes, pisos y techos de las construcciones, en condiciones representativas del desempeño relativo sostenido en servicio activo, cuando están sometidos a impacto con un objeto contundente pesado.

- El método está diseñado de modo que pueda aplicarse a construcciones relativamente ligeras, incluyendo suelos de madera, sistemas de techos o de cubiertas de techos, tabiques enmarcados con madera o postes de acero, pisos de acero o revestimientos de acero, paneles de pared o de hormigón fino, muros de mampostería o bloques y conjuntos similares, pero no limitado a este tipo de construcciones.

5.3.3. Resumen del método

Las muestras de pared, piso y techo de la construcción son sometidas a la fuerza del impacto de un instrumento de impacto estándar. Las secciones de pared se ponen a prueba en posición vertical. Las de piso y techo se ponen a prueba sólo en posición horizontal. Debido a las diferencias inherentes al método de aplicación de la carga, las mediciones que se obtienen de las pruebas en un modo horizontal no son comparables con las mediciones que se registran en las pruebas en modo vertical.

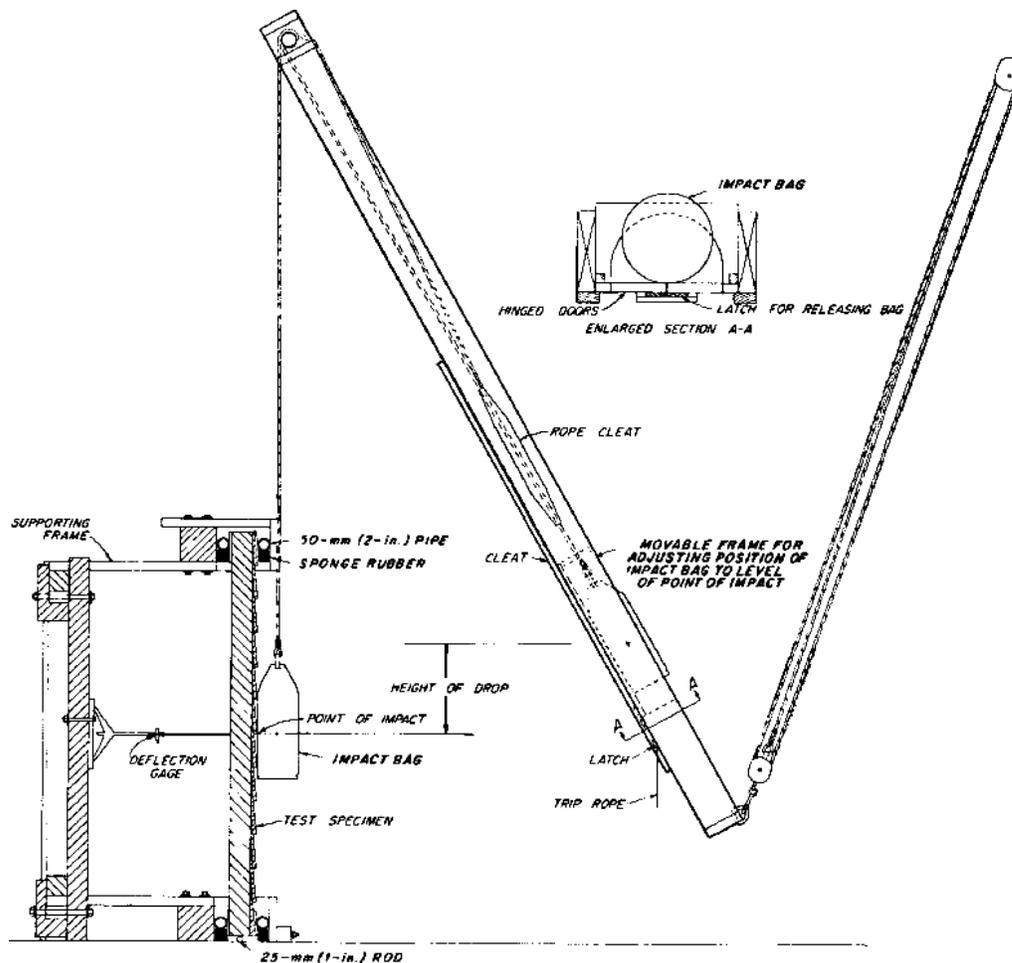
5.3.4. Aparatos para sistemas de pared, muestras verticales

Pueden citarse los siguientes:

- Canales de acero, para el apoyo de la muestra en la parte superior e inferior.
- Rodillos, rodillos cilíndricos, y dos rodillos de apoyo.
- Bolsa de impacto, varas de medir, deflectómetro, conjunto de indicadores, y bloques patrón.

- Estructura rígida de apoyo, para que los canales de acero y el medidor de deflexión se adhieran.

Figura 128. **Ensayo de carga de impacto (muestra vertical)**



Fuente: Norma ASTM E695-03, p. 4.

5.3.5. Muestras de prueba

A continuación se describen las características que deben tener las muestras que se deseen poner a prueba utilizando esta norma.

5.3.5.1. Tamaño

Las muestras deben ser representativas de la construcción real en cuanto a material, método de montaje y mano de obra.

5.3.5.2. Longitud o altura

La longitud o la altura de la muestra, para cada elemento, serán determinadas de modo que se aproximen a la del elemento en su tamaño real.

5.3.5.3. Ancho

El ancho de la muestra será determinado, en la medida de lo posible, de manera que permita incorporar varios de los principales miembros de soporte de carga para asegurar que el comportamiento bajo carga que se va a simular, prevea las condiciones de servicio. El ancho real de los paneles prefabricados será la anchura del panel utilizado.

5.3.5.4. Edad

Construcciones como el hormigón y la mampostería (ladrillos, baldosas de arcilla para construcción, bloques de hormigón) para los que las propiedades estructurales dependen de la edad de los especímenes, se someten a prueba no menos de 25 días ni más de 56, después de su fabricación, excepto en situaciones especiales, como el caso de los paneles existentes.

5.3.5.5. Cantidad

La prueba debe efectuarse con un mínimo de tres muestras. Sin embargo, se harán las pruebas que sean necesarias, en función de la información y la precisión que se desea.

5.3.6. Procedimiento

Establece los pasos que deben seguirse para el desarrollo del proyecto y el orden en que deben darse.

5.3.6.1. Puntos de impacto

Si la construcción cuenta con miembros estructurales como postes o vigas, debe probarse cada muestra para que al menos uno de los miembros estructurales sea golpeado por la bolsa de impacto. También debe ensayarse cada ejemplar para que la bolsa de impacto golpee de frente, a medio camino, entre los dos miembros.

5.3.6.2. Muestra de ensamblajes de pared con carga vertical

Se coloca la muestra sobre rodillos cilíndricos para evitar restricciones transversales. Los ejes de los cilindros deben ser paralelos a las caras de los ejemplares. Los dos rodillos de apoyo contactarán con la superficie vertical de la estructura rígida, y cada rodillo debe descansar en posición horizontal sobre una esponja de goma para evitar tensiones longitudinales. La bolsa debe ser apoyada, como un péndulo, sobre el bastidor, en la forma que se muestra en la figura 128.

Debe asegurarse que los pisadores no afecten la desviación de la muestra. La carga de impacto debe aplicarse en la mitad de la cara exterior de las muestras, mediante la liberación de la bolsa, a una altura inicial de 152 mm \pm 6 mm (6 \pm 1 / 4 de pulgada), que aumentará en esta forma: 152 mm \pm 3 mm (6 \pm 1 / 4 pulgadas).

La altura máxima útil de la caída se produce cuando el péndulo, o el marco, quedan en posición perpendicular a la muestra. La altura de la caída se mide del punto de impacto del centro de gravedad de la bolsa, cuando esta se encuentra en la posición elevada, ya que ataca la muestra en este mismo. Debe liberarse la bolsa suavemente, y con rapidez, abriendo las puertas articuladas, entonces la bolsa se balancea como un péndulo real, y elimina, con ello, el bamboleo.

5.3.6.3. Deformación instantánea

Para medir la deformación instantánea de la muestra se utiliza el deflectómetro. Antes de la carga de impacto, la varilla de metal ligero debe mantenerse en contacto con el centro de la cara inferior de la muestra de la abrazadera. Cuando la muestra se desvía en la carga de impacto, la barra se mantiene en la posición más baja de la abrazadera de fricción. Debe presentarse un informe de las lecturas, con una precisión de 0,25 mm (0,01 pulgadas).

5.3.7. Registros

Es necesario llevar un registro de cada una de las alturas de caída, que posteriormente serán usadas para efectuar los cálculos necesarios y así poder llegar a una conclusión acerca de la muestra ensayada.

5.3.7.1. Desviación y ajuste

Para cada altura de caída se debe calcular la desviación entre la lectura del deflectómetro y la lectura inicial. Del mismo modo, se debe calcular el conjunto de la diferencia entre la lectura del medidor y el conjunto de la lectura inicial. Finalmente debe registrarse la altura máxima de caída.

5.3.8. Descripción y resultados obtenidos en el ensayo a carga de impacto realizado en la sección de estructuras del CII de la USAC

Se armaron tres ecopaneles iguales, y se trató de que, entre ellos, no existieran diferencias marcadas tanto en su fabricación como en los materiales utilizados y en la mano de obra empleados. El equipo seleccionado se preparó tal y como se muestra en las figuras 129 y 130 (páginas 248 y 249). El deformómetro con el que se midió la flexión permanente que se iba generando después de cada aplicación de la carga de impacto se colocó en el centro del ecopanel prefabricado, como se ve en la figura 130.

Este deformómetro también sirvió para medir el rebote, ya que al aplicar la carga de impacto, la barra de medición se desplazaba hacia atrás, pero no volvía al punto de contacto y permitía tomar la lectura de cuánto se desplazaba hacia atrás. Esto significa que cuando la bolsa golpeó al ecopanel llevaba cierta energía potencial que provoca el impacto que desplaza hacia atrás la muestra, entonces, dependiendo de qué tanta deformación afecte al ecopanel prefabricado, se puede deducir qué tanta energía absorbe y disipa.

La bolsa que se usó era de cuero y se llenó con arena de río que se paso por un tamiz de un cuarto de pulgada. Para el ensayo tuvo un peso de 25 kilogramos. El punto de aplicación de la carga en el panel fue a $L/2$ y, de igual manera, el centro de la bolsa golpeaba al ecopanel.

Según la descripción del ensayo que brinda la norma, la bolsa se debe colocar como una especie de péndulo, y la carga que se aplique depende de la altura, en sentido vertical, que se le dé a la bolsa. Esto significa que cada vez que la altura vertical aumente, la bolsa debe describir un arco hasta alcanzar la altura seleccionada. Para el ensayo que se describe en este informe, a partir de la altura inicial, que corresponde al centro del ecopanel con el centro de la bolsa, la altura registró aumentos verticales de 15 cm, y mantuvo esa tendencia hasta que fue imposible continuar con el ensayo debido a la falla total del ecopanel prefabricado.

Figura 129. **Montaje del equipo y de la muestra para ser ensayada a carga de impacto**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Figura 130. **Deformómetro utilizado para medir la deformación y el rebote al aplicar la carga de impacto**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

5.3.8.1. Ecopanel prefabricado No. 1

Luego del ensayo al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 1 se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla que sigue.

Tabla LVI. Datos obtenidos del ensayo a carga de impacto

Peso panel	166,5 lb			
Peso bolsa	25 kg			
Altura (cm)	Deformómetro (cm)			Observaciones
	Inicial	Rebote	Deformación permanente (cm)	
0	0	0	0	
81,5	16,3	16,35	16,30	
96,5	16,30	16,40	16,31	
111,5	16,31	16,40	16,31	
126,5	16,31	16,40	16,31	
141,5	16,31	16,41	16,31	
156,5	16,31	16,41	16,31	
171,5	16,31	16,60	16,40	Primera grieta, fisura en la parte de atrás.
186,5	16,40	17,90	17,30	Segunda grieta, fisura llega a medio panel.
201,5	17,30	20,90	18,70	Fisura se percibe al frente del panel.
216,5	18,70			Topó el deformómetro y se partió toda la malla de atrás.

Fuente: elaboración propia.

La lectura de rebote es la que registra el deformómetro después de que la bolsa golpea al panel. La deformación permanente es la lectura que da el deformómetro después de que su punta contacta nuevamente con el ecopanel.

Tabla LVII. **Resultados obtenidos después de trabajar los datos con Excel**

Energía potencial	mgh			
Altura (h) en m	Gravedad (g) en (m/s ²)	Masa (m) en (kg)	Energía (Joule)	Deformación (cm)
0	9,8	25	0	
0,815	9,8	25	199,675	0
0,965	9,8	25	236,425	0,01
1,115	9,8	25	273,175	0,01
1,265	9,8	25	309,925	0,01
1,415	9,8	25	346,675	0,01
1,565	9,8	25	383,425	0,01
1,715	9,8	25	420,175	0,10
1,865	9,8	25	456,925	1,00
2,015	9,8	25	493,675	2,40
2,165	9,8	25	530,425	2,50

Fuente: elaboración propia.

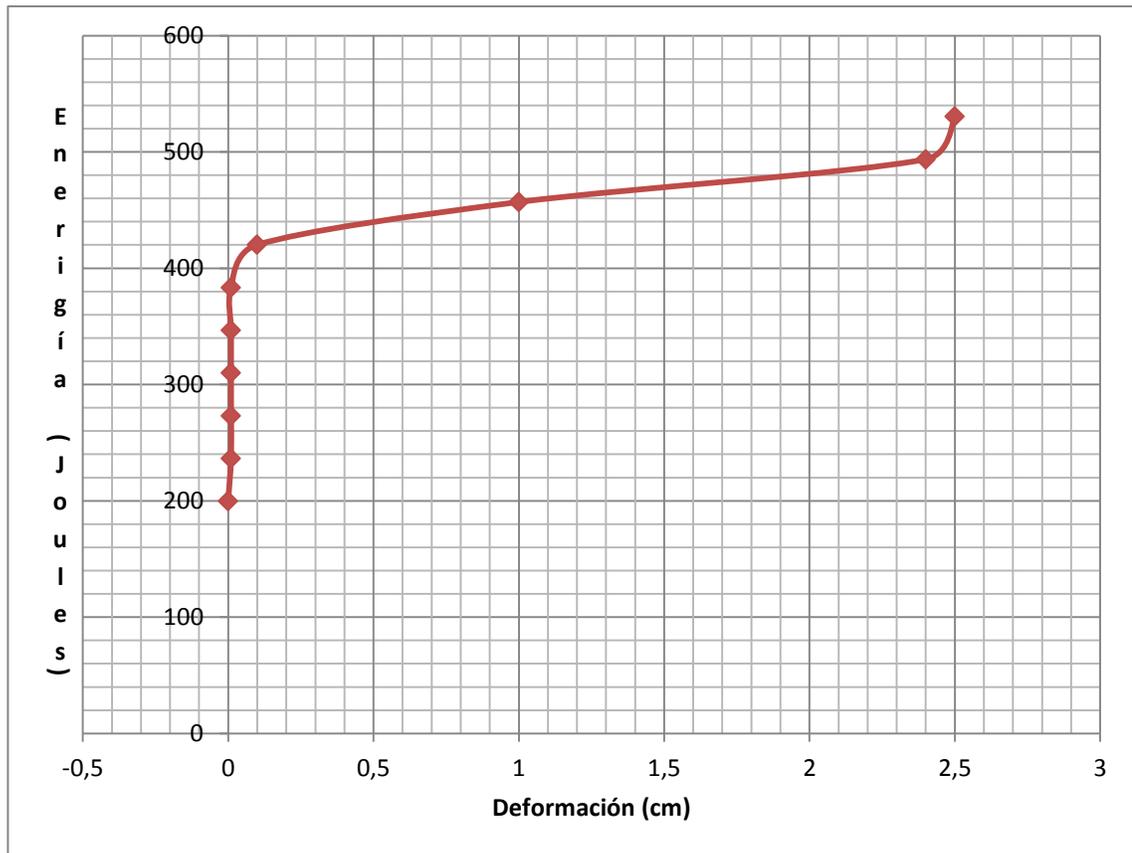
En el momento en que la bolsa golpea al ecopanel lleva cierta energía cinética que se convierte en energía potencial, dependiendo de la altura a la que fue soltada la bolsa, ya que tanto la masa de la bolsa como la gravedad son constantes.

Tabla LVIII. **Datos utilizados para plotear la curva de energía – deformación**

Energía (<i>Joule</i>)	Deformación (cm)
0	
199,675	0
236,425	0,01
273,175	0,01
309,925	0,01
346,675	0,01
383,425	0,01
420,175	0,10
456,925	1,00
493,675	2,40
530,425	2,50

Fuente: elaboración propia.

Figura 131. **Curva de energía – deformación del ensayo a carga de impacto del ecopanel No. 1**



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la gráfica, hasta el valor de energía igual a 383,425 *Joules* se tienen valores de deformación iguales a cero, o próximos a cero. Esto significa que el ecopanel tiene la capacidad de disipar impactos con valores de energía iguales sin sufrir ningún tipo de deformación que le afecte. Esta capacidad se la brindan las ecocolumnas, ya que por ser elaboradas con material plástico poseen una mayor capacidad que el mortero para disipar la energía.

Después de este valor (383,425 *Joules*), el ecopanel empieza a presentar deformaciones de hasta 2,5 centímetros, aparecen daños considerables en su estructura y alcanza una energía máxima soportada de 530,425 *Joules*.

5.3.8.2. Ecopanel prefabricado No. 2

Luego del ensayo al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 2 se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla siguiente.

Tabla LIX. **Datos obtenidos del ensayo a carga de impacto**

Peso panel	170 lb			
Peso bolsa	25 kg			
Altura (cm)	Deformómetro (cm)			Observaciones
	Inicial	Rebote	Deformación permanente (cm)	
0	0	0	0	
66	15,70	15,8	15,70	
81	15,70	15,8	15,70	
96	15,70	15,8	15,71	
111	15,71	15,8	15,71	
126	15,71	15,8	15,71	
141	15,71	15,9	15,80	Agrietamiento
156	15,80	16,0	15,81	
171	15,81	16,1	15,90	Agrietamiento

Continuación de la tabla LIX.

186	15,90	16,8	16,30	Descascaramiento más rajadura a lo ancho del panel.
201	16,30	17,6	16,85	Topó el deformómetro y se partió toda la malla de atrás.
216	16,85	20,1	17,80	Se rajó al frente, se rompió la malla

Fuente: elaboración propia.

Tabla LX. **Resultados obtenidos usando Excel**

Energía potencial	mgh			
Altura (h) en m	Gravedad (g) en (m/s ²)	Masa (m) en (kg)	Energía (<i>Joule</i>)	Deformación (cm)
0,66	9,8	25	161,70	0
0,81	9,8	25	198,45	0
0,96	9,8	25	235,20	0,01
1,11	9,8	25	271,95	0,01
1,26	9,8	25	308,70	0,01
1,41	9,8	25	345,45	0,10
1,56	9,8	25	382,20	0,11
1,71	9,8	25	418,95	0,20
1,86	9,8	25	455,70	0,60
2,01	9,8	25	492,45	1,15
2,16	9,8	25	529,20	2,10

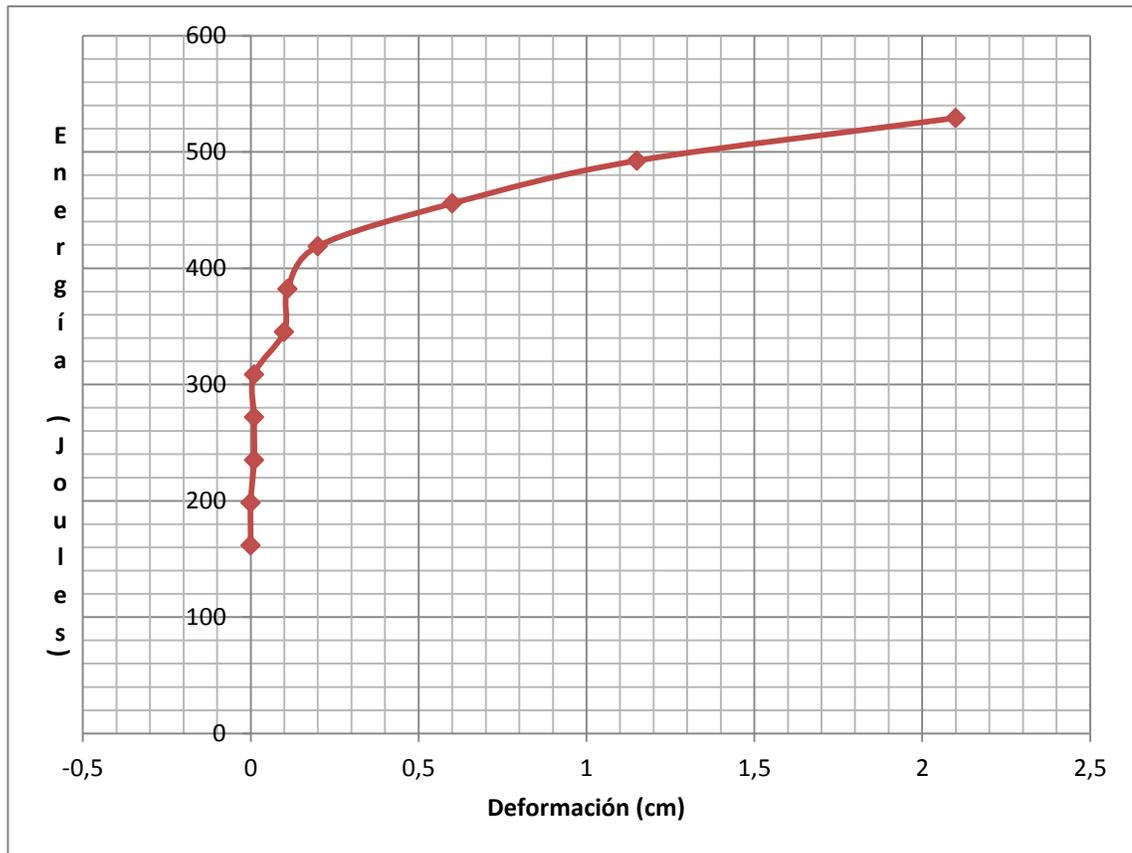
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Datos utilizados para plotear la curva de energía – deformación**

Energía (<i>Joule</i>)	Deformación (cm)
16,70	0
198,45	0
235,20	0,01
271,95	0,01
308,70	0,01
345,45	0,10
382,20	0,11
418,95	0,20
455,70	0,60
492,45	1,15
529,20	2,10

Fuente: elaboración propia.

Figura 132. **Curva de energía – deformación del ensayo a carga de impacto del ecopanel No. 2**



Fuente: elaboración propia.

En esta gráfica se vuelven a presentar los valores de deformación cero, o próximos a cero, que corresponden a ciertos valores de energía aplicada por el impacto de la bolsa. Esto significa que el ecopanel posee la capacidad de absorber y disipar hasta 308,70 *Joules* de energía, sin presentar ninguna deformación.

Este ecopanel, como el anterior, soportó una energía máxima de 529,20 *Joules* que corresponde a una deformación de 2,10 centímetros, valores muy parecidos a los que mostró el panel anterior.

5.3.8.3. Ecopanel prefabricado No. 3

Luego del ensayo al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 3 se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla siguiente.

Tabla LXII. **Datos obtenidos del ensayo a carga de impacto**

Peso panel	160 lb			
Peso bolsa	25 kg			
Altura (cm)	Deformómetro (cm)			Observaciones
	Inicial	Rebote	Deformación permanente	
70	16,00	16,00	16,00	
85	16,00	16,00	16,00	
100	16,00	16,01	16,00	
115	16,00	16,01	16,00	
130	16,00	16,01	16,00	
145	16,00	16,05	16,00	
160	16,00	16,05	16,00	
175	16,00	16,05	16,00	
190	16,00	16,10	16,00	
205	16,00	16,10	16,00	
220	16,00	16,10	16,00	
235	16,00	16,60	16,35	Fisura

Continuación de la tabla LXII.

250	16,35	19,40	17,50	Fisura adelante, se rompió la malla.
265	17,30			Topó el deformómetro.

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIII. **Resultados obtenidos después de trabajar los datos con Excel**

Energía potencial	mgh			
Altura (h) en m	Gravedad (g) en (m/s ²)	Masa (m) en (kg)	Energía (Joule)	Deformación (cm)
0,70	9,8	25	171,50	0,00
0,85	9,8	25	208,25	0,00
1,00	9,8	25	245,00	0,00
1,15	9,8	25	281,75	0,00
1,30	9,8	25	318,50	0,00
1,45	9,8	25	355,25	0,00
1,60	9,8	25	392,00	0,00
1,75	9,8	25	428,75	0,00
1,90	9,8	25	465,50	0,00
2,05	9,8	25	502,25	0,00
2,20	9,8	25	539,00	0,00
2,35	9,8	25	575,75	0,35
2,50	9,8	25	612,50	1,50
2,65	9,8	25	649,25	1,60

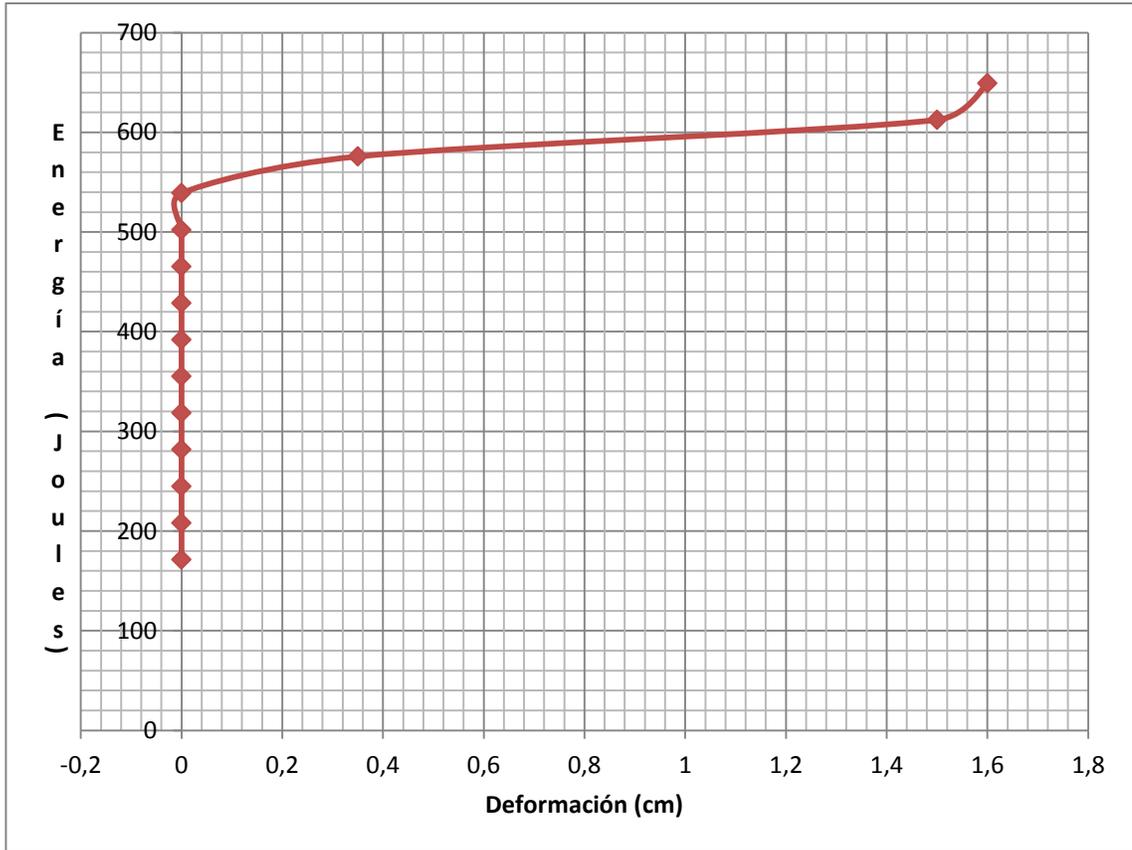
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIV. **Datos utilizados para plotear la curva de energía – deformación**

Energía (<i>Joule</i>)	Deformación (cm)
171,50	0,00
208,25	0,00
245,00	0,00
281,75	0,00
318,50	0,00
355,25	0,00
392,00	0,00
428,75	0,00
465,50	0,00
502,25	0,00
539,00	0,00
575,75	0,35
612,50	1,50
649,25	1,60

Fuente: elaboración propia.

Figura 133. **Curva de energía – deformación del ensayo a carga de impacto del ecopanel No. 3**



Fuente: elaboración propia.

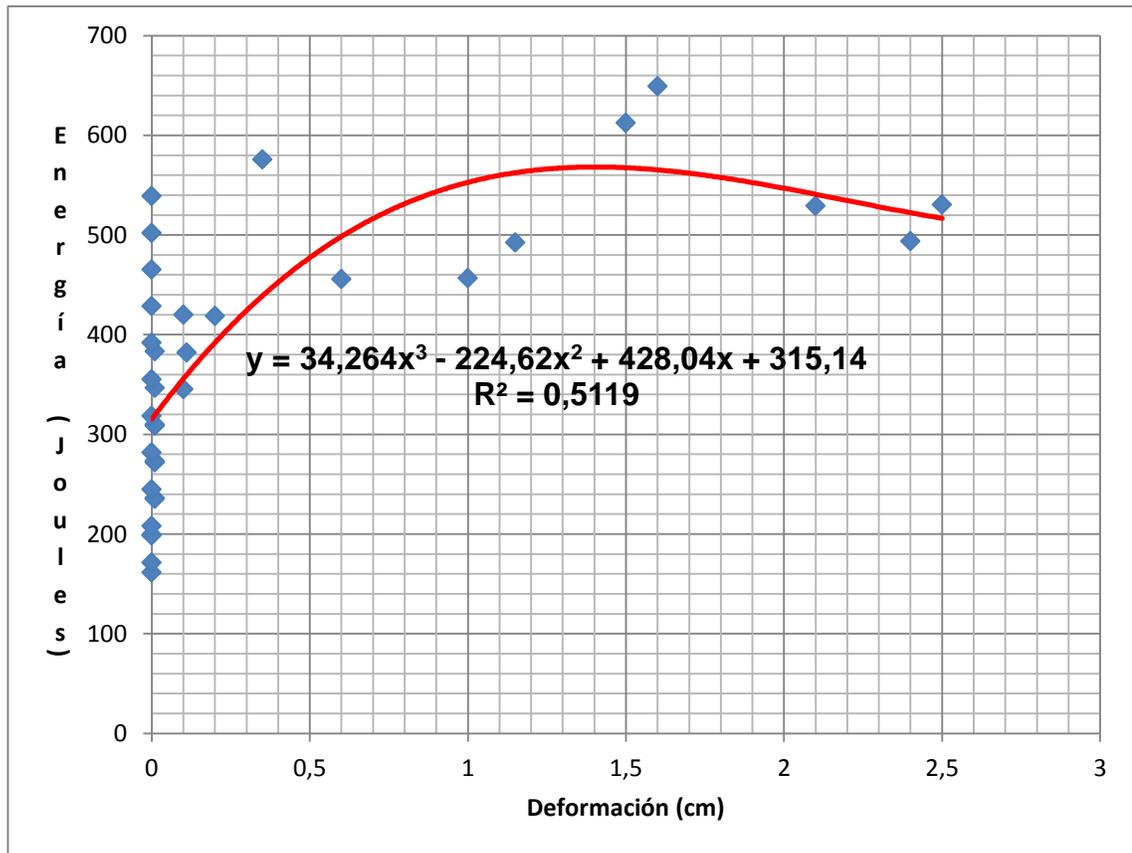
En esta gráfica se observa que el ecopanel número tres fue capaz de soportar y disipar energías de hasta 539,00 *Joules*, sin presentar ningún tipo de deformación. Esto se debe a que las botellas de este panel disiparon más energía que las de los paneles anteriores.

De igual manera, la energía máxima registrada por este ecopanel fue igual a 649,25 *Joules*, con una deformación de 1,6 centímetros, lo cual evidencia que este panel se comportó de manera más eficiente que los dos anteriores.

5.3.9. Promedio entre gráficas

Con la ayuda del software Excel se plotan, en una sola gráfica, los datos que se obtuvieron del ensayo a carga de impacto de cada ecopanel. El propósito de este procedimiento consiste en comparar entre sí el comportamiento de los tres ecopaneles y, al mismo tiempo, obtener una línea general de tendencia que pueda ser aprovechada para obtener los valores necesarios que posibiliten el diseño técnico y confiable de una estructura a impacto.

Figura 134. Promedio de la curva de esfuerzo – deformación de los tres ecopaneles, con su línea de tendencia



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se observa que existen muchos valores de deformación cero, que corresponden a ciertos valores de energía. De esto se infiere que, al recibir el impacto producido por la bolsa, el ecopanel prefabricado tiene la capacidad de absorber y disipar la energía, por lo cual presenta valores de deformación iguales o cercanos a cero.

Esta capacidad del ecopanel se debe a que en su interior se encuentran las ecocolumnas fabricadas con botellas plásticas, que le proporcionan al ecopanel no sólo resistencia estructural sino también al impacto.

La siguiente secuencia fotográfica muestra algunos de los problemas que ocurrieron durante el proceso de ensayo y evaluación al que fueron sometidos los tres ecopaneles.

Figura 135. **Agrietamiento del ecopanel prefabricado, después de aplicarle la carga de impacto**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Luego de recibir el impacto de la bolsa, apareció el agrietamiento que se observa en la gráfica, en el punto medio de la estructura del ecopanel.

Figura 136. **Agrietamiento horizontal en el ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La grieta que se mostró en la figura 135 aparece en esta fotografía vista desde otro ángulo. Nótese que está en el centro del ecopanel, y que lo atraviesa de un extremo al otro.

Figura 137. **Agrietamiento a un costado del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La grieta que apareció en el centro, en la parte de atrás del ecopanel, llega a un costado del mismo y se abren otras grietas como las que se observan en la fotografía. Éstas son causadas por la aplicación constante de la carga de impacto de la bolsa.

Figura 138. **Ensanchamiento de la grieta horizontal provocada por la aplicación continua de la carga de impacto**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Mientras el ensayo avanza, las grietas se agrandaron, como lo muestra la fotografía. Esto se debe a que el panel se flexiona cada vez más con lo cual provoca el ensanchamiento de las grietas y la fractura del mortero.

Figura 139. **Agrietamiento a un costado del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La fotografía muestra cómo las grietas no sólo se hacen más grandes en la parte de atrás del panel sino que también llegan hasta los costados, y fracturan el panel en dos.

Figura 140. **Mínimo agrietamiento en el frente del ecopanel, lugar donde se aplica la carga de impacto**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aunque no se logra ver en la fotografía, después de que las grietas de atrás y de los costados se agrandaron, ahora se presenta una fisura en la parte frontal, lugar donde se está aplicando la carga de impacto. Esto quiere decir que el ecopanel está a punto de fallar.

Figura 141. **Aumento en el tamaño de la grieta, producido por la aplicación de la carga de impacto**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Aquí se observa cómo el mortero se fracturó y la malla de gallinero comenzó a fluir, con lo cual le da un poco más de resistencia al ecopanel; aunque, en realidad, el panel ya no garantiza seguridad estructural por los serios daños que muestra.

Figura 142. **Rompimiento de la malla de gallinero y abertura del recubrimiento**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La fotografía muestra el exagerado agrandamiento de la grieta, causa de que hasta la malla de gallinero esté cortada. Clara evidencia de que el ecopanel falló completamente.

Figura 143. **Fractura del ecopanel al final del ensayo a carga de impacto**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En este estado quedó el ecopanel después de haber fallado completamente.

Figura 144. El ecopanel después de terminar el ensayo con carga de impacto



Fuente: CII, Sección de Estructuras

Esta es la falla completa del ecopanel, vista desde otro ángulo. Nótese la magnitud de los daños.

5.4. Ensayo a tensión diagonal (corte), según la Norma ASTM E519-02

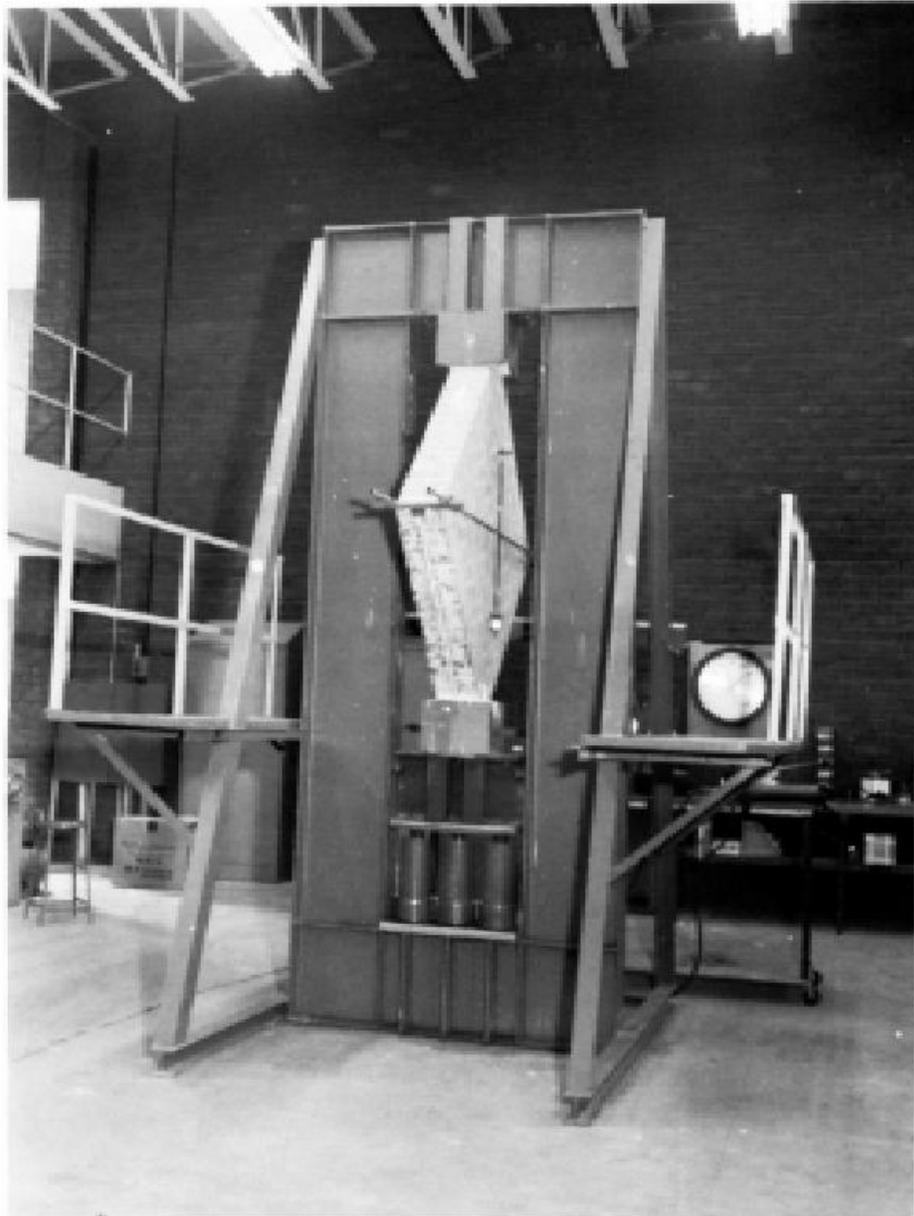
Para llevar a cabo el ensayo a tensión diagonal o corte, según la norma, es necesario poner especial atención a los procedimientos y recomendaciones descritos a continuación.

5.4.1. Alcances

Este método ayuda a determinar la resistencia a la tracción diagonal, o resistencia al corte, de muestras de 1,2 por 1,2 metros (4 por 4 pies) de mampostería, o paneles livianos, mediante la aplicación de carga a compresión a lo largo de una diagonal (ver fig. 145). Esta acción produce un fallo de la tensión diagonal con la división de muestras, paralelo a la dirección de la carga.

Esta norma no pretende señalar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de la norma establecer la seguridad y las prácticas apropiadas de salud, así como determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso. La norma puede incluir materiales peligrosos, operaciones y equipos.

Figura 145. **Aparato para la determinación de la resistencia a la tracción diagonal, o resistencia al corte, en conjuntos de mampostería**



Fuente: Normas ASTM E519-02. p. 1.

5.4.2. Significado y uso

El propósito de este método de prueba consiste en medir con mayor precisión la resistencia de la tensión diagonal (cortante) de mampostería que ya era posible medir con otros métodos disponibles, menos precisos. Para el ensayo objeto del presente informe, el tamaño de la muestra se determinó como la más pequeña que fuera razonablemente representativa de un conjunto de mampostería de tamaño completo, y que permitiera el uso de máquinas de prueba, como ocurre en muchos laboratorios.

5.4.3. Equipo

Es importante que se conozca el equipo utilizado para realizar el ensayo a tensión diagonal; de igual manera se dan recomendaciones en cuanto a su uso.

5.4.3.1. Máquina de ensayos

La máquina de ensayo deberá tener capacidad suficiente de carga de compresión y, al mismo tiempo, proporcionar la velocidad de carga deseada.

5.4.3.2. Zapatos de carga

Para aplicar la carga de la máquina a la muestra se utilizan dos zapatos de carga de acero.

5.4.4. Especímenes de prueba

A continuación se describen las características que deben tener las muestras que se deseen poner a prueba utilizando esta norma.

5.4.4.1. Tamaño

El tamaño nominal de cada muestra debe ser de 1,2 por 1,2 m. (4 por 4 pies), por el espesor de la pared tipo que se prueba, o del tamaño real, si la muestra cabe dentro de la máquina de ensayo.

5.4.4.2. Número de muestras

Las pruebas se realizan en, al menos, tres muestras construidas con el mismo tamaño y tipo de unidades de mampostería, mortero y mano de obra.

5.4.5. Procedimiento

El procedimiento que se describe, es el que se deberá emplear al momento de someter una muestra al ensayo de tensión diagonal.

5.4.5.1. Posición de los zapatos de carga

Los zapatos de carga son posicionados en los extremos superior e inferior de la máquina universal con el fin de que la muestra quede centrada en las superficies de apoyo, tanto superior como inferior, de la máquina de ensayo.

5.4.5.2. Ubicación de la muestra

El espécimen se coloca en una posición centrada y nivelada, en un lecho de material de yeso colocado en el zapato de carga más bajo. Si es necesario, se llenan los espacios entre la muestra y las placas laterales, confinando también con el material de protección.

5.4.5.3. Instrumentación

Cuando sea necesario se mide el acortamiento de la diagonal vertical y la prolongación de la diagonal horizontal bajo carga, en una de las dos formas que se enuncia a continuación, de la siguiente manera:

- Por compresómetro y extensómetro: Se puede recurrir al uso de micrómetros lineales o transductores de desplazamiento lineal. Las longitudes que marque el medidor deben quedar convenientemente registradas.
- Por 150 mm de cable eléctrico, unidos por calibradores de tensión de resistencia, montados a lo largo de las dos diagonales, tan cerca de su intersección como sea posible.

5.4.5.4. Aplicación de la carga

Para las muestras sin instrumentación, la carga se aplica continuamente hasta culminar con la carga última. Hasta la mitad de la carga máxima prevista se puede aplicar en cualquier tipo de práctica, después de que se ajusten los controles de la máquina para que la carga restante se aplique a una velocidad uniforme, de modo que la carga máxima se alcance en no menos de un minuto ni en más de dos minutos.

5.4.6. Cálculos

Es necesario llevar un registro de cada carga aplicada, que posteriormente serán usadas para efectuar los cálculos necesarios y así poder llegar a una conclusión acerca de la muestra ensayada.

5.4.6.1. Esfuerzo cortante

Sobre la base del área neta, calcule el esfuerzo cortante de las muestras.
Proceda de la siguiente manera:

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

Donde:

- S_s = Esfuerzo cortante en área neta, Mpa
 P = Carga aplicada, N
 A_n = Área neta del espécimen, mm², calculada de la manera siguiente:

$$A_n = \left(\frac{W + h}{2} \right) tn$$

Donde:

- W = ancho de la muestra, mm
 h = altura de la muestra, mm
 t = espesor total de la muestra, mm, y
 n = por ciento de la superficie bruta de la unidad que es sólida, expresada como un decimal, obtenida del numeral 5.1.6.1 (página 193 de este informe).

5.4.7. Descripción y resultados obtenidos del ensayo a corte realizado en la sección de estructuras del CII de la USAC

Para este ensayo se fabricaron tres copaneles idénticos, tratando en todo momento que no existieran diferencias marcadas, tanto en su fabricación, como en los materiales y en la mano de obra. La evaluación o comprobación de resultados se ejecutó 28 días después de su fabricación. Para el efecto, se trabajó con la máquina universal de la sección de estructuras del centro de investigaciones de ingeniería de la USAC, que se observa en la figura 146.

Figura 146. **Montaje del ecopanel en la máquina universal para ser ensayado a corte**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En la fotografía se muestra el montaje del ecopanel prefabricado en la máquina universal, listo para la evaluación a la que fue sometido. Sus dimensiones fueron las siguientes: 1,20 metros de alto, 0,58 metros de ancho, y 0,10 metros de espesor. Ante la carencia de los deformómetros adecuados para medir el acortamiento vertical y el ensanchamiento horizontal, sólo se midió su esfuerzo último, como lo indica la norma ASTM E519-02. Los resultados que se obtuvieron se presentan a continuación.

5.4.7.1. Ecopanel prefabricado No. 01

Los datos que se presentan en la tabla siguiente se obtuvieron luego del ensayo al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 1.

Tabla LXV. **Resultados obtenidos del ensayo a corte del ecopanel No. 1**

Peso	175,5	Libras
Carga	1 5000	Libras
Tipo de falla	Aplastamiento	

Fuente: elaboración propia.

Según la norma para calcular el esfuerzo de corte se aplicó la ecuación que se indicó en el numeral 5.4.6.1, los datos que se obtuvieron se presentan a continuación:

- Primero: la carga aplicada de libras fuerza se convierte a *Newton*:

$$P = 15\,000 \text{ lbf} = 66\,723,33702 \text{ N}$$

- Segundo: se calcula el valor del área neta según la ecuación del inciso 5.4.6.1:

$$A_n = \left(\frac{W + h}{2} \right) tn$$

$$A_n = \left(\frac{580 + 1\ 200}{2} \right) (100 * 0,98267)$$

$$A_n = 87\ 457,63\ mm^2$$

- Tercero: se obtiene el valor del esfuerzo de corte, que es igual a:

$$S_s = \frac{0,707 * 66\ 723,33702}{87\ 457,63}$$

$$S_s = 0,53938\ MPa = 78,23103\ PSI$$

$$S_s = 5,50021\ kg/cm^2$$

5.4.7.2. Ecopanel prefabricado No. 02

Los datos que se presentan en la tabla siguiente se obtuvieron luego del ensayo al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 2.

Tabla LXVI. **Resultados obtenidos del ensayo a corte del ecopanel No. 2**

Peso	164	Libras	
Carga	15 000	Libras	Primera grieta
Carga ultima	18 000	Libras	
Tipo de falla	Corte		

Fuente: elaboración propia.

Para calcular el esfuerzo de corte se aplicó la misma ecuación del numeral 5.4.6.1, según la norma ASTM E519-02. Los resultados se presentan a continuación:

- Primero: la carga aplicada de libras fuerza se convierte a *Newton*:

$$P = 18\,000 \text{ lbf} = 80\,068,00442 \text{ N}$$

- Segundo: se calcula el valor del área neta, según la ecuación del numeral 5.4.6.1:

$$A_n = \left(\frac{W + h}{2} \right) tn$$
$$A_n = \left(\frac{580 + 1\,200}{2} \right) (100 * 0,98267)$$
$$A_n = 87\,457,63 \text{ mm}^2$$

- Tercero: se obtiene el valor del esfuerzo de corte, que es igual a:

$$S_s = \frac{0,707 * 80\,068,00442}{87\,457,63}$$
$$S_s = 0,64726 \text{ MPa} = 93,87723 \text{ PSI}$$
$$S_s = 6,60024 \text{ kg/cm}^2$$

5.4.7.3. Ecopanel prefabricado No. 03

Los datos que se presentan en la tabla siguiente se obtuvieron luego del ensayo al que fue sometido el ecopanel prefabricado No. 3.

Tabla LXVII. **Resultados obtenidos en el ensayo a corte del ecopanel No. 3**

Peso	167,5	Libras
Carga	24 000,0	Libras
Tipo de falla	Aplastamiento	

Fuente: elaboración propia.

Según la norma, para calcular el esfuerzo de corte se aplica la ecuación del inciso 5.4.6.1, los resultados se presentan a continuación:

- Primero: la carga aplicada de libras fuerza se convierte a *Newton*:

$$P = 24\ 000\ lbf = 106\ 757,33923\ N$$

- Segundo: se procede a calcular el valor del área neta, según la ecuación del inciso 5.4.6.1:

$$A_n = \left(\frac{W + h}{2} \right) tn$$

$$A_n = \left(\frac{580 + 1\ 200}{2} \right) (100 * 0,98267)$$

$$A_n = 87\ 457,63\ mm^2$$

- Tercero: se obtiene el valor del esfuerzo de corte, que es igual a:

$$S_s = \frac{0,707 * 106\ 757,33923}{87\ 457,63}$$

$$S_s = 0,86302\ MPa = 125,16965\ PSI$$

$$S_s = 8,80033 \text{ kg/cm}^2$$

Corresponde, ahora, comparar los valores que se obtuvieron del esfuerzo de corte y del esfuerzo de diseño de compresión o $f'm$. El resultado de esta comparación debe estar comprendido en el rango de 1 a 8. Se espera que el elemento ensayado a corte, en este caso el ecopanel, tenga un comportamiento igual o similar al elemento ensayado a compresión. En otras palabras, los resultados del ensayo deben ser iguales o similares. De igual manera, al tener una relación dentro de este rango también se espera que los paneles presenten una falla típica por corte, considerada como el tipo de falla más crítico que se puede presentar en un ensayo a corte.

Para el presente caso, el valor de 1 se considera el ideal, ya que significa que existe un comportamiento homogéneo entre la compresión y el corte. Mientras que el valor de 8 es el valor de condición límite; a pesar de esto, se le considera como bueno, puesto que se encuentra dentro del rango de aplicación.

El valor de esfuerzo de diseño de compresión es igual a 51 kg/cm^2 y, relacionándolo con cada uno de los esfuerzos de corte, se obtiene la siguiente información:

$$\frac{51 \text{ kg/cm}^2}{5,50021 \text{ kg/cm}^2} = 9,27237$$

$$\frac{51 \text{ kg/cm}^2}{6,60024 \text{ kg/cm}^2} = 7,72699$$

$$\frac{51 \text{ kg/cm}^2}{8,80033 \text{ kg/cm}^2} = 5,79524$$

El análisis de los resultados permite concluir que si dos de los tres ecopaneles poseen una relación comprendida dentro del rango 1 a 8, y si el tercero, a pesar de no estar dentro del rango, es un valor que no se encuentra demasiado alejado del mismo, los valores obtenidos, aunque no sean iguales o próximos al valor ideal de 1, mantienen una relación que cumple con lo estipulado y su comportamiento estructural es aceptable.

En otra de las consideraciones que debe hacerse se esperaría que dos de los tres ecopaneles presentaran el tipo de falla por corte. Sin embargo, sólo uno de los tres lo presentó, y es el que guarda una relación igual a 7,72699. Los otros dos presentaron una falla por compresión en la esquina inferior del ecopanel. Una explicación para este tipo de fallas en los ecopaneles es la siguiente:

El hecho de que dos paneles hayan fallado por compresión en su base puede deberse a que las botellas de las esquinas no soportaron la compresión que genera la carga axial sobre la diagonal. Al ocurrir esto, las botellas fallaron, y su fallo fue la causa de que el ferrocemento también fallara y que, en consecuencia, se diera la falla por compresión. En el caso del otro panel la explicación más razonable puede ser que durante la aplicación de la carga axial, las botellas que se encontraban en las esquinas no se deformaron y esto motivó que el panel presentara la falla típica de corte.

En cuanto al aplastamiento de las botellas, la explicación más razonable es que se debió a que no todas son iguales, por lo que unas son más resistentes que las otras. Es el caso de las botellas de Coca Cola, pues el panel que presentó la falla por corte tenía en sus esquinas ecocolumnas armadas con botellas de Coca Cola, mientras que los otros dos paneles tenían ecocolumnas

construidas con botellas de agua pura, que son más débiles que las otras. Esta circunstancia pudo haber causado su fácil aplastamiento.

En la secuencia fotográfica que continúa se muestran escenas del ensayo a corte que se desarrolló en la sección de estructuras del CII, USAC.

Figura 147. **Falla por aplastamiento en la parte de abajo del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta fotografía se observa que el ecopanel falló por aplastamiento en la parte de abajo, y esto fue la causa para que el recubrimiento se abriera.

Figura 148. **Aplastamiento en la base del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La gráfica muestra la forma como se produjo el aplastamiento del ecopanel. La causa estriba en que las botellas no soportaron la aplicación de la carga en las esquinas y con ello provocaron que, tanto las botellas como el mortero, se comprimieran y presentaran el tipo de falla que captó la cámara.

Figura 149. **Aplastamiento y separación del recubrimiento del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

En esta otra imagen se evidencia cómo al aplicar la carga axial constante el panel se aplasta, principalmente en la parte inferior. Como efecto directo el recubrimiento se desprende en forma acelerada.

Figura 150. **Falla por cortante resaltada con color negro**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

El panel de la fotografía presenta una falla por corte, la cual está resaltada con color negro. Es el tipo de falla cuyo apareamiento se espera, cuando se ejecuta este tipo de ensayo.

Figura 151. **Agrietamiento debido a la aplicación de la carga**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La imagen muestra la forma en que la falla por corte se extiende a lo largo de la diagonal. Es un tipo de falla que se espera en estos casos.

Figura 152. **Falla de corte producida por la aplicación de la carga**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

La aplicación de la carga axial hace más manifiesta la falla por corte que recorre toda la diagonal. Se observa que también aparece una grieta, a un lado del panel, en un área sobre la cual podría ser que el panel no tuviera el espesor necesario en el recubrimiento.

Figura 153. **Falla de corte resaltada con negro**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

Acercamiento fotográfico que muestra con mayor detalle la falla por corte y la grieta de la figura 152.

Figura 154. **Agrietamiento producido a un costado del ecopanel**



Fuente: CII, Sección de Estructuras

Después de la aplicación constante de la carga, además de la falla de corte aparece una grieta, en la parte media de uno de los costados del panel. Esta grieta se puede interpretar como una falla de construcción al trabajar un recubrimiento muy delgado en esta parte del ecopanel.

Figura 155. **Aplastamiento en la parte inferior del ecopanel prefabricado**



Fuente: CII, Sección de Estructuras.

El ecopanel se aplastó en su base y causó el apareamiento de grietas como la que se ve en la fotografía. Esto evitó que se diera el apareamiento de la falla de corte que se esperaba, pues las ecocolumnas fallaron antes, por aplastamiento.

CONCLUSIONES

1. Las Normas ASTM constituyen un conjunto de lineamientos, pasos y procedimientos útiles para ejecutar con éxito diversos ensayos en el ramo de la construcción. Aunque no se cuente con la instrumentación que requieren, siempre es posible hacer uso de una configuración equivalente, pues dichas normas lo permiten.
2. El análisis y la interpretación de los resultados que se recolectaron al ensayar los doce ecopaneles prefabricados, indican que este nuevo sistema de construcción reúne condiciones de factibilidad y funcionalidad por lo que debe ser tomado en consideración, pues constituye un sistema innovador que, aparte de ser económico, es beneficioso para la protección del medio ambiente.
3. Este sistema de ecopaneles prefabricados fue objeto de estudio, bibliográfico y de campo, y se le aplicó una serie de pruebas formales, mediante las que se ha comprobado que cumple con los requisitos fundamentales para ser aplicado en la construcción de viviendas para personas de escasos recursos, ya que aún tratándose de un sistema nuevo, los resultados que produjo son prometedores por lo que, a partir de la idea original, se está experimentando con otras aplicaciones a fin de darle seguimiento y convertirlo en un programa de beneficio para la comunidad guatemalteca.

4. Uno de los componentes fundamentales de los ecopaneles prefabricados son las ecocolumnas elaboradas con botellas plásticas y bolsas de basura inorgánica, por lo que podría pensarse que no sirven más que para relleno. Pero en el desarrollo de este trabajo de graduación se demostró que las ecocolumnas son capaces, por sí solas, de resistir los esfuerzos generados por la aplicación de la carga, y constituyen, también, parte vital de los ecopaneles prefabricados, pues aportan resistencia, estabilidad estructural y una gran capacidad de absorber y disipar la energía que produce el impacto de un objeto contundente, sin presentar mayores daños en su estructura.

5. La aplicación de la teoría de Euler para la P crítica en columnas fue crucial para este estudio, ya que aunque no se trata de columnas de concreto armado, y se aplicó a ecocolumnas elaboradas con botellas plásticas, se demostró que sin importar el tipo de material del que esté hecha la columna, mientras sea posible recabar los datos necesarios para la aplicación de la fórmula de Euler, ésta no tiene límites en cuanto a su aplicación. Los resultados que se obtuvieron mediante el empleo de la fórmula de Euler están apegados a la realidad, con lo cual se valida el uso de dicha fórmula.

6. Los resultados del ensayo de flexión vertical demuestran que los ecopaneles prefabricados tienen muy buena capacidad para soportar los esfuerzos a flexión, lo cual les permite resistir la velocidad *jet* de 150 mph, con un factor de seguridad superior a 2.

7. El ensayo a compresión, según sus gráficos, aunque sus valores de esfuerzo no varían demasiado uno del otro, sí lo hace su comportamiento esfuerzo-deformación. Esto se debe a que al momento de la fabricación de los ecopaneles se colocaron ganchos de alambre galvanizado, calibre 1,45 mm, igual al utilizado en el *joist*, con el fin de sujetar en forma más segura la malla para evitar que se abultara y se saliera del recubrimiento. La interpretación de los gráficos demuestra que los ganchos, más que sujetar la malla, funcionaron como fuerza de cohesión para todas las partes del ecopanel, al que imprimieron el carácter de sistema revestido de mayor estabilidad. También evitaron que el recubrimiento se agrietara y se abriera en mayor escala.

8. Los valores iguales o cercanos a cero, del ensayo a carga de impacto, indican que mucho antes de presentar una deformación o falla, los ecopaneles tienen la capacidad de absorber y disipar la energía generada por el impacto de la bolsa de 25 kg, y alcanzar valores entre los 380 *Joule* y los 580 *Joule* de energía disipada. El ecopanel prefabricado es capaz de absorber el impacto de un balón oficial de fútbol No. 5, lanzado a una velocidad comprendida entre los 148 km/h y 183 km/h. Esta capacidad de absorber y disipar la energía la obtiene de las botellas plásticas y de las bolsas de basura inorgánica que se encuentran en su interior. Una vez más se demuestra que las botellas plásticas no cumplen una simple función de relleno en la fabricación de los ecopaneles sino una función estructural muy importante.

9. Los resultados obtenidos del ensayo a corte, y su comparación con el esfuerzo a compresión, demuestran que el tipo de fallo esperado se presentó sólo en uno de los ecopaneles, mientras que en el resto la falla por compresión se debió a que las botellas que se encontraban en las esquinas no fueron capaces de soportar la compresión aplicada a la diagonal, y fueron aplastadas. Se demostró que la diferencia entre un panel y otro es la configuración de las ecocolumnas: los dos paneles que fallaron por compresión tenían en sus esquinas ecocolumnas hechas con botellas de agua pura, mientras que en el panel restante tenía ecocolumnas preparadas con botellas de Coca Cola, que soportan en mejor forma los esfuerzos aplicados.

RECOMENDACIONES

1. El usuario de las normas de construcción que fueron aplicadas en esta investigación de campo, es responsable de establecer la seguridad y las prácticas apropiadas de salud, así como de determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.
2. Con relación a la conclusión tres, una vez que se ha comprobado que es posible desarrollar nuevos elementos que complementen a los ecopaneles, o ejecutar pruebas con ecopaneles de dimensiones diferentes, se recomienda poner especial atención a los trabajos que se desarrollan con seriedad profesional para darle un seguimiento adecuado a esta propuesta, y que son asesorados por el ingeniero Mario Corzo.
3. Se demostró que los ganchos utilizados en cada uno de los ecopaneles ayudan a que estos tengan un comportamiento más monolítico, por tal motivo se les debe asignar una función importante dentro de la fabricación y no tomarlos como elementos al azar. Por consiguiente, la colocación de los ganchos debe apegarse al siguiente orden específico: a) En una longitud de 40 cm en línea vertical, colocar, como mínimo, tres ganchos, y b) En línea horizontal, abarcando todo el ecopanel, colocar cuatro ganchos. Esto da un total de 36 ganchos colocados en todo el ecopanel prefabricado.

4. En cuanto a la colocación de los ganchos ubicados en los límites del ecopanel, o sea, en las orillas, deben situarse lo más cerca posible de éstas, para evitar que aparezcan grietas como las que se observan en las figuras 101,102, 103, 106 del ensayo a compresión. La correcta ubicación de los ganchos es determinante para que el panel no se abra y para que el recubrimiento no se separe del ecopanel, como se observa en las figuras 147 y 149 del ensayo a corte.

5. Para mejorar la resistencia a corte de los ecopaneles prefabricados se debe considerar la configuración de la ecocolumna, en el momento de armar el panel, pues, como quedó dicho, algunas ecocolumnas son más resistentes que otras. Para superar esta situación se recomienda utilizar botellas de Coca Cola en los extremos de los paneles, porque se ha comprobado que son más resistentes por su diferente forma de fabricación y tienden a soportar mejor los esfuerzos a los que se les somete, característica que contribuye para que los ecopaneles prefabricados cumplan, también, en forma eficiente con esa función.

6. Tener presente que la ecocolumna es un elemento estructural que se puede armar con botellas plásticas de cualquier tipo y no solo del tipo de botellas utilizadas en los ensayos descritos en este trabajo de graduación. Como se expone en los capítulos de este informe, las ecocolumnas pueden elaborarse con cualquier tipo de botella, sin importar su marca o diseño, siempre que sea posible cortarlas y colocarlas una dentro de la otra, hasta obtener un elemento estructural con las características ya mencionadas.

7. Para la preparación del motero debe tenerse presente que es posible trabajar con una proporción diferente a la que se usó en los ensayos descritos en la presente tesis, siempre que se cumpla con los trabajos adicionales que se requieren para garantizar la calidad y la seguridad del elemento. La proporción de 1:2 que se aplicó en los experimentos que fundamentan este trabajo cumple con asegurar una mayor impermeabilidad para el panel, por consiguiente, si se utiliza una proporción diferente, que no cumpla con este propósito, el panel debe ser impermeabilizado con pinturas específicas para tal fin o con repello, usando mortero con una proporción diferente. Obviamente, el cambio de la proporción implica cambio en la resistencia de los paneles, punto muy importante que se debe considerar en el momento de la preparación de este elemento estructural.

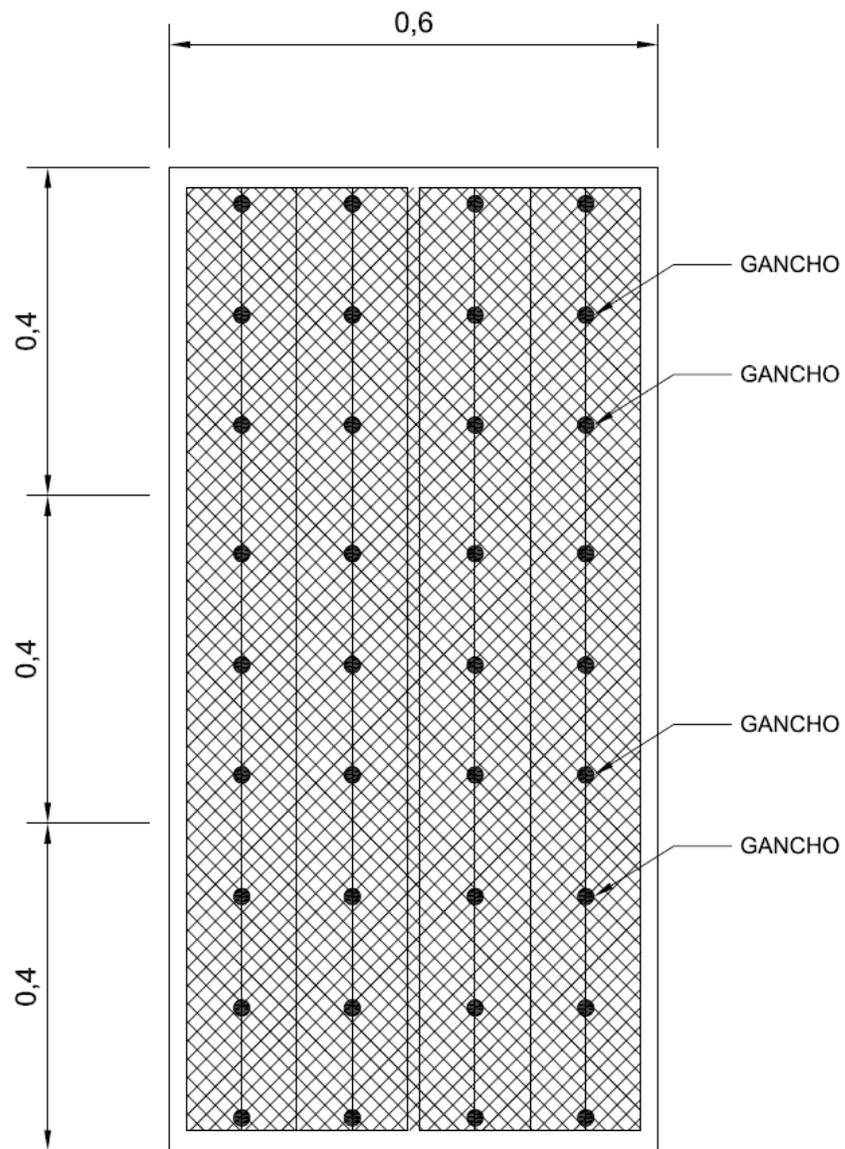
BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction*. E 72 – 02. 2005. United States of America: ASTM International, 2005. 11 p.
2. _____. *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*. E 519 – 02. 2005. United States of America: ASTM International, 2005. 5 p.
3. _____. *Standard Test Method of Measuring Relative Resistance of Wall, Floor, and Roof Construction to Impact Loading*. E 695 – 03. 2005. United States of America: ASTM International, 2005. 5 p.
4. ASKELAND, Donald R. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 3a ed. México D.F.: International Thomson, 1998. 778 p.
5. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. *Especificaciones técnicas para el diseño de estructuras de Ferrocemento*. Perú: OPS/CEPIS, 2003. 22 p.
6. _____. *Fundamentos para la aplicación de Ferrocemento*. Perú: OPS/CEPIS, 2000. 34 p.
7. _____. *Guía de construcción para estructuras de Ferrocemento*. Perú: OPS/CEPIS, 2003. 32 p.

8. KHATRI, Dilip. *Structural Desing of Masonry*. United States of America: International Code Council, 2005. 296 p. ISBN: 1-58001-188-8.
9. LEET, Kenneth M.; Uang, Chia-Ming. *Fundamentos de análisis estructural*. 2a ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2006. 756 p. ISBN: 970-10-5627-2.
10. *Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones Para el Distrito Federal*. Gaceta Oficial del Distrito Federal. Tomo 1 No. 103-BIS. México D.F.: Corporación Mexicana de Impresión, 2004. 284 p.
11. PAUL, B. K.; Pama, R. P. *Ferrocemento*. México D.F.: Limusa, 1991. 227 p. ISBN: 968-18-3281-7.
12. PYTEL, Andrew; Singer, Ferdinand L. *Resistencia de materiales*. 4a ed. México: Harlam, 1994. 584 p. ISBN: 968-6356-13-4.

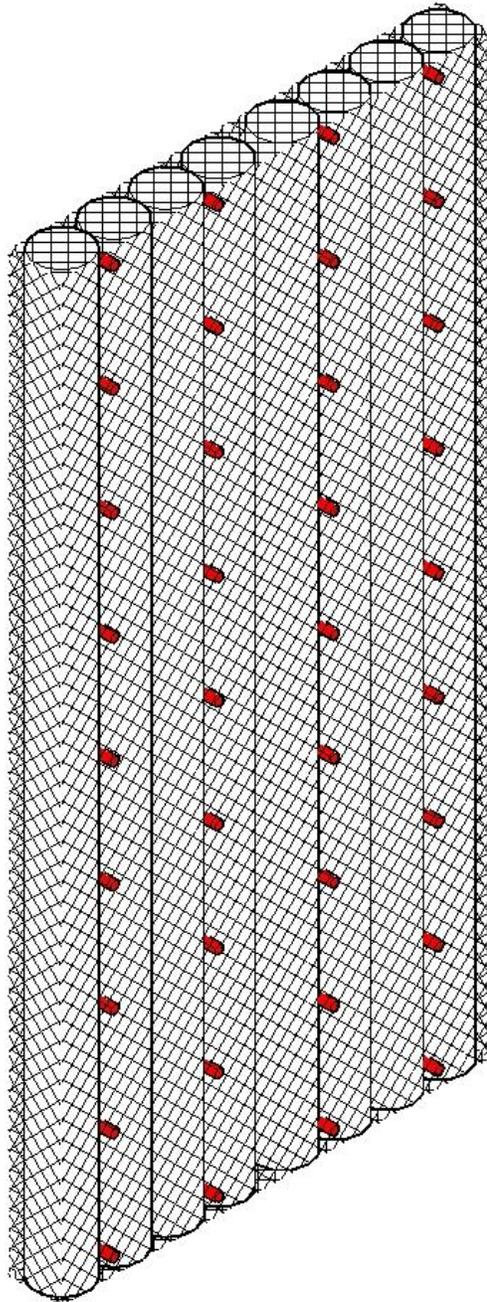
APÉNDICES

Apéndice 1. Forma de colocar los ganchos en un ecopanel prefabricado



Fuente: elaboración propia.

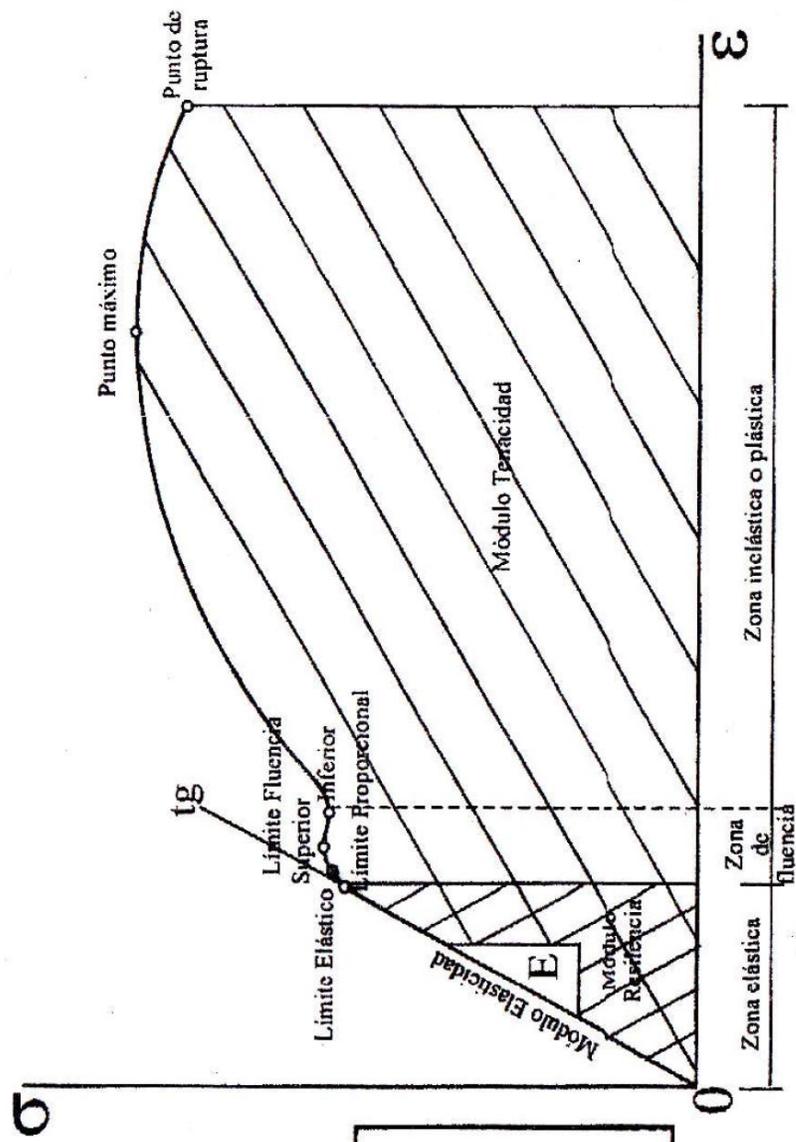
Apéndice 2. **Vista en isométrico de un ecopanel prefabricado con sus ganchos**



Fuente: elaboración propia.

ANEXO

Curva de esfuerzo – deformación unitaria de un material



Fuente: laboratorio de Resistencia de Materiales de Ingeniería, USAC.