



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

**VIGUETA TIPO TI PREFABRICADA Y PRETENSADA, PARA SISTEMAS DE  
LOSAS EN UNA DIRECCIÓN**

**Antonieta Victoria Vásquez Juárez**  
Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**VIGUETA TIPO TI PREFABRICADA Y PRETENSADA, PARA SISTEMAS DE  
LOSAS EN UNA DIRECCIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ANTONIETA VICTORIA VÁSQUEZ JUÁREZ**

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz Gonzáles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADORA	Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca
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:

### **VIGUETA TIPO TI PREFABRICADA Y PRETENSADA, PARA SISTEMAS DE LOSAS EN UNA DIRECCIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 03 de mayo de 2019.

**Antonieta Victoria Vásquez Juárez**



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



Guatemala, 03 de noviembre de 2021

Ingeniero  
Hugo Montenegro  
Coordinador de Materiales de Construcción y Obras Civiles  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Estimado Ingeniero Montenegro:

Cumpliendo con lo resuelto con la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación: **VIGUETA TIPO TI PREFABRICADA Y PRETENSADA, PARA SISTEMAS DE LOSAS EN UNA DIRECCIÓN**, presentado por la estudiante Antonieta Victoria Vásquez Juárez, quien se identifica con número de CUI 2617 36108 0801 y registro académico 201403940.

Considero que el trabajo de graduación se ha desarrollado satisfactoriamente y cumple con los objetivos que motivaron la selección de dicho tema, por lo que hago de su conocimiento que apruebo el trabajo realizado. Sin otro particular, atentamente

---

Asesor  
Profesor Investigador  
Mario Rodolfo Corzo Ávila  
Ingeniero Civil  
Colegiado No. 2089

Guatemala, 8 de noviembre de 2021

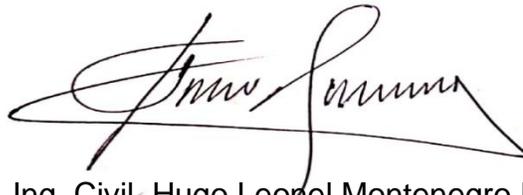
Ingeniero  
Armando Fuentes Roca  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación “**VIGUETA TIPO TI PREFABRICADA Y PRETENSADA PARA SISTEMAS DE LOSAS EN UNA DIRECCIÓN**”, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Antonieta Victoria Vásquez Juárez, quién 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 Hugo Leonel Montenegro Franco  
Jefe de área de materiales y construcciones civiles.





El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco al trabajo de graduación de la estudiante Antonieta Victoria Vásquez Juárez **VIGUETA TIPO TI PREFABRICADA Y PRETENSADA, PARA SISTEMAS DE LOSAS EN UNA DIRECCIÓN**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Armando Fuentes Roca  
Director Escuela Ingeniería Civil

Guatemala, enero 2022  
/mrrm.





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

**Decanato**  
**Facultad de Ingeniería**  
**24189101 - 24189102**  
**secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt**

DTG.007.2022

La Decana 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: **VIGUETA TIPO TI PREFABRICADA Y PRETENSADA, PARA SISTEMAS DE LOSAS EN UNA DIRECCIÓN**, presentado por la estudiante universitaria: **Antonieta Victoria Vásquez Juárez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, enero de 2022

AACE/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por su incomparable e inagotable amor, por darme la vida, la oportunidad y la fuerza para concluir esta etapa y por cada bendición recibida durante ésta.
- Mis padres** Antonio Vásquez y Gloria Juárez de Vásquez. Por su enorme amor expresado en esfuerzo, apoyo moral y económico, esperanza y paciencia. Que me permitieron vivir una experiencia universitaria particular.
- Mis hermanos** Cristi Vásquez, por ser un ejemplo de lucha y perseverancia; Aury Vásquez, por su apoyo y lealtad; Gloria Vásquez, por su pasión y convicción; Herson Vásquez, por visionario y resiliente; Marisol Vásquez, por su alegría y su cariño; y los mellizos, Alessandra Vásquez, mi niña y Alexander Vásquez, mi niño, por ser un rayito del amor de Dios en nuestras vidas.
- Mis abuelos** Victoriano Vásquez y Juana Toyom (q.e.p.d.) por ser el cimiento de las enseñanzas morales sobre las que ahora mi generación descansa. Andrés Juárez y Santa Menchú por ser ejemplo de fe en Dios y sencillez.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la casa de estudios que me abrió las puertas para alcanzar mi sueño de ser una profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proveerme de catedráticos, unos más que otros, que además de dotarme de armas académicas me dieron una enseñanza integral.
<b>A la Escuela de Ingeniería Civil</b>	En especial al Ing. Ronald Galindo (q.e.p.d.) por haberme dado la oportunidad de formar parte de los Auxiliares de cátedra de la Escuela de Ingeniería Civil, asistiendo los cursos de Puentes, Resistencia de materiales I y II.
<b>Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila (SR)</b>	Por tantas cosas, por haberme aceptado como practicante en su sección en donde aprendí que además de las enseñanzas académicas a un profesional útil para la sociedad debe dotársele también de herramientas morales y espirituales. Por brindarme su amistad y consejo y darme la oportunidad de haber sido Auxiliar de la Sección de Estructuras del CII.
<b>Amigos del CII</b>	Bertha Solís, Nataly Guzmán, Mario Álvarez, Sedwin Ramos, Sarah Cabrera, Claudia Lima y

Christopher Guerrero por haberme acogido como una sabandija más y brindarme su amistad tan valiosa durante el periodo en que realicé las Prácticas Finales. A las sabandijas que realizaron prácticas finales en el primer semestre del 2019, Thelma Cermeño, Delfi León, Christopher Ramos, Kevin Anaya, Esteban Duarte, Josué Lázaro, Carlos Zabala y a don Raúl Ortíz.

#### **Amigos de la facultad**

En especial a Jessica Herrera por brindarme su amistad y compañía durante toda la carrera; Yadira López, Josabeth Gonzáles y Vivian Orozco por hacer amena la experiencia universitaria en mi vida; y a cada uno de aquellos compañeros con los que compartí un aula.



	2.3.2.3.1.	Resistencia de diseño ...	21
	2.3.2.3.2.	Resistencia nominal a cortante .....	21
3.	CONCRETO PRESFORZADO .....		25
3.1.	Método de Postensado .....		28
	3.1.1.	Características .....	28
3.2.	Método de Pretensado .....		28
	3.2.1.	Características .....	29
	3.2.2.	Proceso de fabricación .....	30
	3.2.2.1.	Aplicación del tensado .....	30
	3.2.2.2.	Vaciado del concreto .....	31
	3.2.2.3.	Curado del concreto .....	31
	3.2.2.4.	Cortado de tendones .....	32
	3.2.2.5.	Almacenamiento .....	32
3.3.	Fases del comportamiento del concreto presforzado .....		33
3.4.	Especificaciones de los materiales .....		38
	3.4.1.	Acero .....	39
	3.4.2.	Concreto .....	43
3.5.	Criterios de diseño por flexión de elementos compuestos .....		44
4.	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES .....		49
4.1.	Propiedades mecánicas .....		49
	4.1.1.	Tenacidad .....	49
	4.1.2.	Resiliencia .....	50
4.2.	Propiedades estructurales .....		50
	4.2.1.	Resistencia a esfuerzos de compresión .....	50
	4.2.2.	Resistencia a esfuerzos de flexión .....	52
	4.2.3.	Resistencia a esfuerzos de corte .....	56

4.2.4.	Deflexiones.....	57
4.2.5.	Contra flecha .....	58
4.3.	Características físicas.....	58
4.3.1.	Porcentaje de absorción .....	59
5.	NORMAS APLICADAS.....	61
5.1.	NTG 41084 h1 Método de ensayo vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto.....	61
5.1.1.	Vigueta de concreto armado o presforzado .....	62
5.1.2.	Bovedilla de concreto .....	65
5.1.3.	Sistema de losa prefabricada .....	67
5.1.3.1.	Para la capa de compresión fundida en obra .....	68
5.1.3.2.	Equipo, requerimiento en los apoyos y dimensiones mínimas del sistema de losa .....	68
5.1.3.3.	Requerimientos generales para el ensayo .....	69
5.1.3.4.	Carga de prueba.....	70
5.1.3.5.	Aplicación de la carga de prueba.....	70
5.1.3.6.	Mediciones de la respuesta .....	71
5.1.3.7.	Criterio de aceptación.....	72
5.2.	NTG 41084 Vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto. Especificaciones.....	73
5.2.1.	Especificaciones y detalle de vigueta de concreto pretensada de alma llena. ....	74
5.2.2.	Requisitos para bovedillas de concreto .....	77
5.2.3.	Requisitos para el sistema de losa prefabricada ....	78
5.2.3.1.	Capa de compresión.....	78

	5.2.3.2.	Viguetas .....	79
	5.2.3.3.	Rigidizante.....	79
	5.2.3.4.	Bastones .....	79
	5.2.3.5.	Refuerzo por temperatura .....	79
	5.2.3.6.	Deformación y carga máxima.....	80
5.2.4.		Criterios de aceptación en obra.....	80
	5.2.4.1.	Vigueta .....	80
	5.2.4.2.	Acero de refuerzo.....	81
	5.2.4.3.	Bovedilla.....	82
6.		DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	83
6.1.		Metodología del ensayo .....	83
	6.1.1.	Ensayo de resistencia a la flexión .....	83
6.2.		Equipo y materiales.....	85
	6.2.1.	Equipo .....	85
	6.2.2.	Materiales.....	85
6.3.		Losa A: Sistema de losa con conexión por entrega .....	87
	6.3.1.	Datos registrados .....	89
	6.3.2.	Cálculos efectuados .....	91
	6.3.3.	Resultados .....	93
	6.3.4.	Fotografías del ensayo.....	96
6.4.		Losa B: Sistema de losa con conexión por solapo o a tope. ....	99
	6.4.1.	Datos registrados.....	101
	6.4.2.	Cálculos efectuados .....	103
	6.4.3.	Resultados .....	105
	6.4.4.	Fotografías del ensayo.....	109
6.5.		Comparación y análisis de resultados.....	112
6.6.		Ensayos complementarios .....	116
	6.6.1.	Sistema de losa con conexión por solapo.....	117

6.6.1.1.	Ensayo con carga horizontal simulando la carga de sismo. ....	117
6.6.1.1.1.	Datos registrados .....	117
6.6.1.1.2.	Cálculos efectuados ...	119
6.6.1.1.3.	Resultados.....	120
6.6.1.1.4.	Fotografías del ensayo.....	123
6.6.1.2.	Ensayo de resistencia al fuego .....	124
6.6.1.2.1.	Fotografías del ensayo.....	124
6.6.2.	Sistema de losa con conexión por entrega.....	128
6.6.2.1.	Ensayo con carga horizontal simulando la carga de sismo. ....	128
6.6.2.1.1.	Datos registrados .....	130
6.6.2.1.3.	Cálculos efectuados ...	132
6.6.2.1.5.	Resultados.....	134
6.6.2.1.7.	Fotografías del ensayo.....	136
6.6.2.2.	Ensayo dinámico y estático con tubo de concreto.....	137
6.6.2.3.	Ensayo de resistencia a la exposición al fuego.....	139
6.6.2.3.1.	Fotografías del ensayo.....	140
	CONCLUSIONES .....	145
	RECOMENDACIONES .....	147
	BIBLIOGRAFÍA.....	149
	APÉNDICES .....	153

ANEXOS..... 175

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Sección transversal de vigueta T invertida.....	7
2.	Acción estructural de una losa con relación a su forma deformada.....	9
3.	Vigueta Ti prefabricada pretensada. ....	12
4.	Bovedilla de concreto que integra la losa sistema Ti extruida.....	13
5.	Refuerzo de acero en conexión por solapo.....	16
6.	Hipótesis del cortante por fricción. ....	19
7.	Tracción en el refuerzo de cortante por fricción. ....	22
8.	Compresión en el refuerzo de cortante por fricción.....	23
9.	Analogía con libros del concreto reforzado. ....	26
10.	Analogía con libros del concreto presforzado. ....	26
11.	Pista de producción y tensado de los tendones. ....	30
12.	Curado tradicional de las viguetas. ....	31
13.	Cortado de los tendones.....	32
14.	Distribución de esfuerzos en una viga de concreto simple.....	33
15.	Distribución de esfuerzos de una viga presforzada axialmente. ....	34
16.	Distribución de esfuerzos de una viga presforzada con excentricidad constante.....	37
17.	Curvas de esfuerzo-deformación típicas del concreto sujeto a compresión uniaxial.....	52
18.	Comparación entre de curvas esfuerzo-deformación del acero de presfuerzo y acero de refuerzo. ....	55
19.	Curvas representativas de esfuerzo-deformación del acero de presfuerzo y el concreto. ....	56

20.	Primera opción: Aplicación de la carga con dispositivo de acero. ....	63
21.	Segunda opción: Aplicación de la carga por medio de dispositivo colgante. ....	64
22.	Esquema de aplicación de carga en la bovedilla. ....	67
23.	Efecto arco.....	71
24.	Sistema de losa prefabricada. ....	74
25.	Detalle de vigueta de concreto pretensado.....	76
26.	Dimensiones mínimas de sección de vigueta de alma llena.....	76
27.	Recubrimiento y separaciones del acero para viguetas de alma llena. ....	77
28.	Refuerzo por temperatura, mínimo, para topping de losa prefabricada de 5 cm de espesor.....	78
29.	Guía para anchos de fisura razonables, para concreto armado bajo cargas de servicio, según ACI 224 R Control de fisuración en estructuras de hormigón. ....	81
30.	Ubicación de los cilindros en cada incremento de carga. ....	84
31.	Ubicación de los deformímetros en la prueba de carga en la losa con conexión por entrega. ....	88
32.	Detalle de la conexión por entrega. ....	88
33.	Esfuerzo y deformación verticales (una cama). ....	93
34.	Correlación de deformaciones a lo largo de la losa. ....	94
35.	Esfuerzo y deformación verticales (dos camas).....	95
36.	Marcado y trazado de cuadrícula.....	96
37.	Cuadrículas de ensayo. ....	96
38.	Ubicación de los deformímetros. ....	97
39.	Primera cama de cilindros. ....	97
40.	Aplicación de segunda cama de cilindros. ....	98
41.	Lectura de respuestas en los deformímetros.....	98
42.	Ubicación de deformímetros en la losa con conexión por entrega.....	99

43.	Detalle de la conexión por solapo. ....	100
44.	Esfuerzo y deformación verticales (una cama). ....	105
45.	Esfuerzo y deformación verticales (dos camas). ....	107
46.	Colocación de hilo de pescar. ....	109
47.	Marcado y trazo de cuadrícula guía. ....	109
48.	Ubicación de los deformímetros. ....	110
49.	Colocación de planchas de concreto. ....	110
50.	Aplicación de carga con primera cama de cilindros. ....	111
51.	Lectura de las respuestas por medio de los deformímetros. ....	111
52.	Aplicación de carga con segunda cama de cilindros y lectura de los deformímetros. ....	112
53.	Comparación de gráficas de carga vrs deformación horizontales de los cuatro ciclos aplicados. ....	121
54.	Comparación de gráficas de Deformación vertical vrs Carga horizontal de los cuatro ciclos aplicados. ....	122
55.	Aplicación de carga horizontal. ....	123
56.	Lectura de las deformaciones debidas a la carga horizontal. ....	123
57.	Losa con excedencia de carga y exposición al fuego. ....	124
58.	Deflexión debida a la sobrecarga y exposición al fuego. ....	125
59.	Medición de la deflexión durante el periodo expuesto al fuego. ....	125
60.	Extinción del fuego. ....	126
61.	Colapso de la losa, después de aproximadamente 2 horas. ....	126
62.	Separación de la losa del apoyo, grietas en muro de apoyo y grieta por cortante. ....	127
63.	Porción de losa que quedó aún sobre el murete de apoyo. ....	127
64.	Refuerzo en U. ....	128
65.	Esquema del ensayo de carga horizontal y ubicación de los deformímetros. ....	129
66.	Carga y deformaciones horizontales, de losa A. ....	134

67.	Deformación vertical y Carga horizontal. ....	135
68.	Aplicación de carga horizontal sin carga vertical. ....	136
69.	Aplicación de carga horizontal con carga vertical. ....	136
70.	Esquema del ensayo de dinámico. ....	137
71.	Aplicación de carga dinámica, por medio de un cilindro de concreto..	138
72.	Esquema del ensayo estático utilizando un tubo de concreto. ....	138
73.	Ensayo de carga estática.....	139
74.	Preparación del ensayo. ....	140
75.	Losa con excedencia de carga y exposición al fuego.....	140
76.	Exudación en el nudo debido al aumento de temperatura.....	141
77.	Deflexión de la losa con excedencia de carga y exposición al fuego..	141
78.	Medición de la deflexión por sobrecarga y exposición al fuego. ....	142
79.	Colapso de losa. ....	142
80.	Fractura por cortante. ....	143
81.	Detalle de la falla de la losa. ....	143
82.	Detalle de falla en el muro de apoyo.....	144
83.	Fisuras por flexión, generadas durante la exposición al fuego. ....	144

## TABLAS

I.	Razones que diferencian el comportamiento del concreto presforzado del concreto reforzado, cuando están ambas cerca de la carga última.....	54
II.	Cantidad de materiales para los apoyos de ambas losas. ....	86
III.	Cantidad de materiales para ambas losas. ....	87
IV.	Cantidad de material para formaleta. ....	87
V.	Carga, descarga y deformación de primera cama de cilindros. ....	89
VI.	Carga y deformación de dos camas de cilindros de concreto.....	90

VII.	Esfuerzos y deformaciones reales debidas a la primera cama de cilindros de concreto. ....	91
VIII.	Esfuerzos y deformaciones reales debidas a dos camas de cilindros de concreto. ....	92
IX.	Carga, descarga y deformación de primera cama de cilindros. ....	101
X.	Carga, descarga y deformación de dos camas de cilindros de concreto. ....	102
XI.	Esfuerzo y deformaciones reales debidas a la primera cama de cilindros de concreto. ....	103
XII.	Esfuerzo y deformaciones reales debidas a dos camas de cilindros de concreto. ....	104
XIII.	Cargas, viva, muerta y de acabados; longitud libre entre apoyos y área superficial de las losas para los ensayos. ....	113
XIV.	Valores de las cargas máximas aplicadas y sus respectivas deformaciones.....	113
XV.	Comparación de resultados con los valores teóricos. ....	114
XVI.	Carga y deformaciones horizontales. ....	118
XVII.	Combinación de carga horizontal y esfuerzo vertical y sus respectivas deformaciones horizontales. ....	119
XVIII.	Combinación de carga horizontal con carga vertical y deformaciones horizontales. ....	130
XIX.	Combinación de carga horizontal y carga vertical y deformaciones verticales. ....	131
XX.	Combinación de carga horizontal y esfuerzo vertical y sus respectivas deformaciones horizontales. ....	132
XXI.	Combinación de carga horizontal y esfuerzo vertical y sus respectivas deformaciones verticales.....	133



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$b_v$	Ancho de la sección transversal en la superficie de contacto que se investiga por cortante horizontal en cm
$a$	Ángulo que define la orientación del refuerzo
$A_{vf}$	Área de cortante por fricción en $\text{cm}^2$
$W_m$	Carga muerta (peso de la bovedilla más peso de la sección de la vigueta más el peso de la capa de compresión más el peso del rigidizante)
$w_{bo}$	Carga por metro lineal de la bovedilla
$w_l$	Carga por metro lineal de la losa fundida in situ
$w_o$	Carga por metro lineal de la vigueta
$w_{ac}$	Carga por metro lineal de los acabados
$P$	Carga puntual en kg
$T_a$	Carga real de ensayo en $\text{kg/m}^2$ menos la carga muerta (peso de la vigueta, peso de las bovedillas y peso de la losa fundida in situ)
$P_{res}$	Carga resistente en la sección
$T_t$	Carga total de ensayo en $\text{kg/m}^2$ , incluida la carga muerta
$W_{vm}$	Carga viva momentánea durante la fundición de la capa de compresión calculada de acuerdo con el peso

	del personal de obra, equipo y materiales, no debe ser menor de 100 kg/cm <sup>2</sup>
<i>m</i>	Coefficiente de fricción
<i>r'</i>	Cuantía del refuerzo a compresión
<i>r</i>	Cuantía del refuerzo longitudinal no presforzado a tracción
<i>r<sub>p</sub></i>	Cuantía del refuerzo longitudinal presforzado en tracción
<i>D<sub>1</sub></i>	Deflexión máxima medida 24 horas después de la aplicación de carga de prueba total
<i>D<sub>2</sub></i>	Deflexión máxima medida durante la segunda prueba de carga 24 horas después de la aplicación de carga de prueba total
<i>D<sub>r</sub></i>	Deflexión residual medida 24 horas después de la remoción de la carga total de prueba
<i>d<sub>b</sub></i>	Diámetro nominal de una barra, alambre o torón de presforzado en mm
<i>y<sub>t</sub></i>	Distancia desde el eje que pasa por el centroide de la sección bruta a la cara en tracción, sin considerar el refuerzo en cm
<i>d</i>	Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción
<i>L<sub>t</sub></i>	Distancia entre apoyos en metros (m)
<i>C<sub>m</sub></i>	Efecto de las cargas muerta de servicio
<i>C<sub>t</sub></i>	Efecto de las cargas vivas debidas a la presencia de tanques de agua y/o residuos volcánicos
<i>C<sub>v</sub></i>	Efecto de las cargas vivas de servicio
<i>E</i>	Entre eje de viguetas en cm

$f_{cs}$	Esfuerzo de compresión permisible en el concreto en servicio en kg/cm <sup>2</sup>
$f_{ci}$	Esfuerzo de compresión permisible en el concreto en transferencia del presforzado en kg/cm <sup>2</sup>
$f_{ts}$	Esfuerzo de tracción permisible en el concreto en servicio en kg/cm <sup>2</sup>
$f_{ti}$	Esfuerzo de tracción permisible en el concreto en transferencia del presforzado en kg/cm <sup>2</sup>
$f_{se}$	Esfuerzo efectivo en el acero de presfuerzo, después de que han ocurrido todas las pérdidas de presforzado
$f_{ps}$	Esfuerzo en el acero de presfuerzo en el estado de resistencia nominal a flexión
$f_{pi}$	Esfuerzo máximo permisible en el acero de presfuerzo al momento de la transferencia
$h$	Espesor total del sistema de losa en mm.
$e$	Excentricidad de la fuerza de pretensado
$l$	Factor de modificación que tiene en cuenta las propiedades mecánicas reducidas del concreto de peso liviano, relativa a los concretos de peso normal de igual resistencia a la compresión
$f$	Factor de reducción de resistencia
$g_p$	Factor por tipo de acero de presforzado
$b_1$	Factor que relaciona la profundidad de bloque rectangular equivalente de esfuerzos de compresión con la profundidad del eje neutro
$P_e$	Fuerza de presfuerzo efectivo en el acero después de que han ocurrido todas las pérdidas.

$P_i$	Fuerza de presfuerzo en el acero al momento de la transferencia
$L_a$	Longitud de autoportancia de la vigueta de concreto en metros
$L$	Longitud de diseño de la vigueta
$E_p$	Módulo de elasticidad del acero de presfuerzo en $\text{kg/cm}^2$
$f'_r$	Módulo de ruptura del concreto
$M_{cr}$	Momento de fisuración
$I_g$	Momento de inercia de la sección bruta con respecto al eje que pasa por el centroide, sin tener en cuenta el refuerzo en $\text{cm}^4$
$M_{res}$	Momento elástico resistente en la sección
$V_c$	Resistencia a cortante del concreto
$V_{uh}$	Resistencia a cortante horizontal requerido
$V_u$	Resistencia a cortante requerido
$f'_c$	Resistencia especificada a la compresión del concreto en $\text{kg/cm}^2$
$f'_{ci}$	Resistencia especificada a la compresión del concreto en transferencia en $\text{kg/cm}^2$
$f_{py}$	Resistencia especificada a la fluencia del acero de presforzado
$f_y$	Resistencia especificada a la fluencia del acero de refuerzo
$f_{pu}$	Resistencia especificada a la tracción del acero de presforzado
$V_n$	Resistencia nominal a cortante de la sección de concreto

<b><math>V_{nh}</math></b>	Resistencia nominal a cortante horizontal de la sección compuesta
<b><math>M_n</math></b>	Resistencia nominal a flexión en la sección
<b><math>d_{agg}</math></b>	Tamaño nominal máximo del agregado grueso en mm



## GLOSARIO

<b>ARI</b>	Concretos de Alta Resistencia Inicial por usar cementos ARI.
<b>Colineal</b>	Que están sobre una misma línea de acción.
<b>Comba</b>	Deformación curvada que sufre un cuerpo sólido al estar sometido a cargas.
<b>Conexión</b>	Región de una estructura donde se unen dos o más elementos.
<b>Contracción</b>	Es la pérdida de volumen del concreto debida a la pérdida gradual de agua a través del tiempo.
<b>Contraflecha</b>	Deflexión hacia arriba ocasionada por el presfuerzo en el concreto cuando el centroide del acero de presfuerzo se encuentra por debajo del centroide del elemento.
<b>Deformímetro</b>	Extensómetro, herramienta utilizada para la medición de las pequeñas deformaciones lineales.
<b>Estructomalla</b>	Malla electrosoldada o electromalla.

<b>Excentricidad</b>	Distancia entre el centroide el elemento de concreto y el centroide del acero de presfuerzo.
<b>Flujo plástico</b>	Acortamiento del concreto bajo un esfuerzo constante.
<b>Inglete</b>	Junta que forma una esquina, generalmente ambos lados están biselados en un ángulo de 45 grados para formar una esquina de 90 grados.
<b>Autoportancia</b>	La máxima longitud que un elemento, viga, losa o vigueta puede soportar la carga sin puntal (longitud de apuntalamiento).
<b>Nudo</b>	Región común a los elementos que se interceptan en una estructura.
<b>Plano de falla</b>	Una sección donde se considera que existe una condición de falla potencial.
<b>Postensado</b>	Método de presforzado donde los tendones se tensan después del fraguado del concreto.
<b>Pretensado</b>	Método de presforzado donde los tendones se tensan previo al fraguado del concreto.
<b>Tendón</b>	Acero utilizado para generar el presfuerzo en el concreto y pueden ser torones, alambres o barras.

**Topping**

Capa de compresión de concreto en losas prefabricadas, regularmente con espesor de 5 cm



## RESUMEN

En las investigaciones realizadas anteriormente y que tiene relación con los sistemas de losa prefabricada se centraron en el estudio de su capacidad a cortante, el objetivo general del presente trabajo de investigación es analizar el comportamiento de la Vigueta Ti prefabricada y pretensada cuando está al nivel de servicio; para lograrlo se sometieron a pruebas de carga dos sistemas de losa con variación en su tipo de conexión. Para ello se utilizaron planchas y cilindros de concreto, colocado de forma distribuida sobre la losa y se registraron las deformaciones respectivas, para luego analizar y verificar cuál de las dos alternativas de conexión tiene un mejor comportamiento.

También se realizaron ensayos complementarios que están fuera de norma con la intención de inducir a las losas al colapso. Concluidos los ensayos se determinó que ambas losas demostraron un buen comportamiento ante esfuerzos de flexión y con la ayuda de los ensayos complementarios se concluyó que para que un sistema de losa sea eficiente debe estar acompañado de un buen muro de carga.

Para la comparación de los resultados obtenidos de las pruebas de carga con datos teóricos, se realizó el análisis por medio del método ADS y el análisis bajo resistencia última por flexión; además, de realizar un análisis de cortante por fricción, determinando que el análisis realizado por el método ADS es más restrictivo comparado con el método de análisis bajo resistencia última por flexión.



# OBJETIVOS

## General

Verificar el comportamiento estructural de la vigueta tipo Ti prefabricada y pretensada para uso de losas en una dirección.

## Específicos

1. Determinar si la vigueta tipo Ti prefabricada y pretensada soporta la carga establecida para el experimento.
2. Identificar la relación entre cargas verticales y sus respectivas deflexiones.
3. Analizar el comportamiento del sistema de losa ante cargas horizontales simulando la carga de sismo.
4. Definir, cuál de dos alternativas de conexión vigueta-apoyo es el más adecuado, si cuando es una conexión por entrega o es una conexión por solapo o a tope.
5. Determinar el comportamiento estructural del sistema de losa ante la aplicación de carga móvil.



## INTRODUCCIÓN

Dado que los sistemas de losa prefabricada son una solución para cuando se necesitan obras con un limitado tiempo de ejecución. Es necesario investigar métodos de fabricación que hagan eficiente el uso de estos sistemas. Existen en el mercado dos tipos en específico de viguetas que componen este tipo de losas siendo los de alma abierta o alma llena, pretensados y no pretensados, elaborados con moldes o formaletas, de los cuales hay varias investigaciones en donde se estudia su capacidad a cortante.

Sin embargo, no hay muchos estudios que hablen de su capacidad a flexión y que sean elaborados con métodos constructivos diferentes a los ya conocidos.

A continuación, se pretende analizar el comportamiento estructural de dos sistemas de losa prefabricada, teniendo como variable el tipo de conexión, haciendo uso de una vigueta Ti pretensada. El método de fabricación de esta vigueta conlleva la eliminación de moldes o formaletas por lo tanto se hace uso de una mezcla de concreto con una relación agua/cemento mucho menor a las mezclas tradicionales.

En el capítulo 1 se presentan estudios similares realizados a sistemas de losa prefabricada; en el capítulo 2 se desarrollan los elementos que componen el sistema de losa; en el capítulo 3 se describen los conceptos importantes relacionado en el concreto presforzado; en el capítulo 4 se definen las propiedades más relevantes que dan lugar a una mejor comprensión del comportamiento de la vigueta Ti prefabricada y pretensada; en el capítulo 5 se

da un resumen de las Normas utilizadas para el desarrollo de las pruebas de carga y por último en el capítulo 6 de describe a detalle el desarrollo experimental.

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Estudios realizados relacionados con el tema

- Estudios experimentales del comportamiento sísmico de losas prefabricadas

En el año 2008, en Veracruz México, se realizaron estudios experimentales del comportamiento sísmico de losas prefabricadas, con colaboración de la ANIVIP y CENAPRED, con el objetivo general de determinar la seguridad estructural que presentan las losas prefabricadas para vivienda. Uno de los objetivos específicos fue el estudiar la efectividad de un nuevo tipo de conexión llamado conexión por “solapo” o a “tope”, tanto para vigueta pretensada como para vigueta de alma abierta.

Se consideró realizar ensayos de laboratorio, aplicando una combinación de carga vertical no reversible con carga horizontal cíclica reversible (sismo) a 21 modelos de losas a escala natural, con dimensiones de 2,10 por 2,1 metros y peralte variable de 13 a 19,5 cm, divididas en dos series de prueba (A y B). Las variables estudiadas fueron:

- Orientación de viguetas con relación a la dirección de la fuerza de sismo (perpendicular o paralelo a la dirección de la fuerza de sismo).
- Tipo de vigueta (de alma abierta o pretensada).
- Tipo de bovedilla
- Longitud de ente eje

- Peralte de vigueta
- Espesor de la capa de compresión
- Calibre y abertura de la electromalla
- Resistencia especificada a la compresión del concreto.
- La colocación o no colocación de bastones sobre cada vigueta en las losas con conexión por solapo.

El documento tomado como referencia es un informe preliminar de los estudios; ya que, de los 21 modelos de losas, en el momento de su redacción únicamente se habían ensayado 3 losas de las 21 en total. La primera losa con disposición de viguetas perpendicular al sismo, la segunda con viguetas orientadas paralela a la dirección del sismo y una última que fue losa maciza.

Los resultados obtenidos fueron gráficas de cortante vrs desplazamiento y gráficas de rigidez vrs desplazamiento. La aplicación de la carga vertical después de cada ciclo de carga horizontal no reversible se hizo para verificar el deterioro de la rigidez vertical del sistema de losa de vigueta y bovedilla ante fuerzas sísmicas.

Las conclusiones preliminares fueron:

- Se presenta un mejor comportamiento a cortante horizontal cuando la vigueta es colocada en orientación perpendicular al apoyo, sin tener un deterioro considerable en la rigidez.
- Cuando la vigueta se coloca paralela al poyo, al igual que la losa maciza presentan un comportamiento desfavorable y muestran una pérdida de rigidez a cortante casi total en los últimos ciclos de carga.

- Dentro del estado de servicio hasta el inicio del agrietamiento las rigideces de las viguetas son las mismas, sin embargo, después del agrietamiento la rigidez de la vigueta perpendicular al apoyo es mayor que las rigideces de las otras losas.
- Las losas de vigueta y bovedilla de cemento y arena con viguetas posicionadas de forma perpendicular a la fuerza aplicada, presenta un buen comportamiento a fuerza cortante, mientras que cuando son paralelas su degradación en rigidez es drástica lo mismo sucede con la losa maciza.
- Resistencia a cortante de los forjados de vigueta pretensada y bovedilla

En el año 2013, en la ciudad de Barcelona, se realizó el trabajo de tesis doctoral, Resistencia a cortante de los forjados de vigueta pretensada y bovedilla, por Carlos R. Ribas Gonzáles, donde el objetivo general fue mejorar la comprensión del comportamiento a cortante de los forjados de vigueta pretensada y bovedilla, estudiando la capacidad a cortante de los nervios que forman dichos forjados y así evaluar la influencia de diferentes parámetros sobre la resistencia cortante de dichos elementos.

Se realizaron 27 ensayos a viguetas pretensadas divididas en dos campañas experimentales; en la campaña del 2007 se ensayaron 3 viguetas y en la del 2010 se ensayaron las 24 viguetas restantes. Los parámetros tomados en cuenta para el análisis de resultados fueron: espesor de losa terminada, armado de vigueta, tipo de vigueta (semi vigueta o vigueta autoportante) y por último el espesor de la capa de compresión con tres variantes:

- sin capa de compresión,

- capa de compresión de 4 cm y
- capa de compresión de 7 cm

Al aumentar el espesor de la capa de compresión se muestra un incremento de la resistencia a rotura y esta última si difiere en función del armado activo como lo está escrito en la Instrucción EHE-08; las losas de vigueta pretensada autoportante ensayados tienen rotura a la flexión más cercana a la de cortante que las losas de semi vigueta pretensadas.

- Resistencia a esfuerzo cortante en forjados de vigueta pretensada según la nueva Instrucción

En el año 2008, en Madrid, España, A. Domínguez Álvarez, D. Izquierdo López, L. Vega Catalán y C. López Hombrados, realizaron el estudio, Resistencia a esfuerzo cortante en forjados de vigueta pretensada según la nueva Instrucción EHE, con el objetivo de analizar el comportamiento de forjados de viguetas pretensadas a esfuerzo cortante en la nueva Instrucción EHE.

Se realizaron 162 ensayos entre 1995 y 2005, correspondientes a 16 clases de viguetas pretensadas con materiales, dimensiones y cuantías conocidas marcadas por la misma Instrucción. Se calcularon los valores teóricos de cortante con distintas expresiones matemáticas dadas en la Instrucción y se compararon con los cortantes obtenidos de los ensayos para determinar que la relación entre cortante de ensayo y cortante teórico debe ser mayor o igual a 1.

De los ensayos realizados se obtuvo que el cociente anteriormente mencionado estuvo en el orden de 1,50; por lo que los nuevos criterios de la Instrucción EHE permiten valores próximos a los resultados experimentales.

- Estudio experimental de cambio de peralte en un sistema de losa prefabricada con vigueta pretensada y bovedilla aligerante de poliestireno

En el año 2008, en la ciudad de Veracruz, México, Gil Enrique Vázquez Ávila y Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández realizaron un trabajo de investigación titulado Estudio experimental de cambio de peralte en un sistema de losa prefabricada con vigueta pretensada y bovedilla aligerante de poliestireno, donde el objetivo principal es comparar el comportamiento mecánico de dos sistemas de losas y complementar con un modelo experimental a fin de corroborar el comportamiento de ambos sistemas estructurales.

Se estudiaron dos tipos de losas prefabricadas de vigueta pretensada y bovedilla aligerante de poliestireno de diferente peralte utilizando un mismo tipo de vigueta de 5 m de longitud, teniendo sus apoyos a cada 4,50 m, concreto con  $f'c$  de 430 kg/cm<sup>2</sup>, cuatro alambres de presfuerzo de 5 mm en la zona principal por debajo del centro de gravedad y uno de 3 mm para equilibrio de esfuerzos arriba de su centro de gravedad.

La primera configuración de la losa en estudio para el modelo experimental tiene un peralte total de 17 cm, compuesta de dos viguetas T13-5530; bovedilla de poliestireno de densidad 11 kg/m<sup>3</sup>, ancho de 60 cm y entre ejes efectivo de 71 cm; capa de compresión de 4 cm con concreto de  $f'c$  igual a 200 kg/cm<sup>2</sup>. La segunda configuración de la losa tiene un peralte de 21,5 cm, compuesta de dos viguetas de T13-5530; bovedilla de poliestireno con densidad de 11 kg/m<sup>3</sup>, ancho de 70 cm y entre ejes efectivo 81 cm; capa de compresión de 4 cm con concreto de  $f'c$  igual a 200 kg/cm<sup>2</sup>.

Al aumentar el peralte se obtienen ventajas en cuanto a la disminución en la masa, incremento de la rigidez, mayor resistencia última en un 23 %, un 84 %

mayor al de carga de servicio. La rigidez obtenida por aumento de peralte ayuda al sistema prefabricado en el control de las deflexiones, pero no se recomienda llevarla a una carga más allá del 35 % de la carga especificada como carga de agrietamiento propuesta por el ACI y sus recomendaciones para evitar degradación del acero por exposición al medio ambiente aun cuando puede adoptar valores al colapso de 400 % para el primer sistema de losa y de 200 % para el segundo sistema de losa.

En los estudios realizados no se hace una mención clara del tipo de cemento a utilizar (que por el origen europeo ha de ser portland) ni se menciona la resistencia del acero pretensado. En los últimos casos se maneja un  $f'c$  430 kg/cm<sup>2</sup> y 200 kg/cm<sup>2</sup>, esto le da importancia al presente trabajo de investigación ya que el  $f'c$  es de 422 y cemento tipo puzolánico además de enfocarse en la resistencia a flexión a diferencia de los estudios anteriores que tiene un enfoque en la resistencia a corte de la viga.

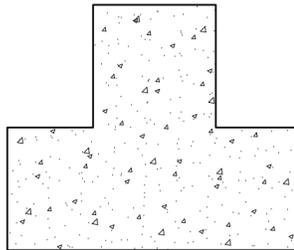
## 2. LOSA PRETENSADA SISTEMA TI EXTRUIDA

### 2.1. Generalidades

Previo a detallar los elementos que integran una losa pretensada sistema Ti extruida definiremos algunos conceptos del título del presente trabajo de graduación.

- Vigüeta tipo Ti: Hace referencia a que el elemento principal de la losa es una vigüeta tipo T invertida (ver figura).

Figura 1. Sección transversal de vigüeta T invertida



SECCION TRANSVERSAL VIGUETA TI  
SIN ESCALA

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

- Prefabricada: Se refiere a que elementos que integran la losa han sido fabricados en un sitio que no corresponde a su ubicación final y que han requerido cierto control de calidad.

- Pretensado: Se denomina así al concreto que se le han inducido esfuerzos de compresión previo a que el elemento esté en condiciones de servicio con el objetivo de aumentar su capacidad de carga sin aumento en su peralte y así también eliminar las fisuras generadas por el peso propio del elemento. Ver capítulo 3
- Losas en una dirección: Se clasifica como losa en una dirección cuando la acción estructural de la misma se dirige únicamente hacia un sentido, aunque tenga apoyos en ambos sentidos.

Generalmente la carga se dirige en la dirección paralela al lado corto de la plancha de losa, esto sucede por sus dimensiones geométricas y matemáticamente se puede clasificar como losa en un sentido calculando la relación lado largo sobre lado corto, si esta es mayor a dos se dice que la losa actuará únicamente en un sentido es decir que si la forma de la losa se asemeja más a un rectángulo ésta actuará dirigiendo las cargas a los apoyos con longitud menor; otra forma de determinar si una losa actuará en un sentido, es relacionando la forma que tomará la losa ya deformada, si ésta describe una forma con curvatura simple (un cilindro) la losa actuará en un sentido. (Ver figura 2)

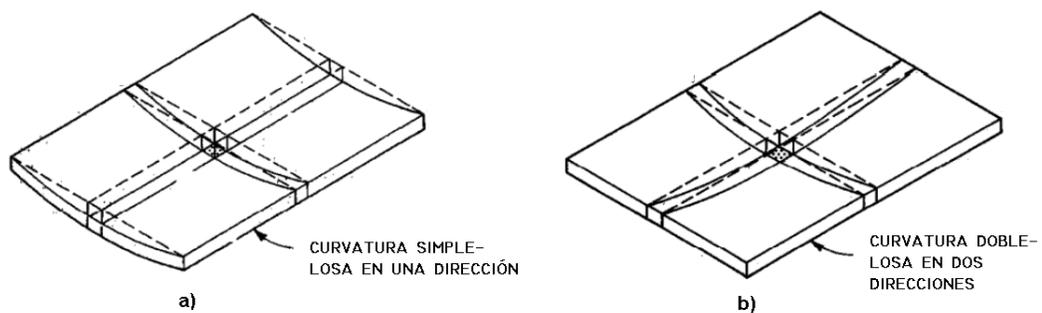
La losa pretensada sistema Ti extruida es un tipo específico de las losas prefabricadas aligeradas de vigueta y bovedilla.

Generalmente las viguetas pueden ser de alma llena en forma de "T" invertida, de alma abierta o también llamada tipo joist; de concreto armado o de concreto pretensado.

Las bovedillas son fabricadas de mezclas utilizando cemento y arena también se puede usar arcilla y poliestireno.

En este trabajo de investigación se hace referencia específicamente a la losa pretensada sistema Ti extruida, conformada por los siguientes elementos: viguetas tipo Ti extruidas, bovedillas elaboradas con mezcla de concreto y arena, estructomalla, topping de concreto (capa de compresión) y un elemento especial llamado “trabe tipo U”, a continuación, se detallan los elementos de forma individual.

Figura 2. **Acción estructural de una losa con relación a su forma deformada**



Fuente: NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto*. p. 367 y 374.

## 2.2. Elementos

A continuación, se describen cada uno de los elementos que conforman el sistema de losa con vigueta tipo Ti prefabricada y pretensada.

### **2.2.1. Vigüeta tipo Ti pretensada extruida**

En este apartado se tratarán específicamente los materiales utilizados para la fabricación de la vigüeta y en el capítulo 5 se dará un resumen de las especificaciones según norma que debe cumplir este elemento.

Es un elemento estructural, diseñado con el objetivo de soportar y transmitir a través de él hacia los apoyos las cargas que actúen sobre la losa, su nombre Ti hace referencia a una te invertida ( $\perp$ ), que es la forma en que se dispone la vigüeta puesta en obra; extruida debido al proceso por el cual está elaborado, en el que la mezcla es empujada a través de un troquel con sección en forma de "T", ésta mezcla se asemeja a una pasta consiguiendo un acabado menos áspero en la superficie de la vigüeta comparado con las fabricadas tradicionalmente.

Los materiales utilizados para la fabricación de la vigüeta Ti extruida son:

- Concreto: Debido a que el proceso de fabricación es por medio de extrusión, se hace necesaria una pasta homogénea que al momento de pasar por el troquel se generen la menor cantidad de vacíos, ya que a diferencia de un proceso tradicional a ésta no se le podrán inducir vibraciones para el acomodo de los agregados. Los materiales que integran esta pasta son:
  - Material cementante: Es de tipo puzolánico de 4 000 psi.
  - Agregados: De tamaño máximo nominal menor al utilizado para elaboración de vigüetas tradicionales, en este caso se utilizó de  $\frac{1}{4}$ ".
  - Aditivos

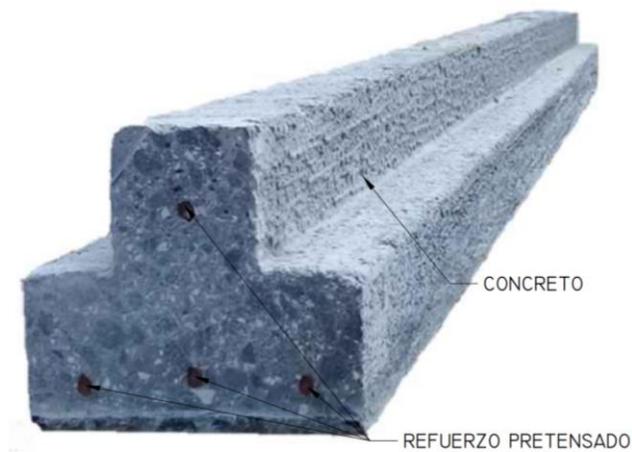
Es importante mencionar que, al realizar la prueba de Cono de Abrams a la pasta, el valor máximo permitido de asentamiento es de cero.

- Acero de pretensado: Estos materiales son utilizados para transmitir la carga de pretensado al concreto. En función de lo que se requiera en el diseño del elemento de concreto pretensado se pueden utilizar barras, alambres y torones, mismos que deben cumplir con los requisitos que se dan en el reglamento ACI 318SUS-14 específicamente en la sección 20.3.
  - Torón: Grupo de cables que tienen un cable central cerrado herméticamente por seis alambres exteriores colocados helicoidalmente con paso uniforme de mínimo 12 y máximo 16 veces el diámetro nominal del torón. Fabricado en grado 250 y 270 con diámetros de 6,4 a 15,2 mm y 9,53 a 17,8 respectivamente. (ASTM A416M)
  - Alambre: Hilo de metal, existen dos tipos. (ASTM A 421M)
    - Tipo BA (Button Anchorage): Alambre con anclaje de botón fabricado en diámetros de 4,88 a 7,01 mm.
    - Tipo WA (Wedge Anchorage): Alambre con anclaje de cuña fabricado en diámetros de 4,88 a 7,01 mm.
  - Barra de alta resistencia: Fabricadas en dos tipos. Ambas con una resistencia a la tracción mínima de 1 035 Mpa. (ASTM A722M)
    - Tipo I: Estas tienen una superficie lisa, fabricadas con diámetros de 19 a 35 mm.
    - Tipo II: Estas tienen una superficie corrugada, fabricada con diámetros de 19 a 75 mm.

La vigueta es el elemento principal en los sistemas de losas en una dirección, su función como parte del sistema es soportar los esfuerzos de flexión, principalmente, y los esfuerzos de corte que se soliciten debidas a las cargas aplicadas.

Es importante mencionar que la vigueta Ti no tendrá extensión del refuerzo pretensado para el anclaje a la solera de corona ya que el proceso de fabricación así lo requiere (ver Figura 3) para lo cual se le incorpora una varilla de acero horizontal en forma de U denominada, refuerzo por solapo, (ver sección 2.2.5); debido a su peralte de 0,1 metro le da la capacidad de ser autoportante eliminando la necesidad de colocación de parales ahorrando así material en obra falsa y un ahorro general de la obra.

Figura 3. **Vigueta Ti prefabricada pretensada**



Fuente: Megaproductos. *Ficha Técnica de Losa pretensada sistema Ti extruida*. p. 1.

Rara vez el cortante controlará el diseño de losas en una dirección, ya que  $\phi V_c \gg V_u$  el cortante de diseño es mucho mayor al cortante requerido, por lo mismo y especialmente en este caso no lleva refuerzo para resistir los esfuerzos

de corte ya que como se mencionó anteriormente el cortante resistido por el concreto es mucho mayor que el cortante requerido.

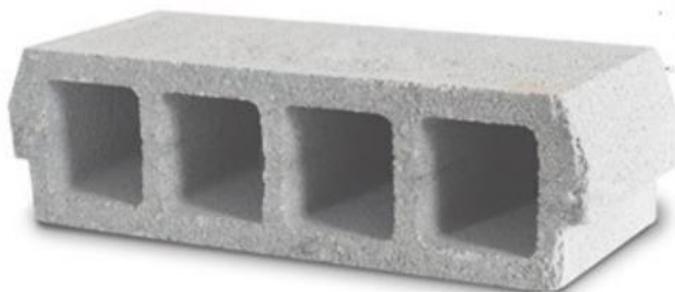
### **2.2.2. Bovedilla de concreto**

El concepto bovedilla hace referencia a una bóveda pequeña generalmente elaborada de mampostería cuya función es trabajar a compresión en algunos casos y en otros únicamente cubrir los espacios entre varias paredes o pilares, en este caso el de llenar el espacio entre viguetas separadas una cierta distancia.

Una ventaja que proporcionan las bovedillas es que aligeran la losa por lo que el peso propio disminuye por lo tanto existe un ahorro en la estructura, mano de obra y cuantía de acero.

En cuanto a materiales, puede estar hecha de mezcla de concreto, una mezcla de arcilla o de poliestireno.

Figura 4. **Bovedilla de concreto que integra la losa sistema Ti extruida**



Fuente: Megaproductos. *Ficha Técnica de Losa pretensada sistema Ti extruida*. p. 1.

Los materiales de los cuales está hecha la bovedilla utilizada en este sistema de losa es de mezcla de material cementante con puzolanas y agregado

fino, con una resistencia sobre área bruta de  $25 \text{ kg/cm}^2$ , con un peso promedio de  $9,4 \text{ kg}$  ( $20,7 \text{ lb}$ ) y un peralte de  $0,1 \text{ metro}$ . (Ver figura 4)

### **2.2.3. Topping de concreto**

También denominada capa de compresión y se refiere a la capa superior que integra la losa, montado en obra y de concreto preparada in situ.

Su función principal es resistir los esfuerzos de compresión inducidos por flexión que se soliciten al momento de que la estructura esté en servicio, además de ser la encargada de unificar todos los elementos que integran el sistema de losa.

Generalmente tiene un peralte mínimo de  $0,05 \text{ m}$ , esto con el objetivo de cumplir con lo establecido por el Reglamento ACI 318-14 en la tabla 20.6.1.3.2 que está relacionado con el recubrimiento del acero de refuerzo, en este caso será para cubrir al acero que cubre las solicitaciones por esfuerzos debidos a los cambios de temperatura.

Para este sistema de losa se debe utilizar un concreto con una resistencia especificada a la compresión mínima de  $210 \text{ kg/cm}^2$  ( $3\ 000 \text{ psi}$ ).

### **2.2.4. Estructomalla**

Es una malla de acero, electrosoldada, que se coloca después de haber colocado las viguetas y bovedillas, cumple la función de absorber los esfuerzos provocados por la retracción del concreto y las variaciones de temperatura. Esta área de acero ayudará a minimizar la fisuración en un nivel aceptable y amarrar la estructura según ACI 318-14 en el artículo R 24.4.1.

Fabricada con acero de grado 70, cuadrícula de 6x6 calibre 9/9. Ahora se explica la nomenclatura de una estructomalla ya que no es muy común que se conozca a qué se refieren esos números con los cuáles se denomina un elemento de este tipo. La nomenclatura 6x6 se refiere a que la malla tiene una cuadrícula de 6 plg por 6 plg o 15x15 cm; la nomenclatura 9/9, hace referencia al calibre SWG (Steel Wire Gauge) de la varilla longitudinal, así como también el calibre SWG (Steel Wire Gauge) de la varilla transversal, una varilla calibre 9 tiene 3,80 mm de diámetro.

“En losas estructurales en una dirección donde el refuerzo a flexión se extiende en una sola dirección, se debe colocar refuerzo en dirección perpendicular al refuerzo a flexión para resistir los esfuerzos debidos a la retracción y temperatura”.<sup>1</sup> También indica que, la cuantía del refuerzo corrugado de retracción y temperatura calculada con respecto al área bruta de concreto debe ser mayor o igual a 0,0018, para grado 60. Además, indica que el espaciamiento máximo entre las varillas debe ser el menor entre  $5h$  y 450 mm.

### **2.2.5. Refuerzo de acero en conexión por solapo**

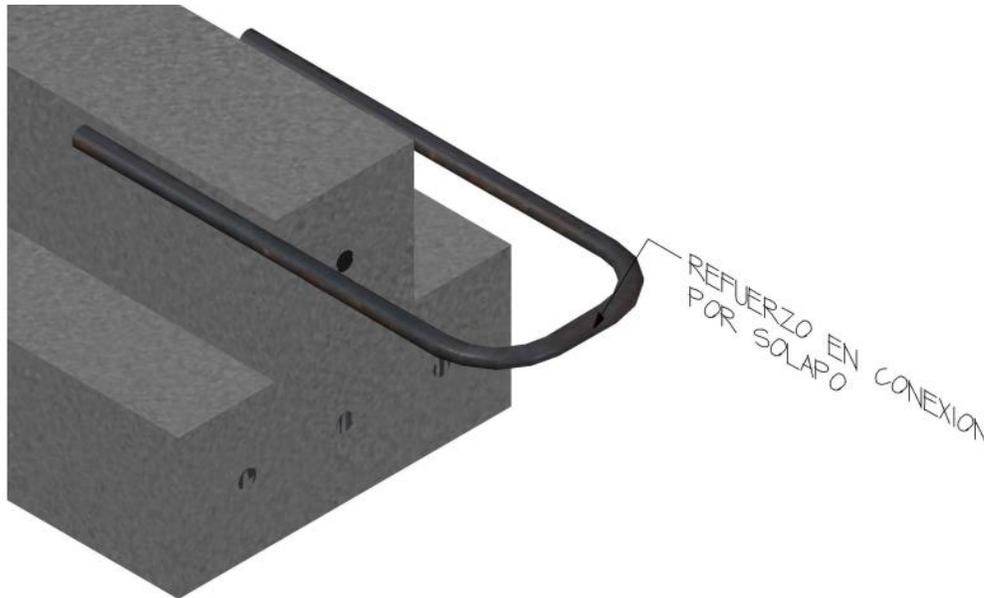
Pieza de acero grado 70 y diámetro de 6,20 mm, doblado en forma de “U”, colocado en cada extremo de las viguetas que integren la losa, quedando ubicada entre la estructura y la vigueta.

Colocada con el objetivo de contribuir a soportar los efectos provocados por sismo ya que asegura la continuidad, estabilidad e integridad estructural del sistema de piso con la solera de amarre y el muro portante en mampostería o a la viga en marcos estructurales.

---

<sup>1</sup> ACI. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318SUS-14*. p. 429.

Figura 5. **Refuerzo de acero en conexión por solapo**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

### **2.3. Conexiones en sistemas de losas prefabricadas**

El Reglamento ACI-318-14 se refiere a una conexión como la región de una estructura donde se unen dos o más miembros, compuesta por el nudo y parte de los miembros adyacentes. Además, se refiere al nudo como la porción de la estructura que es común a los miembros que se interceptan.

Existe una preocupación por la deficiencia en continuidad en las construcciones prefabricadas por lo que en ellas las conexiones son una parte crítica. Según Philip W. Birkeland y Howard W. Birkeland los miembros y las conexiones van de la mano y juntas son el concepto estructural. En una estructura se requiere una adecuada función estructural, lo que significa que debe soportar tanto las cargas de servicio como las cargas últimas sin llegar al

colapso, por lo que se debe procurar que los miembros individuales deben ceder y fallar antes que las conexiones. La falta de continuidad, es decir la resistencia a la separación, en las conexiones, según Philip W. Birkeland y Haward W. Birkeland podría convertir una estructura sólida en un castillo de naipes.

Para realizar un buen diseño de una estructura con elementos prefabricados se debe seguir un precepto básico de las estructuras monolíticas y es que, para evitar fallas, todos los planos potenciales de falla deber ser atravesado por acero de refuerzo, proporcionándole un anclaje adecuado en ambos lados del plano de falla potencial en consideración.

Tres problemas comunes que se presentan en la construcción de edificaciones relacionados a las conexiones se dan al momento de colocar este acero de refuerzo: el primero, cuando existe un traslape insuficiente entre el anclaje del refuerzo de conexión y el acero estructural principal; el segundo, el traslape es confinado inadecuadamente; y la tercera, es la incorrecta orientación de este refuerzo que no permitirá absorber las tensiones de tracción. Una forma de evitar estos problemas es detallar minuciosamente todas las conexiones.

### **2.3.1. Conexión por entrega**

Se le llama conexión por entrega cuando parte de los extremos del miembro horizontal en este caso la vigueta queda encajada en la solera de amarre en el caso de que el apoyo es un muro portante o sobre una viga si se trata de un sistema de marcos estructurales.

### **2.3.2. Conexión por solapo o a tope**

Se le llama conexión por solapo o a tope cuando los extremos de la vigueta no encajan en la solera de amarre o viga de apoyo.

¿Cuándo se utiliza este tipo de conexión? Cuando no se desea que el extremo de la vigueta quede dentro de la solera o viga de apoyo, cuando se quiere evitar que se vea el inglete de la solera o viga de apoyo o cuando se utilizan soleras o vigas del mismo peralte que el sistema de losa.

Para lograr integrar la losa con los muros portantes y que además resista las sollicitaciones de corte por fricción se coloca un tipo de refuerzo de acero en forma de U que proporcione la continuidad del sistema de losa de vigueta y bovedilla.

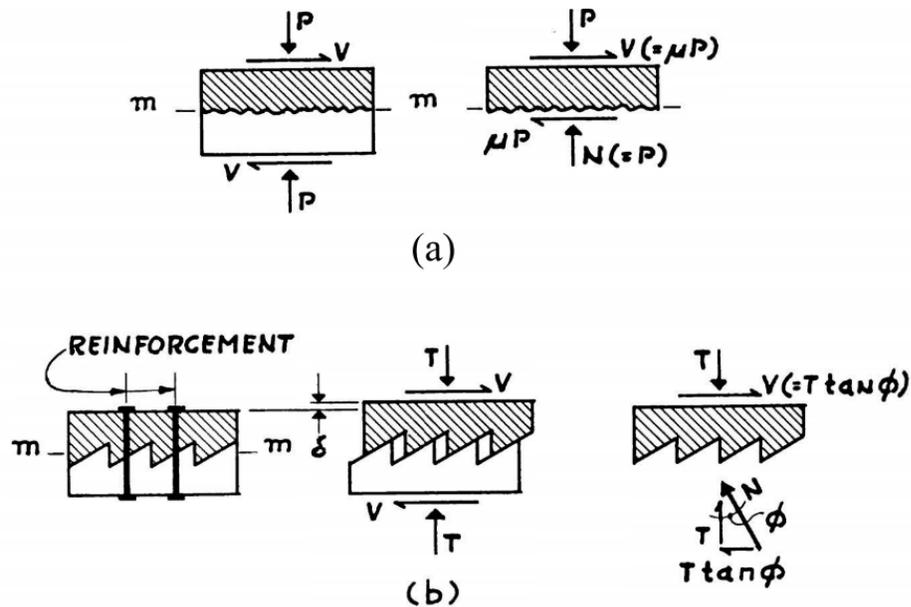
Este tipo de conexión se diseña tomando en cuenta el cortante por fricción.

#### **2.3.2.1. Hipótesis de cortante por fricción**

En concreto prefabricado la preocupación se da en las conexiones por las fallas de cortante provocado por el desplazamiento a lo largo de un plano de cortante máximo y no provocada por una grieta de tensión como es el caso común en concreto monolítico. El más claro ejemplo de esto es el cortante que sucede en la interfaz entre una viga prefabricada y una losa fundida in situ.

El diseño de cortante por fricción se creó como una herramienta para el diseño de las conexiones entre vigas y columnas muy cargadas, una de sus cualidades más atractivas es que permite la fácil visualización de la acción estructural en una conexión compacta y muy cargada.

Figura 6. Hipótesis del cortante por fricción



Fuente: BIRKELAND, P. W. y BIRKELAND, H. W. *Connections in precast concrete construction*.  
p. 15.

De la figura 6 se considera el bloque de concreto monolítico y una grieta o plano de falla  $m - m$ , las cargas de corte externas  $V$  deben entenderse como colineales y provocan deslizamientos a lo largo del plano. El deslizamiento es resistido por la fricción  $\mu P$  resultante de la fuerza de sujeción externa  $P$ . Si el plano de falla es rugoso, el movimiento de deslizamiento a lo largo del él provocará una separación  $\delta$  de las dos mitades. Si se coloca refuerzo a través de la interfaz, la separación desarrollará una tensión  $T$  en él llevándolo hasta su resistencia especificada a la fluencia, y ya que el refuerzo está anclado a ambos lados de la grieta, la tensión proporciona una fuerza de sujeción  $A_{vf} f_y$  externa sobre el concreto, resultando en una compresión a través de la interfaz de igual magnitud.

La rugosidad puede visualizarse como una serie de rampas en forma de dientes de sierra, sin fricción, con una pendiente  $\tan \varphi$ . Relacionando las figuras (a) y (b) se obtiene que la fuerza de fricción equivalente a:

$$\mu P = T \tan \varphi$$

También se tiene que:  $V = \mu P$

Se considera además que la fuerza de tensión T es equivalente a la fuerza de sujeción externa P.

La hipótesis anterior puede aplicarse también para juntas de construcción lisas o con rugosidad artificial y a interfaces de acero-concreto, con valores de  $\tan \varphi$  relativamente menores ya que la pendiente de los dientes de sierra sería menor.

### **2.3.2.2. Consideraciones en el diseño**

- El refuerzo debe ser anclado en ambos lados del plano de falla.
- El anclaje del refuerzo debe ser suficiente para desarrollar la resistencia especificada a la fluencia del acero.
- El uso de estribos es requerido para el confinamiento del concreto.
- Tomar en cuenta que las fuerzas de tracción externas disminuyen la fuerza de sujeción.
- La interfaz debe ser sólida y libre de lechada, aserrín, pintura y material óxido.
- Seleccionar el plano de falla de la manera más cuidadosa posible.
- Seleccionado el plano de falla, proporcionar suficiente acero de refuerzo.
- Proveer de suficiente longitud de desarrollo para el anclaje a través de ambas caras de la interfaz.

### **2.3.2.3. Criterios de diseño de acuerdo con el ACI 318-14**

En el código ACI 318-14, específicamente en la sección 22.9 se dan criterios para un diseño seguro en cuanto a la resistencia a cortante por fricción.

#### **2.3.2.3.1. Resistencia de diseño**

La resistencia de diseño para el cortante transferido a través del plano de falla supuesto debe cumplir con:

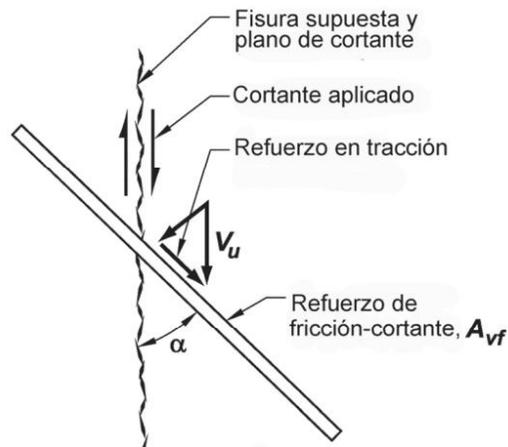
$$\phi V_n \geq V_u$$

#### **2.3.2.3.2. Resistencia nominal a cortante $V_n$**

- El valor de  $V_n$  que se transfiere a través del plano de cortante supuesto debe calcularse de acuerdo con las siguientes ecuaciones:
  - $V_n = \mu A_{vf} f_y$  Cuando el refuerzo se colocará perpendicular al plano cortante.
  - $V_n = A_{vf} f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)$  Cuando el refuerzo se colocará en línea inclinada con respecto al plano cortante. Donde  $\alpha$  es el ángulo entre el refuerzo de cortante por fricción y el plano de falla supuesto. (Ver figura 7). La ecuación anterior se debe aplicar únicamente si la componente de la fuerza cortante paralela al refuerzo produce tracción en él y si la componente paralela al plano de falla resiste parte del cortante. Por el contrario, si la componente de la fuerza

cortante paralela al refuerzo le provoca esfuerzos de compresión, el procedimiento de cortante por fricción no es aplicable.

Figura 7. **Tracción en el refuerzo de cortante por fricción**

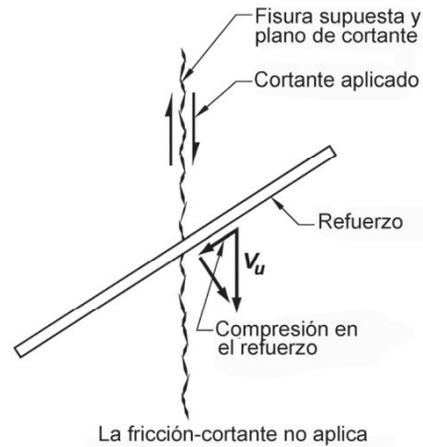


Fuente: ACI. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318SUS-14*. p. 405.

- Pero  $V_n$  no debe exceder el valor calculado de acuerdo con la Tabla 22.9.4.4 del reglamento ACI 318-14. (Ver anexos)
- Cuando la junta de construcción sea entre concretos de diferentes resistencias el uno contra el otro, debe utilizarse el menor valor de  $f'_c$ .
- El área requerida de refuerzo para cortante por fricción a través del plano de cortante supuesto, se calcula como:

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y \mu}$$

Figura 8. **Compresión en el refuerzo de cortante por fricción**



Fuente: ACI. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318SUS-14*. p. 406.

- El valor del coeficiente de fricción  $\mu$  debe obtenerse de acuerdo con la Tabla 22.9.4.2 del reglamento ACI 318-14. Para el caso de concreto colado in situ, contra concreto endurecido que está limpio, libre de lechada, y que no se hizo intencionalmente rugoso, tiene valor de  $0,6\lambda$ ; donde  $\lambda = 1$  para concreto de peso normal y  $\lambda = 0,75$  para concreto totalmente ligero.

En cuanto al detallado del refuerzo para cortante por fricción, debe anclarse a ambos lados del plano de falla supuesto para desarrollar y deberá de colocarse en la zona de tracción por flexión en caso de que en la conexión actúen momentos, de lo contrario se distribuirá uniformemente a través del plano de falla supuesto, para minimizar los anchos de fisura.



### 3. CONCRETO PRESFORZADO

Como bien se sabe, la resistencia a tracción del concreto es en promedio el 10 % de su resistencia a la compresión, por lo que al llegar a este valor máximo de resistencia a la tracción se generan fisuras que son proporcionales a la cantidad de esfuerzo que resista el acero de refuerzo, es por ello por lo que se considera el uso de un concreto presforzado, utilizando acero y concreto de alta resistencia. “El presforzado puede definirse en términos generales como el precargado de una estructura o elemento, antes de la aplicación de las cargas de diseño requeridas, hecho en forma tal que mejore su comportamiento general en condiciones de servicio”.<sup>2</sup>

Para una mejor comprensión del efecto del presfuerzo, se supone que una persona sostiene entre las palmas de sus manos una cierta cantidad de libros con grosor aproximado de 2 cm cada uno, la persona ejerce una fuerza mínima, únicamente para evitar que los libros resbalen; al momento de que se le aplicara una carga vertical sobre la fila de libros los del centro empezaran a deslizarse hacia abajo respecto de los libros del extremo e irán deslizándose aún más conforme se aumente la carga vertical, como se ve en la figura 9.

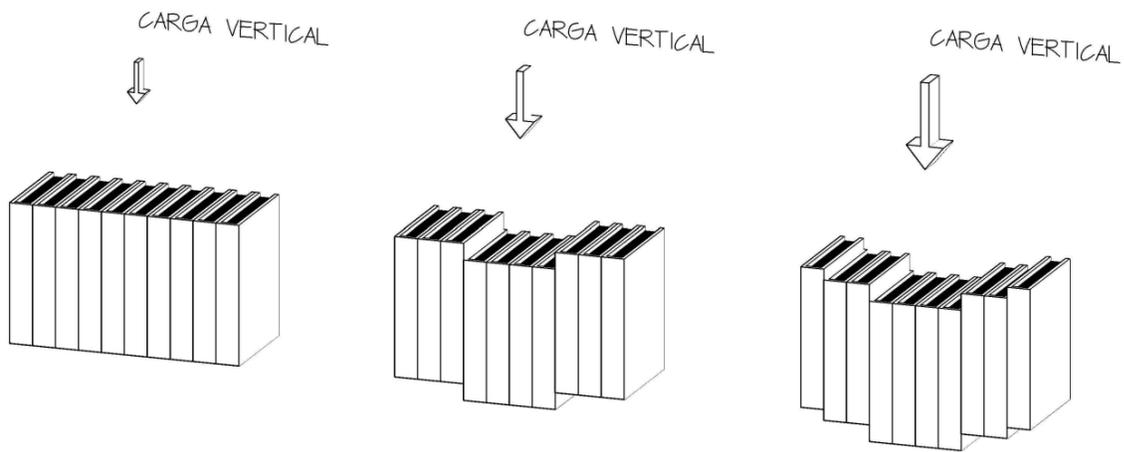
Ya que el objetivo de la persona es que la fila de libros soporte la mayor carga posible, sin que los libros deslicen, ésta ejerce una fuerza horizontal por medio de las palmas de sus manos con el objetivo de unir los libros, esta fuerza debe ser suficientemente grande como para lograr que la fila de libros soporte

---

<sup>2</sup> NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto presforzado*. p. 17.

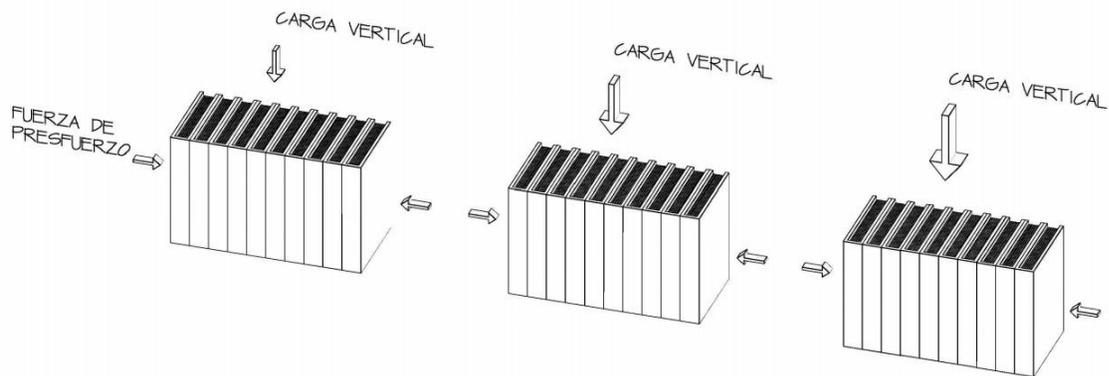
una carga vertical mucho mayor que la soportada sin aplicar la fuerza horizontal (ver figura 10).

Figura 9. **Analogía con libros del concreto reforzado**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

Figura 10. **Analogía con libros del concreto presforzado**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

A grandes rasgos el comportamiento del concreto presforzado es como se muestra en la figura 10. Si cada libro se toma como una fibra de concreto y la fuerza horizontal ejercida por las palmas de las manos como la fuerza de presfuerzo, se aprecia que ésta fuerza que hace que las fibras de concreto se mantengan unidas logra que el elemento con las mismas dimensiones, soporte una mayor carga y además evita que estas fibras se separen o deslicen provocando grietas en el elemento.

El presforzado en el concreto se consigue tensando los tendones de acero. Cuando de concreto presforzado se trata, en el armado se consideran dos tipos de refuerzos; el refuerzo activo, formado por los tendones, encargados de transmitir la fuerza de presfuerzo al concreto por la adherencia entre los materiales; y por otro lado está el refuerzo pasivo formado por las varillas de acero ordinarias como los estribos encargados de soportar el cortante y la tensión diagonal y varillas longitudinales que controlan el agrietamiento por contracción al tensar el acero principal el concreto postensado.

Las viguetas de concreto presforzado utilizadas para losas en edificaciones con tipo de ocupación para viviendas generalmente solo están provistas de refuerzo activo, para vigas usadas en puentes además del refuerzo activo se considera la colocación de refuerzo pasivo.

Para obtener un elemento de concreto presforzado, se siguen dos métodos constructivos, el comportamiento es el mismo en el elemento independiente del método que se decida aplicar para la obtención del presfuerzo. A continuación, se describen ambos métodos.

### **3.1. Método de Postensado**

Este es un método por el cual se puede obtener un concreto presforzado. A continuación, se dan las características principales, con el fin de hacerse una idea a grandes rasgos de este, ya que no es el objetivo del presente trabajo de investigación.

#### **3.1.1. Características**

- Para lograr el presfuerzo en el concreto los tendones son tensados después de que el concreto se ha colado y éste haya alcanzado un porcentaje de la resistencia especificada a la compresión.
- Existe cierta facilidad para variar la excentricidad de los tendones a lo largo de la luz del elemento para proporcionar el contra momento necesario.
- Dentro del elemento se dejan embebidos ductos con el perfil deseado, dentro del cual irá introducido el acero de presfuerzo.
- Los elementos son fabricados in situ.
- Los accesorios de anclaje permanecen en los extremos del elemento.
- El control de calidad no es tan riguroso.
- Es necesario una mayor cantidad de formaleta.
- Se opta por este método cuando el acceso a la obra de construcción es limitado.

### **3.2. Método de Pretensado**

El pretensado es el método comúnmente utilizado para obtener concreto presforzado en las viguetas prefabricadas para sistemas de losas en una dirección, a continuación, se describe a detalle el método.

### **3.2.1. Características**

- En este método, los tendones son tensados previo al colado del concreto, una vez este haya alcanzado un porcentaje de la resistencia especificada a la compresión los tendones son liberados. La transmisión del presfuerzo se realiza por medio de la adherencia entre los tendones y el concreto.
- Los elementos se fabrican en banco en una planta industrializada en bancos formados por dos muertos ubicados en los extremos (uno como apoyo de los anclajes y otro como apoyo de aplicación de los gatos) sobre la pista de producción, mismos capaces de soportar la fuerza del tensado y que forman parte permanente de las instalaciones.
- Los elementos se fabrican en serie o masa, ya que, dependiendo de la capacidad de la planta de producción, los muertos pueden estar separados hasta 180 m.
- El control de calidad que se maneja al momento de la fabricación es relativamente mejor que para el concreto postensado.
- Es relativamente económico por la reutilización de la formaleta, al fabricarse en serie se ahorra en mano de obra y no existe herraje de anclaje de los extremos como es el caso del postensado.
- Se opta por aplicar este método cuando es accesible llegar al lugar de la obra, esto se debe tomar en cuenta por cualquier inconveniente que pudiera ocurrir con el transporte de los elementos.

### 3.2.2. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de un concreto pretensado implica desde la aplicación del tensado en los tendones hasta el almacenamiento de los elementos obtenidos.

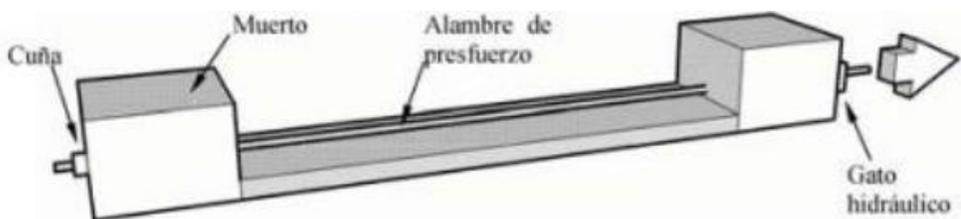
A continuación, se describe cada paso del proceso de fabricación.

#### 3.2.2.1. Aplicación del tensado

Los tendones son colocados de extremo a extremo de la pista de producción atravesando los muertos; por medio de cuñas se anclan los tendones en un extremo, evitando así que estos resbalen al momento de aplicar la fuerza de tensado siendo el muerto el encargado de soportar la fuerza de tensado.

Con la ayuda de un gato hidráulico se aplica la fuerza pretensora de diseño a los tendones en el extremo contrario al que se acuñó, se mide el alargamiento de los tendones, así como la fuerza de tensión, para esta tarea.

Figura 11. Pista de producción y tensado de los tendones



Fuente: ANIVIP A.C. *Manual de diseño estructural de sistemas de piso o losa a base de vigueta pretensada y bovedilla para edificaciones en zonas sísmicas.* p. 24.

### 3.2.2.2. Vaciado del concreto

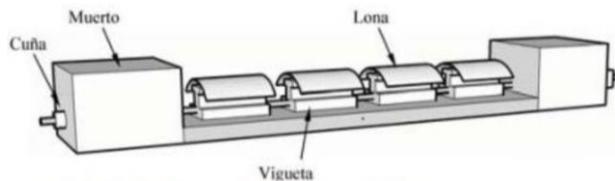
Se vierte el concreto, previamente dosificado, en los moldes de las viguetas, en torno a los tendones esforzados. Actualmente la producción de viguetas se realiza con máquinas extractoras que se encargan de darle la forma a la sección de la vigueta, con esto se eliminan las formaletas y moldes específicos. En el proceso de vaciado de concreto, cuando se utilizan moldes o formaletas, se debe aplicar el vibrado para evitar la formación de oquedades o las llamadas ratoneras.

Como se mencionó en el capítulo 2, debido a que estas viguetas se fabrican por medio de máquinas extrusoras y no existe una formaleta o molde, no es posible aplicar el vibrado. El concreto que se usa en este caso es una pasta muy homogénea con asentamiento muy cercano a cero.

### 3.2.2.3. Curado del concreto

Muchas veces se utiliza concreto ARI y en cuanto al curado se opta por el curado a vapor de agua para acelerar el endurecimiento del concreto, o también se colocan lonas sobre las viguetas de una forma más tradicional.

Figura 12. Curado tradicional de las viguetas

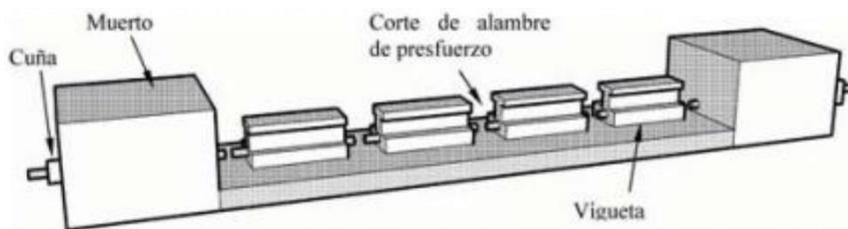


Fuente: ANIVIP A.C. *Manual de diseño estructural de sistemas de piso o losa a base de vigueta pretensada y bovedilla para edificaciones en zonas sísmicas.* p. 24.

#### 3.2.2.4. Cortado de tendones

Después de que el concreto haya alcanzado un porcentaje de su resistencia especificada a la compresión, se cortan los tendones o se libera la fuerza en los gatos. Los tendones por encontrarse aún en su rango elástico tenderán a acortarse, pero por la adherencia que ahora existe entre ambos materiales, los esfuerzos de tracción en el refuerzo activo se transmiten al concreto en forma de esfuerzos de compresión.

Figura 13. Cortado de los tendones



Fuente: ANIVIP A.C. *Manual de diseño estructural de sistemas de piso o losa a base de viga pretensada y bovedilla para edificaciones en zonas sísmicas.* p. 24.

#### 3.2.2.5. Almacenamiento

Después del corte de los tendones y obtener las viguetas con las longitudes de diseño, se procede a su retiro de la pista de producción y su almacenamiento. La norma NTG 41084 en su numeral 8 indica que se deben colocar como mínimo dos tablas y que de forma perpendicular se colocarán las viguetas apoyadas en sus tercios sobre las tablas, evitando que se formen contraflechas o excesivas deflexiones. Se permiten apilar como máximo 5 viguetas.

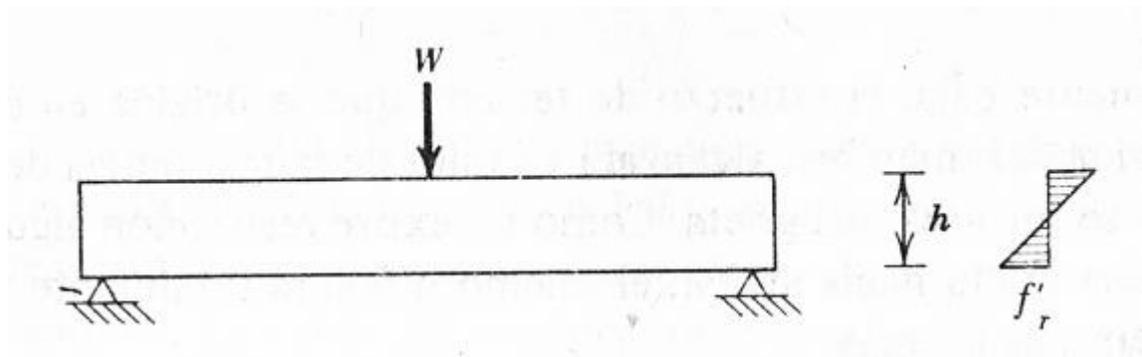
### 3.3. Fases del comportamiento del concreto presforzado

Como se mencionó anteriormente el comportamiento del concreto presforzado no difiere del método empleado.

Para comprender el comportamiento interno de los elementos presforzados, se supone una viga con una longitud  $L$  y sección  $a * b$ .

En la figura 14 se muestra la distribución de esfuerzos de la viga de concreto simple, al aplicarle una carga vertical hacia abajo, un corte realizado a la mitad de la luz de la viga muestra la distribución de esfuerzos en esta zona, tal distribución es lineal si el material se encuentra aún en la zona elástica. Cuando el concreto haya alcanzado su capacidad a la tracción  $f'_r$  se creará la primera fisura, relativamente esta carga será muy baja.

Figura 14. **Distribución de esfuerzos en una viga de concreto simple**



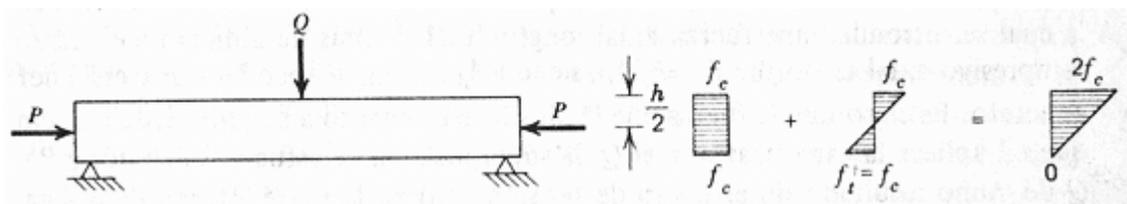
Fuente: NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto presforzado*. p. 23.

Si ahora se aplica una fuerza  $P$  a lo largo del eje longitudinal de la viga en  $h/2$  previo a la aplicación de la carga transversal  $Q$ , el elemento experimentará

únicamente esfuerzos de compresión hasta que se aplique la carga Q, entonces la superposición de los esfuerzos que provocan las cargas P y Q, eliminarán los esfuerzos de tracción en las fibras inferiores de la viga y lo que sucede en las fibras extremas es que los esfuerzos de compresión se duplican.

Debido a que la carga Q es la que provoca los esfuerzos de tensión en el concreto, se podrá variar la magnitud de la fuerza P para que la superposición de ambos esfuerzos elimine o reduzca en una cantidad los esfuerzos a tracción en las fibras inferiores.

Figura 15. **Distribución de esfuerzos de una viga presforzada axialmente**



Fuente: NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto presforzado*. p. 23.

En el caso anterior el objetivo fue eliminar o reducir los esfuerzos de tracción en las fibras inferiores de la viga, sin tomar en cuenta que al aplicar la carga Q los esfuerzos de compresión en las fibras superiores se duplicarían.

En el caso que sigue se propone que la fuerza P sea aplicada con cierta excentricidad constante a lo largo de la viga para lograr una mayor eficacia al contrarrestar los esfuerzos de tracción debidos a Q.

Además de mejorar el comportamiento en general, se busca también que el punto de aplicación de la fuerza  $P$  provoque ningún esfuerzo de tracción en las fibras superiores al actuar únicamente ella y evitar las contraflechas.

A continuación, se desarrolla el procedimiento para ubicar ese punto: Bastará con igualar a cero los esfuerzos actuantes. Al aplicar la fuerza  $P$  con una excentricidad, se tendrá que actuará un esfuerzo axial de compresión de magnitud  $\frac{P}{A}$  donde  $A$  es el área de la sección transversal, más un esfuerzo por flexión con magnitud  $\frac{Pec}{I}$  donde  $e$  es nuestra incógnita y es la distancia desde el centroide de la sección al punto de aplicación de la fuerza  $P$ ,  $c$  es la distancia desde el centroide de la sección a la fibra en estudio e  $I$  corresponde a la inercia de la viga.

$$-\frac{P}{A} + \frac{Pec}{I} = 0$$

Sustituyendo algunos valores de la ecuación se tiene:

$$-\frac{P}{b * h} + \frac{Pe \frac{h}{2}}{\frac{1}{12}bh^3} = 0$$

Simplificando la ecuación queda:

$$\frac{6e}{h} = 1$$

Entonces, para que se logren esfuerzos de tracción en las fibras superiores al actuar únicamente  $P$ , deberá aplicarse con una excentricidad igual a  $h/6$  o a una distancia igual a  $\frac{2}{3}h$  medida desde la fibra superior.

Aplicando la carga  $P$  con esa excentricidad y teniendo el mismo valor del caso anterior, se tiene que el esfuerzo máximo en la fibra inferior será igual a  $2f_c$ , por lo tanto, al superponer estos esfuerzos y los provocados por la carga transversal, se tiene que será posible aplicar hasta un valor de  $2Q$  para eliminar los esfuerzos de compresión en la fibra inferior.

A continuación, se demuestra que con  $e = \frac{h}{6}$  se logra una mayor capacidad de carga.

En la fibra inferior se tendrá que el esfuerzo axial más esfuerzo por flexión provocados por la fuerza  $P$ ,  $f_{max}$ , tendrá un valor máximo de:

$$-\frac{P}{A} - \frac{Pec}{I} = f_{max}$$

Sustituyendo los términos  $e$ ,  $c$  e  $I$  en la ecuación anterior se tiene que:

$$-\frac{P}{A} - \frac{P \frac{h}{6} \frac{h}{2}}{\frac{1}{12}bh^3} = f_{max}$$

Simplificando la ecuación, queda de la siguiente manera:

$$-\frac{P}{A} - \frac{P \frac{h}{6} \frac{h}{2}}{\frac{1}{12}bh^3} = f_{max}$$

$$-\frac{P}{A} - \frac{12Ph^2}{12bh^3} = f_{max}$$

$$-\frac{P}{A} - \frac{P}{bh} = f_{max}$$

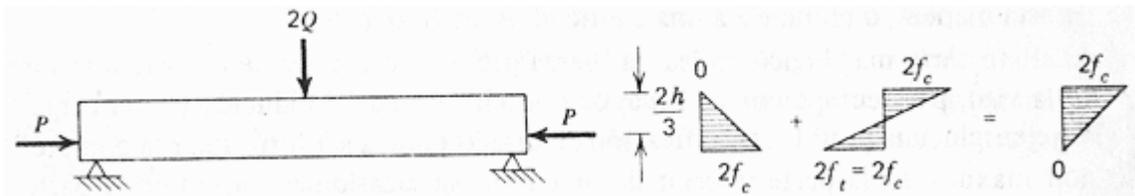
Conociendo que  $b \cdot h$  es el área de la sección transversal y que el esfuerzo provocado por la fuerza  $P$  aplicada axialmente es igual a  $-\frac{P}{A} = f_c$  se tiene que:

$$-f_c - f_c = f_{max}$$

$$-2f_c = f_{max}$$

En consecuencia, será posible aplicar una carga igual a  $2Q$  que produzca esfuerzos a tracción en la fibra inferior igual en magnitud a  $2f_c$ . (Ver figura 16)

Figura 16. **Distribución de esfuerzos de una viga presforzada con excentricidad constante**



Fuente: NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto presforzado*. p. 23.

Como se sabe las cargas transversales provocan esfuerzos de flexión máximos en el centro de la luz de la viga y con valor cero en los extremos. Para contrarrestar estos efectos de forma más eficaz se propone que el perfil que siga la fuerza  $P$  sea de la misma magnitud y sentido contrario al perfil que dibujan la variación de momentos debidos a la carga transversal. Esto se hace fácil ya que el momento de presfuerzo es proporcional a la excentricidad del tendón.

En estas condiciones, cuando sobre la vigueta actúa la carga transversal y la fuerza  $P$  sigue una trayectoria con excentricidad variable tal que la viga en ese momento experimenta únicamente esfuerzos de compresión se da la etapa de carga balanceada, por consiguiente, no existiría agrietamiento ni deflexiones.

Por ser una forma más práctica de desarrollar el diseño se aplica un diseño con excentricidad constante de los tendones. Se sabe que en condiciones de servicio los momentos son mayores en la parte central del elemento y menores en los extremos, es por ello por lo que para una mayor eficacia en el comportamiento se recomienda el uso de una excentricidad variable, sin embargo, con un diseño basado con una excentricidad constante en el tendón se logran que los esfuerzos en el extremo sean mayores a los momentos actuantes no siendo así en la parte central.

Las condiciones de apoyo generalmente serán las que rijan el diseño de vigas con excentricidad constante.

### **3.4. Especificaciones de los materiales**

Se darán algunas especificaciones que en general deben cumplirse al elegir tanto el acero y el concreto con los que se fabricarán los elementos.

### 3.4.1. Acero

Para el diseño del concreto presforzado se debe tener en cuenta que el acero de presfuerzo debe cumplir con ciertas características que se describen a continuación.

- Tipos de refuerzo

Los aceros utilizados para ser el refuerzo de presfuerzo deben ser de alta resistencia. En el capítulo 2.2.1 de este trabajo se describen los aceros permitidos según el Reglamento ACI 318-14 en su artículo 20,3, que pueden ser torones, alambres o barras.

- Resistencia especificada a la tracción  $f_{pu}$

El valor máximo de la resistencia especificada a la tracción en torones debe ser de  $f_{pu} = 19\ 000\ \text{kg}/\text{cm}^2$ ; en alambres de  $f_{pu} = 17\ 600\ \text{kg}/\text{cm}^2$  y en barras debe ser de  $f_{pu} = 10\ 350\ \text{kg}/\text{cm}^2$ .

- Resistencia especificada a la fluencia  $f_{py}$

La resistencia especificada a la fluencia del acero de presforzado no se marca de forma evidente en comparación con el acero de refuerzo, es por ellos que  $f_{py}$  se toma como el esfuerzo a una deformación unitaria del 1 % (0,01) en la curva de esfuerzo-deformación para alambres y torones. En la tabla R20.3.2.3.1 del código ACI 318-14 se da un valor aproximado para este esfuerzo y debe ser por lo menos  $f_{py} \geq 0,85 f_{pu}$ .

- Esfuerzo durante el tensionamiento

El esfuerzo máximo permisible a tracción en el refuerzo durante el tensionamiento debe ser el menor entre:  $0,94 f_{py}$ ,  $0,80 f_{pu}$  y la máxima fuerza en el gato recomendada por el fabricante de los anclajes. Conociendo este esfuerzo y el área de acero, se obtiene la fuerza de presfuerzo  $P_p$ . Esta fuerza en la práctica se aplica midiendo la presión hidráulica y por la deformación en el acero.

- Esfuerzo después de la transferencia  $f_{pi}$

El esfuerzo máximo permisible inmediatamente después de las pérdidas instantáneas (por acortamiento elástico y deslizamiento de anclajes) es decir, después de la transferencia del presfuerzo al concreto por medio de la adherencia entre ambos materiales, pero antes de las pérdidas diferidas (por contracción, escurrimiento plástico y relajamiento), debe ser igual a  $f_{pi} = 0,7 f_{pu}$ . A partir de este esfuerzo se obtiene la fuerza inicial de presfuerzo  $P_i$  para el diseño del elemento.

- Esfuerzo efectivo  $f_{se}$

El esfuerzo efectivo en el acero de presfuerzo, es el esfuerzo después de que han ocurrido todas las pérdidas, se debe incluir el asentamiento en los anclajes del acero de presforzado durante la transferencia, acortamiento elástico del concreto, flujo plástico del concreto, retracción del concreto, relajación del acero de presforzado y las pérdidas por fricción debidas a la curvatura intencional o accidental de los tendones de postensado (en el caso de ser concreto postensado). Es común tomar el valor del esfuerzo efectivo como  $f_{se} = 0,85 f_{pi}$ , suponiendo que el porcentaje de las pérdidas de presfuerzo rondan en un 15 %.

- Módulo de elasticidad  $E_p$

El valor del módulo de elasticidad, para propósito de diseño, normalmente utilizado se encuentra entre  $1,9 * 10^6 \leq E_p \leq 2,0 * 10^6 \text{ kg/cm}^2$ . Lo mejor es que se determine mediante ensayos o que el valor sea indicado por el fabricante.

- Esfuerzo para el nivel de resistencia nominal a flexión  $f_{ps}$

En el artículo 20.3.2.3.1 del Código, se da una alternativa para la determinación del este valor con base en la compatibilidad de deformaciones, siempre que todo el refuerzo presforzado se encuentre en la zona de tracción y  $f_{se} \geq 0,5 f_{pu}$ .

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[ \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} \frac{f_y}{f'_c} (\rho - \rho') \right] \right\}$$

En esta ecuación, para el cálculo del esfuerzo para el nivel de resistencia nominal a flexión se incluye la influencia que tiene tanto el acero de refuerzo en la zona de tracción como el acero de refuerzo en la zona de compresión. Cuando no se hace uso del refuerzo pasivo la ecuación queda de la siguiente manera:

$$f_{ps} = f_{pu} \left[ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left( \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} \right) \right]$$

- Esfuerzo máximo a tracción de diseño en el refuerzo

El esfuerzo máximo a tracción de diseño en el refuerzo presforzado adherido (pretensado) calculado con la ecuación anterior se da en la tabla 25.9.4.5.1 del Código y debe ser:  $f_{ps} \leq f_{py}$ .

- Refuerzo mínimo

El refuerzo mínimo para flexión debe ser la adecuada para desarrollar una carga mayorada de al menos  $1,2 M_{cr}$ , donde  $M_{cr} = f_r I_g / y_t$  y  $f_r = 2 \lambda \sqrt{f'_c}$  y donde  $\lambda = 1,0$  por ser un concreto de peso normal.

- Recubrimiento

En la tabla 20.6.1.3.3 se dan los valores de recubrimiento de acero en elementos prefabricado y presforzados en planta.

Para viguetas no expuestas a la intemperie ni al suelo, con refuerzo presforzado de barras o alambres, el recubrimiento mínimo debe ser de 15 mm, este recubrimiento mínimo proporciona la protección contra la intemperie y otros efectos, aunque puede no ser suficiente para la transferir o desarrollar los esfuerzos y por ello se permite aumentar el recubrimiento.

- Espaciamiento mínimo

El espaciamiento horizontal mínimo, de centro a centro para alambres de pretensado en los extremos del miembro, debe ser el menor entre  $5d_b$  y  $[(4/3)d_{agg} + d_b]$ . El espaciamiento vertical mínimo se permite reducir lo en el centro del vano.

### 3.4.2. Concreto

Al igual que el acero, el concreto utilizado para la fabricación del concreto presforzado debe cumplir con ciertas calidades relacionado principalmente al material cementante utilizado en este.

- Tipos de concreto

Se utilizan concretos de alta resistencia. La resistencia especificada a la compresión debe superar los  $280 \text{ kg/cm}^2$  (4 000 psi).

- Cemento

Se opta por utilizar cementos ARI (Alta Resistencia Inicial) y fraguado rápido para obtener una resistencia a la compresión adecuada. Al momento de que se realice la transferencia del presfuerzo al concreto, este debe de tener una resistencia mínima que deberá alcanzar en el menor tiempo posible, para agilizar el proceso de producción.

- Resistencia del concreto al momento del presforzado inicial

La resistencia especificada a la tracción del concreto al momento del presforzado inicial  $f'_{ci}$ , debe ser de  $f'_{ci} = 0,7f'_c$ . En el Código se indica que la fuerza de presforzado debe transmitirse al concreto hasta que este haya alcanzado una resistencia determinada por medio de ensayos de cilindros curados de una manera igual que el miembro, al menos de  $175 \text{ kg/cm}^2$  para torones y barras individuales o al menos  $280 \text{ kg/cm}^2$  para tendones con múltiples torones.

- Esfuerzos admisibles después de la aplicación del presforzado

Los límites para los esfuerzos a compresión y tracción en el concreto después del cortado del refuerzo de presfuerzo es decir después de la aplicación del presforzado y antes de las pérdidas de presforzado que dependen del tiempo, se dan en las tablas 24.5.3.1 y 24.5.3.2, respectivamente y son:

- El esfuerzo límite a la compresión debe ser de  $f_{ci} = 0,60f'_{ci}$
  - El esfuerzo límite a la tracción debe ser de  $f_{ti} = 3\sqrt{f'_{ci}}$
- Esfuerzos admisibles bajo cargas de servicio

Los límites para los esfuerzos a compresión y tracción bajo cargas de servicio, en miembros sometidos a flexión y después de que hayan ocurrido todas las pérdidas de presforzado (pérdidas instantáneas y perdidas diferidas) se dan en la tabla 24.5.4.1 y 24.5.2.1, respectivamente, son:

- El esfuerzo límite a compresión debe ser de  $f_{cs} = 0,45f'_c$
- El esfuerzo límite a tracción debe ser de  $f_{ts} \leq 7,5\sqrt{f'_c}$ ,

### **3.5. Criterios de diseño por flexión de elementos compuestos**

En el presente trabajo se referirá a elementos compuestos cuando se unen concreto prefabricado con concreto elaborada in situ y que juntos actuarán como concreto monolítico. “El prerrequisito esencial para una acción compuesta es una buena adherencia entre el concreto prefabricado y el colado in situ”.<sup>3</sup> El cortante generado por flexión conducirá a que las dos partes de concreto diferente tiendan a deslizarse, para evitarlo la superficie de contacto del concreto prefabricado

---

<sup>3</sup> NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto presforzado*. p.288.

debe proporcionar la suficiente fricción natural, ya sea raspándola cuando la superficie de contacto es amplia de lo contrario se recomienda que el refuerzo del alma se prolongue hacia arriba para que proporcione la función de anclaje.

Los siguientes estados de carga se consideran para el diseño y el análisis de la sección compuesta:

- Presfuerzo inicial,  $P_i$ , inmediatamente después de la transferencia.
- $P_i + w_o$ , presfuerzo inicial más peso propio de la vigueta.
- $P_e + w_o$ , presfuerzo efectivo más peso propio de la vigueta (después de las pérdidas instantáneas).
- $P_e + w_o + w_{bo} + w_l$ , presfuerzo efectivo más carga muerta de sección compuesta.
- $P_e + w_o + w_{bo} + w_l + w_{ac} + w_L$ , presfuerzo efectivo más carga muerta de sección compuesta más las cargas de servicio
- Sobrecarga máxima.
- Para el análisis se supondrá que en ninguno de los estados anteriores el concreto no está agrietado.

Las cargas aplicadas previo a que fragüe el concreto colado in situ provocará flexión alrededor del centroide de la vigueta y las cargas aplicadas después de que el concreto haya fraguado provoca flexión alrededor del centroide de la sección compuesta. Tomar en cuenta lo anterior para las propiedades de la sección.

- En el análisis se debe aplicar el concepto de sección transformada para tomar en cuenta el cambio en rigideces de los concretos en la sección compuesta.

- Para el cálculo de  $M_n$  en losas o vigas de concreto compuesto se puede usar la sección compuesta total.
- Cuando en el caso que las resistencias especificadas a la compresión de los concretos de un elemento compuesto sean diferentes, se deben utilizar en el diseño las propiedades de los miembros individuales.
- Como opción se puede utilizar el  $f'_c$  con que se obtenga el valor más crítico de  $M_n$ .
- Para la transferencia de cortante horizontal la resistencia de diseño debe cumplir con  $\phi V_{vh} \geq V_u$ .
- Para la transferencia de cortante horizontal si la resistencia nominal  $V_u > \phi(35b_v d)$  entonces se tomará  $V_{nh} = V_n$  y se calculará  $V_n$  cómo se indica en la sección 2.3.2.3.2 del capítulo 2.
- El espaciamiento de estribos como refuerzo para la transferencia de cortante horizontal no debe ser mayor que 4 veces la dimensión menor del elemento ni 24 plg (600 ml).
- Para el diseño se realizarán dos revisiones: Los esfuerzos calculados deben cumplir con la sección 3.4.2.
  - La primera revisión se realiza después de la transferencia del prefuerzo, después de ocurridas las pérdidas instantáneas y los esfuerzos calculados deben ser menores que los esfuerzos admisibles después de la aplicación del presforzado.

- La segunda revisión se realiza después de que hayan ocurrido todas las pérdidas, después de las pérdidas diferidas y bajo las condiciones de servicio y los esfuerzos calculados deben ser menores que los esfuerzos admisibles bajo cargas de servicio.



## **4. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES**

La palabra propiedad según el diccionario de la lengua española significa atributo o cualidad esencial de alguien o algo, se refiere a una cualidad propia de un material, en este caso hablaremos específicamente de las propiedades del concreto pretensado.

### **4.1. Propiedades mecánicas**

Se hace referencia a las propiedades mecánicas de un material como las cualidades que presenta como una reacción al aplicarle una fuerza externa. “La mecánica de los materiales es una rama de la ingeniería que se encarga del estudio de la relación entre las cargas y las deformaciones de los materiales”.<sup>4</sup>

#### **4.1.1. Tenacidad**

Propiedad que es contraria a la fragilidad y cuantifica la cantidad de energía por unidad de superficie de rotura bajo la acción de un esfuerzo progresivo y no de impacto.

La tenacidad corresponde al área bajo la curva de un ensayo a tracción entre la deformación nula y la deformación correspondiente al límite de rotura absorbe tal energía para deformarse en lugar de fracturarse o romperse, esta propiedad depende del grado de cohesión entre las moléculas del material.

---

<sup>4</sup>*Filosofía de enseñanza de mecánica de materiales para los ingenieros del Siglo XXI.*  
<http://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/u301/43090e1.pdf>.  
Consulta: 7 de abril 2021.

Es decir que la tenacidad es la energía que absorbió el material antes de la rotura. Se mide en  $J/m^2$  o  $kgf*m/cm^2$ .

#### **4.1.2. Resiliencia**

La resiliencia se refiere a la capacidad de absorber energía por unidad de superficie en el rango elástico y corresponde al área bajo la curva del ensayo a tracción entre la deformación nula y la deformación del límite a la fluencia.

Es decir que la resiliencia es la energía que absorbió el material antes de su límite de fluencia, el material al retirarle la carga aún regresaría a su forma original debido a que se encuentra en su zona elástica. Se mide en  $J/m^2$  o  $kgf*m/cm^2$ .

### **4.2. Propiedades estructurales**

Cuando se trata de propiedades estructurales se hace referencia a las cualidades que posee una estructura como tal. Una estructura, en el contexto de la construcción, es un conjunto de elementos unidos, ensamblados o conectados entre sí, que deben mantener su unidad, estabilidad y equilibrio; que tienen la función de recibir cargas, soportar esfuerzos y transmitir esas cargas al suelo, garantizando así la función estático-resistente de la construcción.

#### **4.2.1. Resistencia a esfuerzos de compresión**

Es la capacidad de un elemento estructural de soportar esfuerzos cuando se aplica una fuerza normal a su sección transversal, en la misma dirección y sentido contrario, que tiende a acotar la longitud de este y ensancharlo en su sección transversal, apareciendo así el módulo de Poisson. "En el siglo XIX en el

año 1811, Simeón Denis Poisson, descubrió que, si el material es homogéneo e isotrópico, y permanece elástico bajo la acción de una fuerza aplicada, la deformación lateral sostiene una relación constante con la deformación axial”.<sup>5</sup>

Inmediatamente cuando se piensa en materiales que resistan de forma efectiva los esfuerzos de compresión se menciona el concreto, la diferencia entre el concreto reforzado y el concreto pretensado se caracteriza por una mayor resistencia, producto de una baja relación agua-cemento por lo que es bastante densa, con esto se elimina la posible formación de vacíos, se prefiere un curado a vapor para mejorar su hidratación. Las características dependen desde el diseño y control, del desarrollo del procedimiento de colado y el curado. Aumentando la capacidad de resistencia del concreto se consiguen secciones con menores dimensiones.

Para comprender mejor el comportamiento del concreto en función de su resistencia especificada, se pueden observar las curvas en la Figura 17, donde, se observa que el módulo de elasticidad de concretos de alta resistencia es mayor y se mide con la pendiente que marca en el origen. También se ve que el valor del máximo esfuerzo se alcanza a una deformación aproximada de 0,002, de forma general para los concretos analizados. En el diseño actual se toma un valor de 0,003 como deformación límite a compresión uniaxial, esto es cierto para concretos de 6 000 psi o menores.

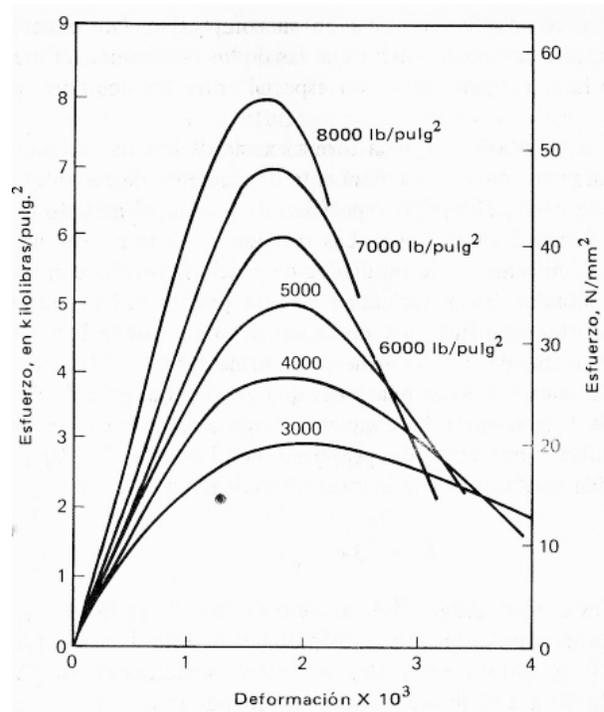
La resistencia del concreto va aumentando de forma gradual en función del tiempo, siendo este aumento mayor al principio. Lo anterior es importante ya que al soltar los cables de presfuerzo se transmitirán por adherencia entre el concreto y el acero de presfuerzo, lo que podría sobrepasar la resistencia alcanzada por

---

<sup>5</sup> *Filosofía de enseñanza de mecánica de materiales para los ingenieros del Siglo XXI.*  
<http://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/u301/43090e1.pdf>.  
Consulta: 7 de abril 2021.

el concreto en ese momento, por lo mismo se utilizan métodos para acelerar el desarrollo de la resistencia del concreto, incluyendo el uso de cementos de fraguado rápido o de alta resistencia inicial y optar por el curado a vapor.

Figura 17. **Curvas de esfuerzo-deformación típicas del concreto sujeto a compresión uniaxial**



Fuente: NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto presforzado*. p. 65.

En el libro de Diseño de estructuras de concreto presforzado, de Arthur H. Nilson, se muestran ecuaciones obtenidas de un estudio experimental con las cuales es posible obtener el valor de resistencia del concreto en función del tiempo, en días.

#### 4.2.2. Resistencia a esfuerzos de flexión

Es la capacidad de resistir las fuerzas aplicadas de forma perpendicular al eje longitudinal del elemento y tiende a combar el elemento. Cuando en un elemento se inducen esfuerzos de flexión, éste experimenta dos tipos de esfuerzos normales; compresión, entre el eje neutro y la fibra superior del elemento y tracción, entre el eje neutro y la fibra inferior del elemento, si la curva que dibuja es cóncava.

En el concreto presforzado se presenta la llamada contraflecha producida por el presfuerzo inducido en el concreto lo que provoca que el elemento deformado dibuje una curva convexa, experimentando esfuerzos de compresión entre el eje neutro y la fibra inferior y esfuerzos de tracción entre las fibras del eje neutro y fibra superior.

El comportamiento de las vigas presforzadas bajo esfuerzos de flexión en el rango elástico se da de la siguiente manera: Al aumentar la carga gradualmente hasta más o menos el nivel de las cargas de servicio, el momento aumenta debido a un cambio en el brazo del par interno, permaneciendo casi constante las fuerzas internas lo contrario sucede con el concreto reforzado, que el incremento de momento debido al aumento de carga va acompañado de un aumento de las fuerzas internas, permaneciendo constante el brazo del par interno.

Algo importante de tomar en cuenta, es que se debe proveer de refuerzo ya sea presforzado o no a las zonas del elemento donde se considera que se experimenten esfuerzos de tracción. Esto último es porque de acuerdo con el ACI se pueden encontrar los esfuerzos de flexión usando los métodos elásticos lineales, aun cuando la tensión nominal sea ligeramente mayor que el probable valor del módulo de ruptura. Esto sirve para controlar tanto las grietas como la deflexión y permite al miembro responder como si no tuviera grietas.

Una característica similar entre el concreto presforzado y el concreto reforzado es que ambas alcanzan su capacidad a flexión cuando el acero se esfuerza hasta su resistencia última o cuando se alcanza la capacidad de deformación del concreto. Se dice que mientras se siga incrementando la carga en una viga de concreto presforzado su comportamiento se asemeja al de una viga de concreto reforzado, aunque esto es cierto, existen ciertas diferencias, como las mostradas en la tabla I.

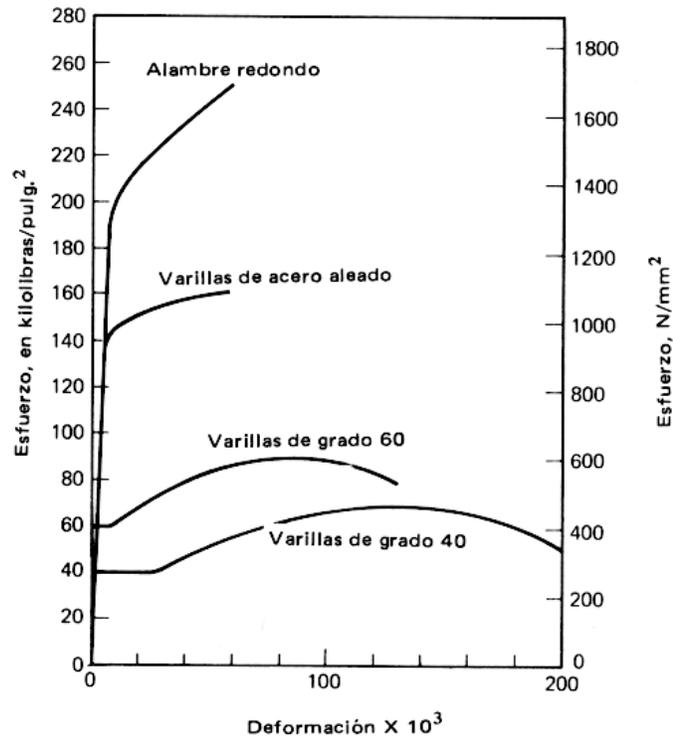
Tabla I. **Razones que diferencian el comportamiento del concreto presforzado del concreto reforzado, cuando están ambas cerca de la carga última**

<b>Concreto presforzado</b>	<b>Concreto reforzado</b>
Sin carga, las deformaciones en el acero de presfuerzo no son cero, sino que corresponden al presfuerzo después de las pérdidas y cualquier deformación se suma a éstas.	Sin carga, las deformaciones en el acero de refuerzo son nulas.
Los aceros de presfuerzo no presentan una meseta marcada de fluencia.	Los aceros de refuerzo presentan una meseta de fluencia bien definida.
La diferencia entre la resistencia nominal de fluencia y la resistencia última es menor, en comparación al acero de presfuerzo.	La diferencia entre la resistencia nominal a la fluencia y la resistencia última es mayor, en comparación al acero de presfuerzo.
La deformación a la ruptura es menor.	La deformación a la ruptura es mayor en comparación al acero de presfuerzo.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 18 se pueden observar las diferencias entre ambos aceros de refuerzo y aceros de presfuerzo bajo esfuerzos de tracción.

Figura 18. **Comparación entre de curvas esfuerzo-deformación del acero de presfuerzo y acero de refuerzo**

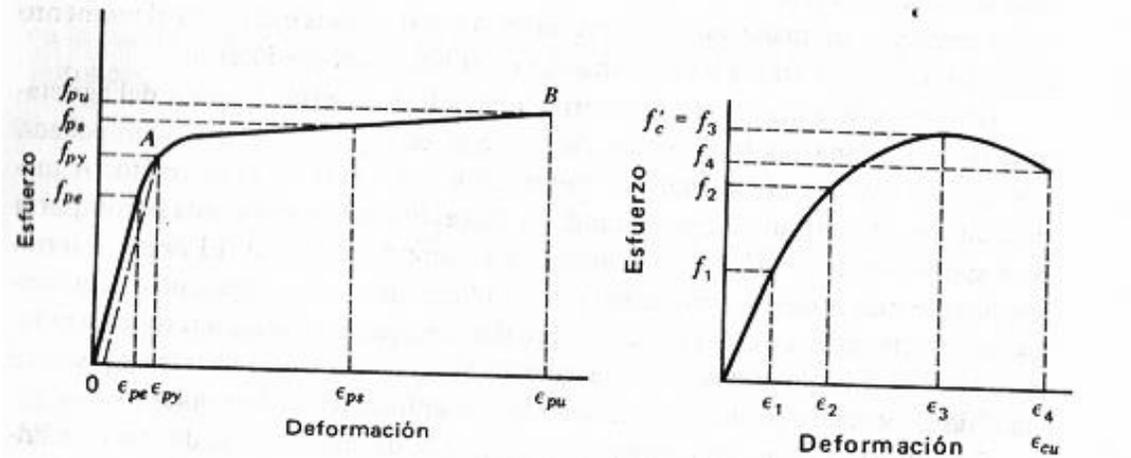


Fuente: NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto presfuerzoado*. p. 59.

En la figura 19 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación del acero de presfuerzo y el concreto que ayudarán en el entendimiento del comportamiento de ambos materiales bajo esfuerzos de flexión.

La deformación con la carga última en el concreto se ha medido que se encuentra entre 0,003 y 0,004 en vigas de prueba, el ACI opta el uso del valor 0,003.

Figura 19. **Curvas representativas de esfuerzo-deformación del acero de presfuerzo y el concreto**



Fuente: NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto presforzado*. p. 100.

### 4.2.3. Resistencia a esfuerzos de corte

Un elemento experimenta esfuerzos cortantes cuando se aplican fuerzas que actúan en dirección tangencial a la sección transversal de este.

Principalmente se espera que el elemento ya sea una losa o viga presforzadas fallen por flexión, esta falla es predecible ya que previamente ocurrirá agrietamiento en el miembro y grandes deflexiones, contrario a lo que sucede con una falla por cortante o falla por tensión diagonal, esta se da de forma súbita y viene seguida de la falla por flexión. Es por esto último que se dota al miembro de refuerzo a cortante con el objetivo que resista esfuerzos de corte y brindarle seguridad a la estructura a través de sus miembros.

Además de los esfuerzos cortantes debidos a los esfuerzos de flexión también pueden aparecer esfuerzos cortantes por torsión, que también producen

tensión diagonal en el concreto, aquellos elementos en los que la torsión sea un tema importante se le tendrá que dotar refuerzo por cortante. Generalmente los cortantes producidos por la flexión o torsión están por debajo de la capacidad a cortante directo del concreto.

#### **4.2.4. Deflexiones**

El tema de las deflexiones es importante debido a que uno de los objetivos de los miembros presforzados es que se utilizan para cubrir luces mucho mayores a las que se podrían cubrir con miembros de concreto reforzado. Esto se da por el uso de materiales más resistentes, lo que los hace más rígidos, y métodos de diseño y construcción más refinados. Se consiguen miembros más ligeros por lo que la relación de carga muerta y carga viva es menor.

Las deflexiones están controladas en los miembros presforzados, haciendo un balance de las deflexiones ocasionadas por momentos de las cargas aplicadas y los momentos por el presfuerzo que son en sentido contrario, la deflexión neta es menor y casi podría anularse por completo. Predecir con exactitud estas deflexiones se complica debido a las pérdidas de presfuerzo debidas al flujo plástico del concreto, que provoca que se incrementen las deformaciones en el concreto debido a las cargas sostenidas con el transcurso del tiempo.

Ya que se conoce que el flujo plástico en el concreto aumenta las deformaciones por una carga sostenida durante el tiempo, se tiene que las deflexiones debidas al presfuerzo (contraflecha) aumentarán y éste aumento se verá contrarrestado con una disminución de la contraflecha debido a las pérdidas diferidas por la contracción, escurrimiento plástico y el relajamiento que provocan una pérdida de presfuerzo y sumado a esto la deflexión que provocará la carga

de servicio. Con esto se puede deducir que estéticamente la contraflecha no será un problema en los casos específicos de los miembros utilizados para losas de entrepiso.

#### **4.2.5. Contra flecha**

En el método de pretensado, después de que el concreto haya alcanzado su resistencia optima que permita el cortado del acero de presfuerzo, el elemento sufrirá una deformación debido al momento de flexión asociado con la excentricidad del presfuerzo. Generalmente un elemento sufre una comba o contraflecha hacia arriba si el acero de presfuerzo queda por debajo del centroide del elemento, situación contraria sucedería si el acero de presfuerzo quedara sobre el centroide del elemento, la comba sería hacia abajo.

El objetivo de utilizar concreto presforzado es reducir las grietas en el concreto en la zona de tracción provocadas por las cargas gravitacionales y esto se consigue ubicando el acero de presfuerzo como en la primera opción, por debajo del centroide del elemento. Cuando el elemento está en el estado de cargas de servicio e incluso a partir de su peso propio, la deflexión que causan estas cargas contrarresta la contraflecha debida al presfuerzo.

Esta comba hacia arriba puede incrementarse con el tiempo debido al flujo plástico del concreto.

#### **4.3. Características físicas**

Se refiere a las cualidades que están relacionadas a los aspectos de la constitución y naturaleza corpórea de los materiales.

#### **4.3.1. Porcentaje de absorción**

El porcentaje de absorción es un indicativo de la calidad del material, en este caso, del concreto.



## **5. NORMAS APLICADAS**

Con base en las normas creadas, editadas y publicadas por la Comisión Guatemalteca de Normas, COGUANOR (por sus siglas), se realizaron, a ambas losas, los respectivos ensayos. Hay que mencionar que, además de las personas mencionadas como participantes en el estudio de estas normas, integrantes del Comité Técnico de Normalización del Concreto, CTN Concreto, tuvo una importante colaboración el ing. Mario Corzo, quien con su ingenio y entusiasmo fue posible crear un método de ensayo que permitiera obtener datos acerca del comportamiento de sistemas de losas a una escala real.

A continuación, se da un resumen de dichas normas, tanto del método de ensayo como de las especificaciones que deben cumplir los sistemas después de someterse a ensayos de carga.

### **5.1. NTG 41084 h1 Método de ensayo vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto**

El objetivo de esta norma es describir el procedimiento para la evaluación y verificación de las especificaciones que deben cumplir la vigueta de concreto armado o presforzado y la bovedilla de concreto de acuerdo con la norma NTG 41084, para la construcción de losas de concreto prefabricadas.

La norma en su inciso 4 establece que la muestra debe escogerse aleatoriamente y debe estar en condiciones similares a las indicadas por el fabricante, si después de realizados los ensayos, la muestra no cumple con los requisitos de la norma NTG 41084 se podrá tomar otros especímenes, si en esta

ocasión vuelven a no cumplir, se rechaza el lote completo. En el cuadro 1 y 2 del documento de la norma se establecen las cantidades que se deben ensayar de acuerdo con el número de unidades que forman un lote (en las bovedillas). (Ver tablas en anexos).

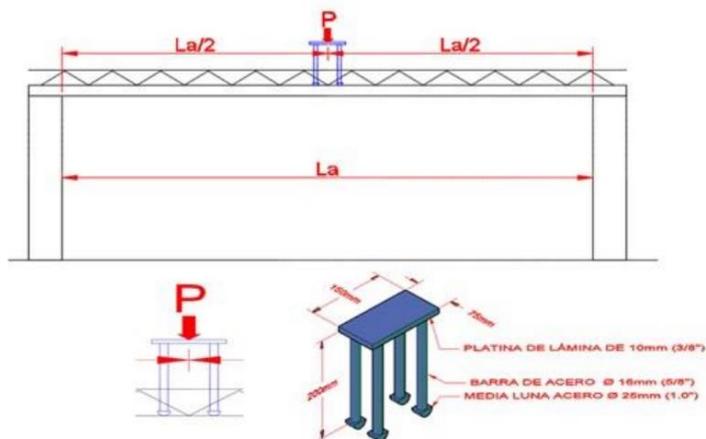
### **5.1.1. Vigüeta de concreto armado o presforzado**

Para verificar el cumplimiento de las especificaciones en la norma NTG 41084 la vigüeta a ensayarse debe cumplir con los siguientes requisitos:

- La edad de la vigüeta debe ser de 28 días mínimo.
- En cuanto a la longitud debe ser igual a la longitud de autoportancia y el momento resistente de la sección a probarse, los cuales los provee el fabricante.
- En cuanto al equipo y herramienta se necesitarán:
  - Flexómetro
  - Báscula con capacidad mínima de 100 kg para pesar el material de carga aplicada con una tolerancia de  $\pm 0,5$  kg.
  - Lupa de 5 aumentos para observar fisuras y deformaciones.
- Apoyar la vigüeta que se va a ensayar en sus extremos conforme a la longitud de autoportancia
- En relación con los apoyos:
  - Deben ser rígidos de forma que no permitan desplazamientos verticales en los mismos.
  - La vigüeta debe quedar simplemente apoyada, permitiendo giros en los extremos y evitando cualquier condición de empotramiento.

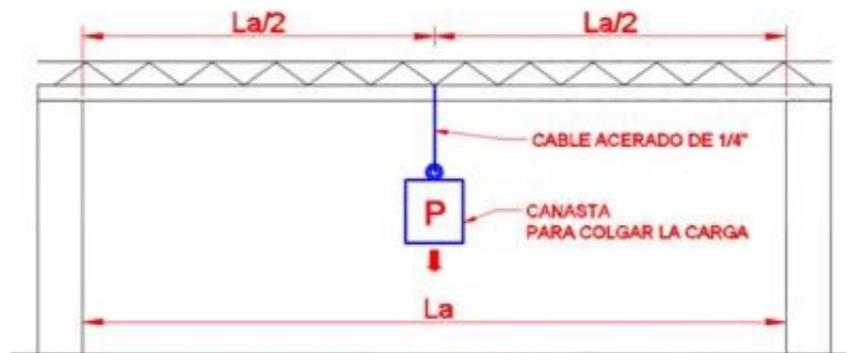
- Ambos apoyos deben encontrarse a la misma altura y esta debe ser de por lo menos 60 cm para poder colocar los instrumentos de medición.
- Instalar el micrómetro al centro de la luz por la cara inferior de la vigueta.
- El procedimiento para la aplicación de la carga de ensayo se puede realizar de dos maneras
  - La primera opción es aplicar la carga por medio de un dispositivo de acero (ver figura 20) y la otra opción es por medio de una canasta de forma que la carga quede colgada en el centro del claro por la parte inferior (ver figura 21).

Figura 20. **Primera opción: Aplicación de la carga con dispositivo de acero**



Fuente: COGUANOR. *NTG 41084 h1 Método de ensayo vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto.* p. 9.

Figura 21. **Segunda opción: Aplicación de la carga por medio de dispositivo colgante**



Fuente: COGUANOR. *NTG 41084 h1 Método de ensayo vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto.* p. 10.

La carga puntual máxima que se le aplicará debe calcular con la siguiente expresión:

$$P = \frac{E(W_m + W_{vm})L_a}{2}$$

Los valores de  $E$ ,  $W_m$  y  $L_a$  deben ser proporcionados por el solicitante del ensayo.

- La carga se debe aplicar de forma monótona y creciente, al menos cada múltiplo de  $P/10$  hasta aplicar la totalidad de  $P$ .
- Se anotan las lecturas de carga y deformación en cada aumento de carga hasta que el micrómetro esté estable.

Al finalizar los ensayos se verifica la resistencia de la vigueta, con ese objetivo se compara la carga  $P$  del ensayo con la carga  $P_{res}$  usando el momento resistente de la sección de la vigueta proporcionada por el fabricante, calculada como sigue:

$$P_{res} = \frac{4M_{res}}{L}$$

El  $M_{res}$  se obtienen con la siguiente ecuación:

$$M_{res} = \frac{(W_{vm} + W_m)L_a}{12}$$

En la comparación se debe cumplir la siguiente inecuación:

$$P_{res} > P$$

Además, se debe verificar que después de aplicada la carga no presente ningún tipo de agrietamiento provocado por la flexión o cortante y no debe presentar pandeo en los elementos superiores de la armadura de refuerzo, en caso fuera una vigueta tipo joist.

Deben corroborarse las medidas de la vigueta que cumplan con los numerales 4.2.4 al 4.2.9 de la norma de especificaciones NTG 41084.

### **5.1.2. Bovedilla de concreto**

En el cuadro 1 de la norma NTG 41084 h1, se indica la cantidad de bovedillas para ensayar a flexión de acuerdo con la cantidad de unidades de un lote y en el cuadro 3 de la misma norma se da la resistencia mínima de la

bovedilla en kilogramos, tanto el promedio de tres bovedillas ensayadas como el valor mínimo por bovedilla individual. (Ver cuadro en anexos)

Para realizar el ensayo se necesitará un flexómetro, báscula con capacidad mínima de 10 kg para pesar el material de carga aplicada con una tolerancia de  $\pm 0,5$  kg, lupa de cinco aumentos para observar fisuras y deformaciones y por último una platina de acero de 10 cm de ancho por 10 cm de largo con un espesor de 0,6 cm ( $\frac{1}{4}$  pulgada).

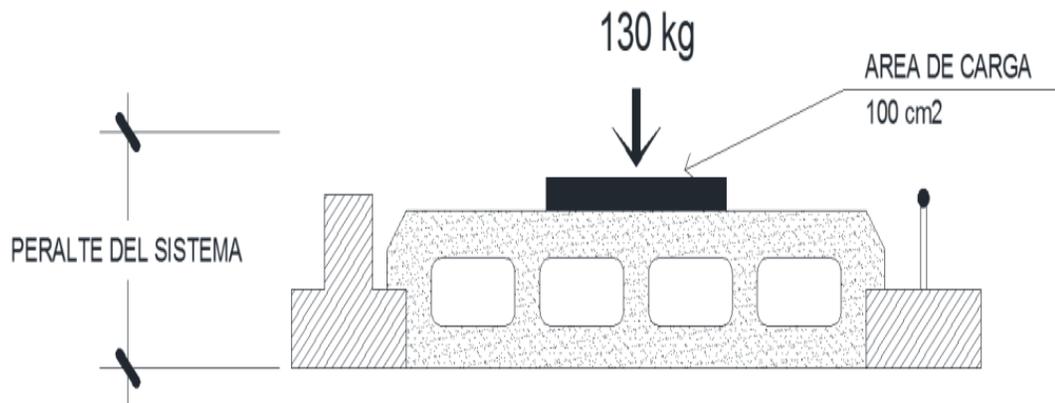
Se debe preparar la muestra saturándola por inmersión durante 2 horas antes del ensayo. Las bovedillas se deben colocar de manera que simulen su colocación en obra.

El procedimiento es el siguiente:

- Aplicar la carga gradual en un área de 100 cm<sup>2</sup> (ver figura 22) al centro de la bovedilla hasta llevarla a la falla. Se da por aceptada la bovedilla si la carga aplicada cumple con lo indicado en el cuadro 3.
- Para determinar las dimensiones se medirá el ancho, alto y largo utilizando una regla con graduación en mm y calibrador (vernier) graduado cada 0,25 mm.
- El ancho se medirá en la mitad del largo de la bovedilla, entre las dos caras principales de la bovedilla tanto en la cara superior como inferior.
- El alto se medirá al centro del largo entre la cara inferior y superior de la bovedilla sobre ambas caras principales de la bovedilla.

- La longitud de medirá a la mitad de la altura sobre cada cara principal de la bovedilla.

Figura 22. **Esquema de aplicación de carga en la bovedilla**



Fuente: COGUANOR. *NTG 41084 h1 Método de ensayo vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto.* p. 13.

El lote se rechaza si en la segunda prueba tampoco cumplen con los requisitos especificados.

### 5.1.3. Sistema de losa prefabricada

A continuación, se presenta requisitos para realizar las pruebas de carga a los sistemas de losas prefabricadas, desde ensayos al concreto fundido in situ, el equipo necesario y las características con las que deben cumplir para realizar la prueba de carga, la carga de prueba, hasta la forma en que se debe aplicar esta para obtener los efectos más críticos.

### **5.1.3.1. Para la capa de compresión fundida en obra**

Se deberá seguir el procedimiento y cumplir con las especificaciones en cada una de las siguientes normas, para el muestreo, fabricación y curado y determinación de la resistencia, relacionado al topping o capa de compresión.

- NTG 41057 “Práctica estándar para el muestreo del concreto recién mezclado”.
- NTG 41061 “Práctica estándar para la fabricación y curado en campo de especímenes de concreto para su ensayo”.
- NTG 41017 h1 “Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto”.  
La resistencia del concreto de la capa de compresión deberá ser igual o mayor a la especificada por el fabricante.
- El acero de bastones y electromalla deben cumplir con los requisitos en la norma NTG 41084.

### **5.1.3.2. Equipo, requerimiento en los apoyos y dimensiones mínimas del sistema de losa**

Para realizar el ensayo se necesitarán flexómetro de 5 m, hilo de plástico, micrómetro mecánico con precisión de 0,025 m, báscula con capacidad mínima de 100 kg y lupa de 5 aumentos.

En cuanto a los apoyos del sistema de losa, deberán estar ubicados en sus extremos (de la losa), pueden ser muros o soportes fijados en el piso, deben ser

rígidos y también evitar el volteo o torsiones en el sistema de losa y deben tener la suficiente altura para colocar los dispositivos de medición de las deformaciones. La losa debe quedar simplemente apoyada y evitar cualquier condición de empotramiento.

Para la medición de las deformaciones se podrá hacer con las siguientes opciones:

- Con micrómetro mecánico instalado al centro del claro por la cara inferior del sistema de losa.
- Utilizando hilo de pescar y flexómetro.
- La longitud y ancho del sistema de losa será como sigue:
- Igual a la longitud de la vigueta y cargas más críticas del proyecto a evaluar.
- Una longitud mínima de 20 veces el peralte total del sistema de losa.
- La opción que se escoja debe ser aquella que genere mayor esfuerzo durante el ensayo.
- El ancho mínimo debe ser con la modulación de dos viguetas con sus bovedillas correspondientes.

### **5.1.3.3. Requerimientos generales para el ensayo**

De principio la norma recomienda que la prueba de carga debe realizarse con medidas de seguridad tanto para la vida humana como para la estructura de prueba, mismas que no deben afectar en el procedimiento de carga ni en los resultados.

La prueba deberá realizarse hasta que la porción que se someterá a la carga tenga al menos 28 días de edad, podrá ser menor si las partes involucradas están de acuerdo.

#### **5.1.3.4. Carga de prueba**

- La disposición de esta carga debe ser tal que maximice las deflexiones, efectos de las cargas y esfuerzos en las zonas críticas de los miembros estructurales que se evalúan.
- La carga mínima total, incluyendo la carga muerta, no debe ser menor que el mayor resultado de las siguientes ecuaciones:

$$T_t = 1.2C_m + 1.6C_v$$
$$T_t = 1.2C_m + 1.6(C_v + C_t)$$

Para el caso específico de losas de techo final, se debe optar por la carga resultado de la segunda opción.

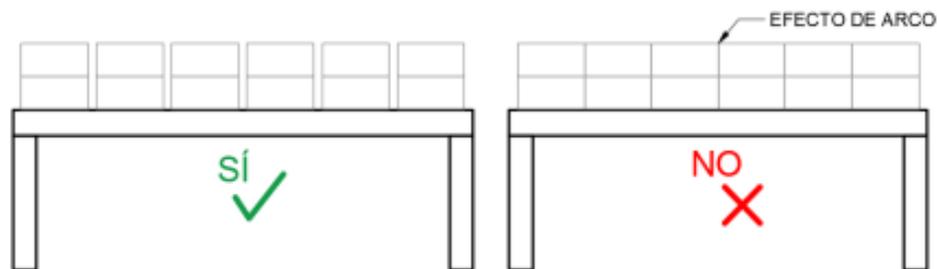
#### **5.1.3.5. Aplicación de la carga de prueba**

- Debe aplicarse  $T_t$  en no menos de cuatro incrementos aproximadamente iguales.
- Se debe inspeccionar el área de la estructura después de cada incremento con el objetivo de determinar si hay evidencia de daño.
- En la aplicación de la carga se debe evitar el efecto arco (ver figura 23), que se refiere a que la carga no se transmite de forma uniforme a los miembros ensayados a flexión y se da cuando los elementos de carga

quedan dispuestos de forma que entran en contacto entre ellos lo que provoca una reducción de la carga sobre la losa cerca del centro del vano.

- La carga  $T_t$ , después de aplicar el último incremento, debe permanecer 24 horas sobre la estructura a menos que aparezcan signos de daño.
- Remover la totalidad de la carga después que se hayan realizado todas las mediciones de respuesta.

Figura 23. **Efecto arco**



Fuente: COGUANOR. *NTG 41084 h1 Método de ensayo vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto.* p. 16.

#### 5.1.3.6. Mediciones de la respuesta

Las mediciones de la respuesta, tales como la deflexión, rotación, deformación unitaria, desplazamiento, ancho de fisura se deben medir en las ubicaciones donde se espere la respuesta máxima y en ciertos instantes como:

- Antes de iniciar a aplicar la carga como máximo una hora antes de aplicar el primer incremento de carga.
- Después de cada incremento de carga.

- Después de 24 horas que la carga  $T_t$  haya permanecido sobre la losa.
- Y finalmente anotar las mediciones de respuesta después de 24 horas de removida la carga  $T_t$ .

#### 5.1.3.7. Criterio de aceptación

- La porción de la losa ensayada no debe mostrar descascaramiento, aplastamiento en el concreto o evidencia de falla tales como fisuración, o deflexiones, de tal magnitud y extensión que resulten evidentemente excesivos e incompatibles con los requisitos de seguridad de la losa. Si se producen daños suficientes como para considerar que los elementos de la losa han fallado, no se vuelve a ensayar, no se debe poner en servicio aún con cargas menores.
- El ancho y extensión de longitud de fisuras puede ser un buen indicativo del estado de la losa, por ello se recomienda establecer criterios relativos a los tipos de fisuras previstos, en dónde se medirán, cómo se medirán y establecer límites para evaluar nuevas fisuras o límites para los cambios en el ancho de las fisuras existentes, todo esto antes de dar inicio con la aplicación de la carga.
- La deflexión máxima, medida 24 horas después de la aplicación de la carga  $T_t$  debe cumplir con:

$$\Delta 1 \leq \frac{L_t}{360}$$

- La deflexión residual, medida 24 horas después de la remoción de la carga  $T_t$  debe cumplir con:

$$\Delta r \leq \frac{\Delta 1}{4}$$

- En caso de que la losa no presentara indicios de falla, se usará la deflexión residual como criterio de aceptación.
- En el caso de estructuras muy rígidas, se omite las mediciones de deflexión residual si la deflexión máxima es menor que  $L_t/360$ .
- Se podrá repetir la prueba de carga en caso de en el primer intento no se cumplan con las disposiciones de aplicación de la carga (inciso 5.3.2.15 de la norma), después de haber transcurrido 24 h de la remoción de la carga de la primera carga de prueba. El ensayo se considera aceptables si cumple con:

$$\Delta r \leq \frac{\Delta 2}{5}$$

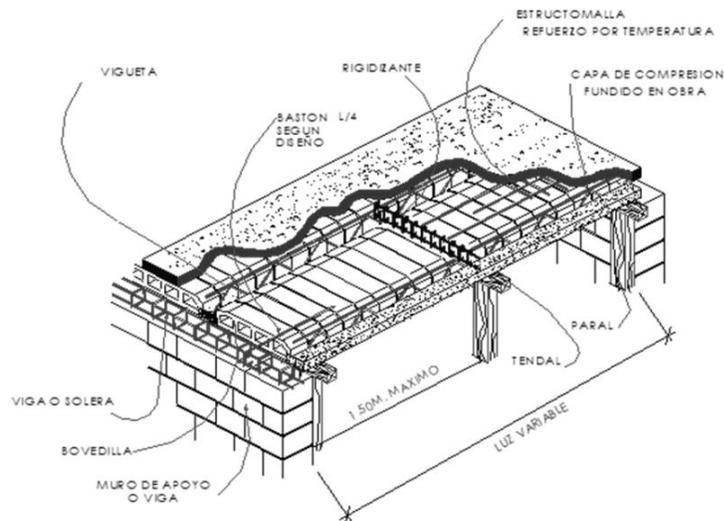
La muestra se considera aceptable si cumple con lo especificado en el numeral 4.4 de la norma NTG 41084.

## **5.2. NTG 41084 Vigüeta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto. Especificaciones**

El objetivo de esta norma es establecer los requisitos y especificaciones mínimas que deben cumplir la vigüeta de concreto armado o presforzado y la bovedilla de concreto para la construcción de losas de concreto prefabricadas.

En la figura 24 se muestra un esquema del sistema de losa prefabricada, en él se muestran cada uno de los elementos que lo conforman.

Figura 24. **Sistema de losa prefabricada**



Fuente: COGUANOR. *NTG 41084 Vigüeta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto. Especificaciones.* p. 9.

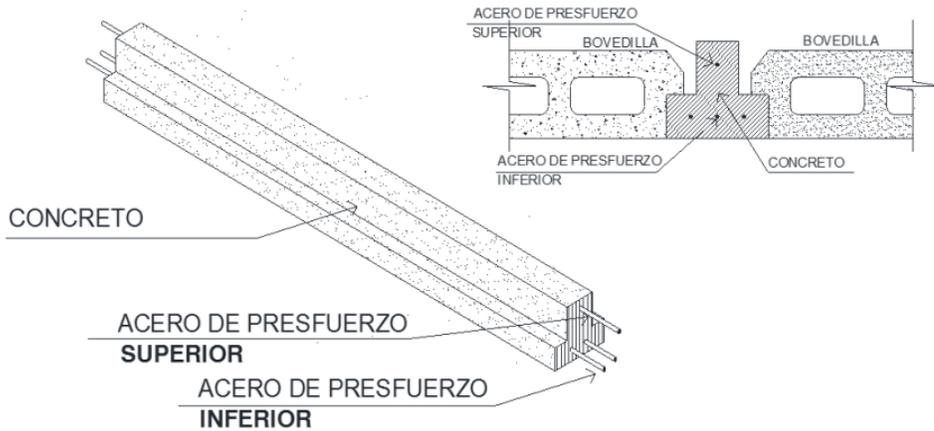
La norma NTG 41084, da especificaciones para viguetas de concreto reforzado de alma abierta, viguetas de concreto presforzado tanto de alma abierta como de alma llena; en este trabajo se referirá únicamente a las especificaciones para viguetas de concreto pretensado de alma llena, que es el interés del estudio. Para los otros tipos de viguetas ver la Norma.

### 5.2.1. Especificaciones y detalle de vigüeta de concreto pretensada de alma llena

- En la figura 25, se muestra el detalle con las especificaciones que debe cumplir una vigüeta de alma llena.

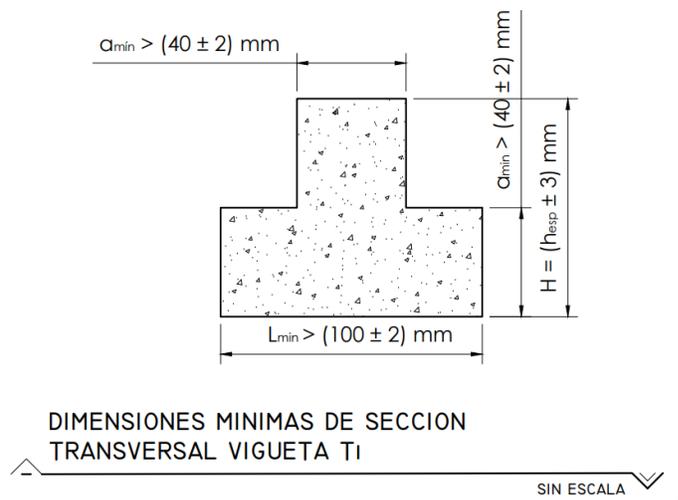
- La resistencia de diseño mínima del concreto debe ser igual o superior a  $280 \text{ kg/cm}^2$  ( $4\ 000 \text{ lb/plg}^2$ ).
- Deben ensayarse a los 28 días de haberse fabricado de acuerdo con la norma NTG 41084 h1, como se indica en el inciso 5.1 de este trabajo.
- En la figura 26 se presentan las dimensiones mínimas de la sección de la vigueta, con sus tolerancias permitidas.
- La tolerancia en la medida de la longitud especificada de la pastilla de la vigueta debe ser de  $\pm 20 \text{ mm}$ .
- A continuación, se indican los valores de recubrimiento y separaciones del acero para viguetas de alma llena. (Ver figura 27)
  - El recubrimiento vertical como horizontal ( $d_1$ ), del acero, debe ser de por lo menos el tamaño máximo del agregado del concreto.
  - La separación horizontal a rostro entre las varillas de acero ( $d_2$ ) no debe ser menor al tamaño máximo del agregado grueso del concreto más  $5 \text{ mm}$ .
  - La separación vertical a rostro entre las varillas de acero ( $d_3$ ) no debe ser menor al tamaño máximo del agregado grueso del concreto ni menor a  $15 \text{ mm}$ .
  - El recubrimiento libre desde la esquina de la superficie de la vigueta al plano más cercano de la bovedilla (R), no debe ser mayor de  $35 \text{ mm}$ .
  - La superficie superior del patín no debe tener un ángulo ( $\Delta$ ) mayor a  $35$  grados con respecto a la horizontal.

Figura 25. **Detalle de vigueta de concreto pretensado**



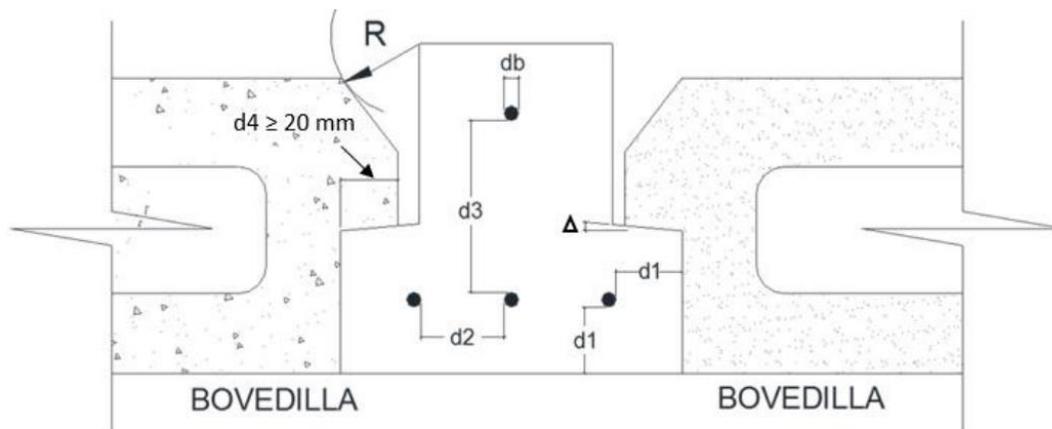
Fuente: COGUANOR. *NTG 41084 Vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto. Especificaciones.* p. 10.

Figura 26. **Dimensiones mínimas de sección de vigueta de alma llena**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

Figura 27. **Recubrimiento y separaciones del acero para viguetas de alma llena**



Fuente: COGUANOR. *NTG 41084 Vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto. Especificaciones.* p. 13.

- La mayor contraflecha permitida en la vigueta pretensada no debe ser mayor a  $L/100$ , medido al momento de la recepción en la obra. Se debe tomar en cuenta que la contraflecha puede incrementarse en función del tiempo que esté sin instalarse en el sistema de losa.

### 5.2.2. Requisitos para bovedillas de concreto

- La bovedilla debe soportar una carga puntual individual mínima de 110 kg sobre un área de  $100 \text{ cm}^2$  y la carga promedio mínima de tres bovedillas será de 130 kg.
- De las medidas tomadas de las dimensiones de la bovedilla según el inciso 5.1.1.2, se permite una tolerancia de  $\pm 5$  milímetros con respecto a las medidas especificadas por el fabricante.

### 5.2.3. Requisitos para el sistema de losa prefabricada

Para que el sistema de losa pueda ser ensayado, deberá cumplir con ciertos requisitos con el objetivo de obtener una respuesta aceptable.

#### 5.2.3.1. Capa de compresión

- Al momento de someterse a cargas de servicio, la capa de compresión del sistema de losa debe tener una resistencia mínima de 210 kg/cm<sup>2</sup> (3 000 lb/plg<sup>2</sup>).
- El espesor mínimo de la capa de compresión que se funde en obra debe tener un espesor mínimo de 50 mm medido al centro de la luz.
- En la figura 28 se muestra un cuadro en el que se indica el refuerzo mínimo por temperatura para el topping de losa prefabricada.

Figura 28. Refuerzo por temperatura, mínimo, para topping de losa prefabricada de 5 cm de espesor

TIPO DE REFUERZO	$f_y$		$A_{s_{min}}$			
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(psi)	cm <sup>2</sup>		pulg <sup>2</sup>	
Varillas Corrugadas	< 4,200	< 60,000	$0.0020A_g$	1.00	$0.0020A_g$	0.16
Electromalla	5000	70000	$0.001512A_g$	0.76	$0.001543A_g$	0.12
Varillas Corrugadas o Electromallas	$\geq 4,200$	$\geq 60,000$	$\frac{0.0018 \times 4,200}{f_y} A_g$	0.90	$\frac{0.0018 \times 60,000}{f_y} A_g$	0.14

Fuente: COGUANOR. NTG 41084 *Vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto. Especificaciones.* p. 14.

### **5.2.3.2. Viguetas**

- El espaciamiento máximo entre viguetas debe ser de 750 mm a ejes.
- La longitud de apoyo de la pastilla de concreto en los extremos de la vigueta debe ser:
  - Mínimo 20 mm de cada extremo de la vigueta si se colocan bastones.
  - Máximo 50 mm de cada extremo de la vigueta si no se colocan bastones.

### **5.2.3.3. Rigidizante**

- Deberán colocarse en forma perpendicular al sentido de la vigueta y a la distancia y configuración especificada por el fabricante.
- El ancho mínimo será de 100 mm.
- El acero de refuerzo deberá tener un recubrimiento mínimo de 20 mm.

### **5.2.3.4. Bastones**

- Deberán colocarse de acuerdo con el diseño del fabricante.
- Su longitud no deberá ser menor a  $L/4$ .

### **5.2.3.5. Refuerzo por temperatura**

- Deberá quedar colocado al centro de la capa de compresión que se funde en obra.
- El espaciamiento entre refuerzo por temperatura no deberá ser mayor a:
  - 450 mm cuando se utilicen varillas de refuerzo

- 250 mm cuando se utilice electromalla.
- El acero de refuerzo mínimo por temperatura para un topping de 5 cm deberá cumplir con el cuadro de la figura 28.
- El empalme de la electromalla debe tener como mínimo 150 mm.

#### **5.2.3.6. Deformación y carga máxima**

- Deberá ensayarse a los 28 días después de haberse fundido la capa de compresión.
- Deberá soportar la carga total de diseño.
- La deflexión final, después de la aplicación de la carga P, no debe exceder:
  - $L_a/300$  para entrepisos
  - $L_a/240$  para techos finales
 Deflexión que deberá medirse de la horizontal hacia abajo.

#### **5.2.4. Criterios de aceptación en obra**

La norma también indica criterios de aceptación que se deberán cumplir los elementos que conforman la losa antes de su recepción en obra.

##### **5.2.4.1. Vigüeta**

- No es motivo de rechazo, si las fisuras que presenten las vigüetas no superan el ancho especificado en el siguiente cuadro de figura 29, según el ACI 224 R Control de fisuración en estructuras de hormigón.

Figura 29. **Guía para anchos de fisura razonables, para concreto armado bajo cargas de servicio, según ACI 224 R Control de fisuración en estructuras de hormigón**

Condiciones de exposición	Ancho de fisura	
	Pulg.	mm
Aire seco o membrana protectora	0.016	0.41
Humedad, aire húmedo, suelo	0.012	0.30
Productos químicos descongelantes	0.007	0.18
Agua de mar y rocío de agua de mar, humedecimiento y secado	0.006	0.15
Estructuras de retención de agua <sup>2</sup>	0.004	0.10

Fuente: COGUANOR. *NTG 41084 Vigüeta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto. Especificaciones.* p. 16.

- Se deberá analizar la posición de la fisura para tomar las decisiones entre comprador y fabricante.
- No debe presentar grietas, desportillamientos o desprendimiento de concreto de tal forma que el acero de refuerzo quede expuesto. Si el acero de refuerzo no queda expuesto en la vigüeta, no deberá ser motivo de rechazo.

#### **5.2.4.2. Acero de refuerzo**

El acero de refuerzo para el sistema de losa como la electromalla o acero de refuerzo de la vigüeta que han estado a la intemperie pueden presentar una delgada capa de óxido de color marrón o café, la cual no es dañina y no es motivo de rechazo, siempre y cuando no exista una disminución excesiva en su

sección transversal. Apoyado con lo que se menciona en el ACI que según investigaciones se ha demostrado que una cantidad normal de óxido aumenta la adherencia.

#### **5.2.4.3. Bovedilla**

- Deberán estar libres de astilladuras, grietas, rajaduras y otros defectos que afecten la capacidad de carga que se generen durante la colocación y la fundición de la losa.
  
- Como consecuencia del almacenamiento, transporte y/o descarga, no deberán ser motivo de rechazo de las bovedillas con los siguientes defectos:
  - Con fisuras no mayores de:
    - 0,5 mm (0,02 plg)
    - 25 % del largo de la bovedilla
  - Astilladuras no mayores de 25,4 mm (1 plg) en cualquiera de las dimensiones.
  
- Los anteriores defectos sí serán motivo de rechazo si están presentes en más del 5 % de las bovedillas que componen la cantidad despachada y deberán evaluarse las condiciones de transporte, estado de las vías de comunicación y la descarga en obra, para su aceptación o rechazo.

## **6. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **6.1. Metodología del ensayo**

A continuación, se describe la metodología para la evaluación de la resistencia a flexión mediante pruebas de carga.

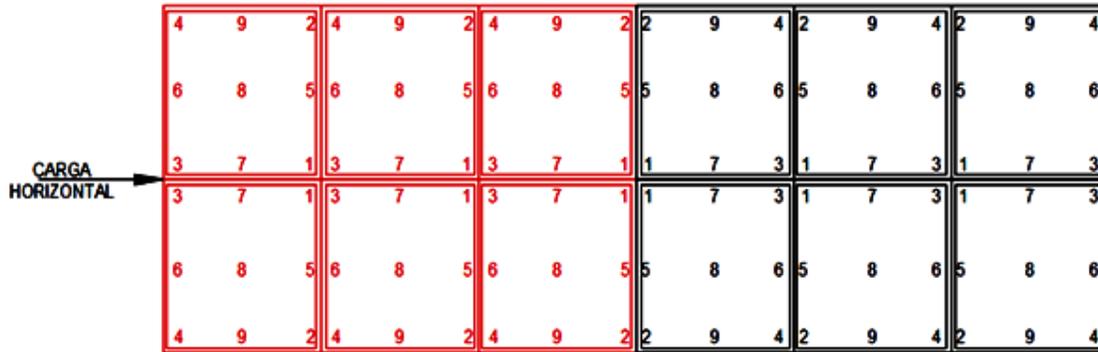
#### **6.1.1. Ensayo de resistencia a la flexión**

Las pruebas de carga realizadas para evaluar la resistencia a flexión de la losa prefabricada con vigueta Ti prefabricada y pretensada, se basaron en la norma NTG 41084 h1 Método de ensayo vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto. En el capítulo 5 se da un resumen del método.

En la norma se menciona que los incrementos de carga deben realizarse en no menos de cuatro incrementos hasta lograr la carga total de diseño. En este caso se realizaron 9 incrementos de carga por medio de cilindros de aproximadamente 12 kg/u. En la figura 30 se muestra el orden de colocación de cilindros, cada número indica un grupo de cilindros colocados al mismo tiempo entre los cuales se registraron las respectivas deflexiones.

Para cumplir con el objetivo general del trabajo de investigación, se sometieron a ensayo dos sistemas de losa con vigueta Ti prefabricada y pretensada, teniendo como variable el tipo de conexión entre las viguetas y el apoyo. Se denominan losa A y losa B, con conexión por entrega y con conexión por solapo o a tope, respectivamente, en la sección 2.3 se da una breve explicación de estas conexiones.

Figura 30. **Ubicación de los cilindros en cada incremento de carga**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

Para cumplir con el objetivo general del trabajo de investigación, se sometieron a ensayo dos sistemas de losa con vigueta Ti prefabricada y pretensada, teniendo como variable el tipo de conexión entre las viguetas y el apoyo. Se denominan losa A y losa B, con conexión por entrega y con conexión por solapo o a tope, respectivamente, en la sección 2.3 se da una breve explicación de estas conexiones.

En ambas losas los deformímetros fueron ubicados en las siguientes posiciones: el deformímetro 2 se ubicó en la mitad de la luz libre y será el que registre las deflexiones críticas del sistema; los deformímetros denominados 1 y 3 se ubicaron en los extremos a 30 cm a partir del rostro interno de los muros, en las figuras 31 y 41 se muestran las ubicaciones de estos.

Los datos obtenidos de carga y deformaciones de los ensayos, para posteriormente llevarlos a un trabajo de gabinete y así obtener los resultados, se darán en el siguiente orden, presentando en primer lugar la losa A y por último la losa B, la denominación de las losas está relacionado al tipo de conexión entre

vigueta y apoyo, siendo con conexión por entrega y conexión por solapo o a tope, respectivamente.

## **6.2. Equipo y materiales**

A continuación, se presenta un listado del equipo y materiales que fueron útiles durante la realización de la prueba de carga.

### **6.2.1. Equipo**

El equipo utilizado para los ensayos de las losas se enlista a continuación, entre paréntesis se coloca la letra de la losa en que se utilizó, de lo contrario se utilizó para ambas losas.

- Planchas de concreto con peso promedio de 38 kg c/u
- Cilindros de concreto con peso promedio de 12.5 kg c/u
- Gato hidráulico ENERPAC RC 256 (losa A)
- Gato hidráulico ENERPAC RC 53 (losa B)
- Bomba hidráulica ENERPAC con capacidad máxima de 5000 psi
- Bomba hidráulica ENERPAC con capacidad máxima de 10 000 psi
- 3 deformímetros mecánicos
- 2 deformímetros de madera
- Platinas cuadradas y rectangulares con espesores de 1, ½ y ¼ de plg.

### **6.2.2. Materiales**

Los materiales utilizados y su respectiva cantidad se encuentran tabulados a continuación. Se describen, en la Tabla II, los materiales para los muros de apoyo, el total para un muro se obtiene de multiplicar la cantidad vista en planta por la cantidad vista en elevación, y esta cantidad por cuatro se obtiene el total

para los 4 apoyos; en la Tabla III, los materiales para ambas losas y por último en la Tabla IV, el material para las formaletas.

Tabla II. **Cantidad de materiales para los apoyos de ambas losas**

	<b>Descripción</b>	<b>Planta</b>	<b>Elevación</b>	<b>Total 1 muro</b>	<b>Total 4 muros</b>
<b>Bloques de mampostería</b>	Dado C14	2	6	12	48
	Construblock	2	5	10	40
	Conector	1	5	5	20
	Lock	1	5	5	20
	Solera 2G	4	1	4	16
<b>Acero de refuerzo</b>	Varilla 3/8" pin	3	2,00 m	1,00 var	4,00 var
	Armadura S-2 solera	1,50 m	1	0,25 var	1,00 var
	Armadura C-1M corona	1,50 m	1	0,25 var	1,00 var
<b>Concreto</b>	Pin	0,03 m <sup>2</sup>	1,40 m	0,05 m <sup>3</sup>	0,19 m <sup>3</sup>
	Solera (cimiento)	1,50 m	0,01 m <sup>2</sup>	0,02 m <sup>3</sup>	0,06 m <sup>3</sup>
	Solera corona	1,50 m	0,02 m <sup>2</sup>	0,03 m <sup>3</sup>	0,13 m <sup>3</sup>
				<b>Volumen total</b>	0,38 m <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla III. **Cantidad de materiales para ambas losas**

	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Losa modelo</b>	Vigueta Ti L = 3,80 m	3
	Bovedilla de 10 cm	38
	Estructomalla 6x6 9/9	1
	Concreto Topping (m <sup>3</sup> )	0,25
<b>Losa modelo</b>	Vigueta Ti L = 3,85 m	3
	Bovedilla de 10 cm	38
	Estructomalla 6x6 9/9	1
	Concreto Topping (m <sup>3</sup> )	0,25

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla IV. **Cantidad de material para formaleta**

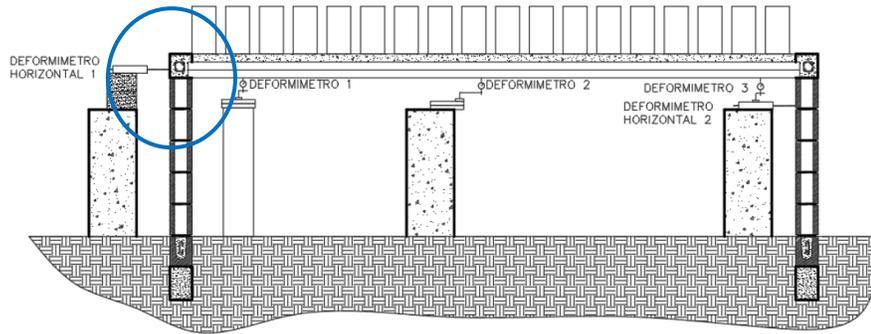
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>
Tablas de 1 plg x 1 plg x 8 pie	4
Clavos de 3 plg (lb)	1
Alambre de amarre (lb)	1

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### **6.3. Losa A: Sistema de losa con conexión por entrega**

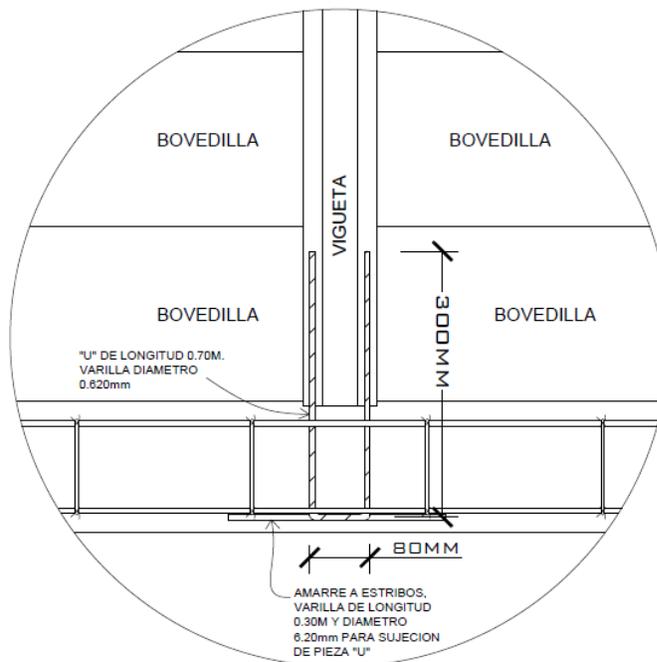
En la sección 2.3 se describe cuando es una conexión por entrega. En figura 31 se muestra el esquema de la prueba de carga. Las dimensiones del sistema de losa son 4,10 m de longitud, 1,32 m de ancho y un espesor promedio de 0,15 m. La luz libre entre apoyos es de 3,8 m. La losa fue fundida sobre muros simulando las condiciones más comunes y reales. Las viguetas quedaron apoyadas sobre los muros una longitud de 1,25 m medidos a partir del rostro interno de los apoyos hacia el rostro externo.

Figura 31. **Ubicación de los deformímetros en la prueba de carga en la losa con conexión por entrega**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

Figura 32. **Detalle de la conexión por entrega**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

### 6.3.1. Datos registrados

Datos de carga y descarga de una cama de cilindros más planchas de concreto, la columna de ubicación de cilindros se refiere a los cilindros colocados en las posiciones mostradas en la figura 30.

Tabla V. **Carga, descarga y deformación de primera cama de cilindros**

	Ubicación cilindros	Carga (kg)	Lectura def. 1 (mm)	Lectura def. 2 (mm)	Lectura def. 3 (mm)
<b>Carga</b>	-	0,00	1,81	6,19	8,60
	Planchas	452,73	2,08	7,38	8,88
	1	157,90	2,15	7,61	8,96
	3	158,00	2,21	7,81	8,99
	2	158,60	2,28	8,09	9,06
	4	157,20	2,34	8,30	9,13
	5	156,60	2,41	8,57	9,22
	6	157,60	2,49	8,79	9,31
	7	155,90	2,56	8,98	9,35
	8	155,80	2,65	9,22	9,37
<b>2 min</b>	-	0,00	2,63	9,22	9,43
<b>24 h</b>	-	1 710,33	2,67	6,88	9,61
<b>Descarga</b>	8	155,80	2,65	6,72	9,27
	7	155,90	2,62	6,47	9,25
	6	157,60	2,57	6,39	9,18
	5	156,60	2,52	6,15	9,13
	4	157,20	2,48	6,15	9,04
	2	158,60	2,42	5,12	8,99
	3	158,00	2,36	5,05	8,94
	1	157,90	2,31	5,02	8,88
<b>2 min</b>	-	0,00	2,31	5,02	8,88

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla VI. **Carga y deformación de dos camas de cilindros de concreto**

	<b>Ubicación cilindros</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>Lectura def. 1(mm)</b>	<b>Lectura def. 2 (mm)</b>	<b>Lectura def. 3(mm)</b>
<b>Primera cama</b>	-	0	1,81	1,49	8,60
	Planchas	452,73	2,31	3,84	8,88
	1	156,40	2,46	5,02	8,93
	2	157,20	2,46	5,16	8,99
	3	157,00	2,46	5,38	9,03
	4	156,30	2,50	5,38	9,07
	5	157,80	2,56	5,55	9,11
	6	158,80	2,60	5,80	9,18
	7	157,20	2,65	5,82	9,23
	8	156,60	2,69	5,93	9,29
	9	156,00	2,74	6,01	9,33
<b>Segunda cama</b>	1	159,20	2,77	8,61	9,44
	2	157,10	2,81	8,72	9,46
	3	158,00	2,86	8,92	9,50
	4	158,70	2,90	9,02	9,53
	5	159,00	2,98	9,31	9,62
	6	156,90	3,01	9,52	9,64
	7	158,10	3,07	9,71	9,70
	8	163,20	3,13	9,87	9,77
	9	155,50	3,16	10,08	9,80
	Tres viguetas	499,50	3,25	10,47	9,94

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 6.3.2. Cálculos efectuados

Para obtener la columna de esfuerzos en la tabla VII, se dividió la carga acumulada entre el área de la losa de 5,02 m<sup>2</sup>

Tabla VII. **Esfuerzos y deformaciones reales debidas a la primera cama de cilindros de concreto**

	Ubicación cilindros	Carga acumulada	Esfuerzo (kg/m <sup>2</sup> )	def. real 1 (mm)	def. real 2 (mm)	def. real 3 (mm)	Promedio 1 y 3 (mm)
<b>Carga</b>	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Planchas	452,73	90,18	0,27	1,19	0,28	0,28
	1	610,63	121,64	0,34	1,42	0,36	0,35
	3	768,63	153,11	0,40	1,62	0,39	0,40
	2	927,23	184,70	0,47	1,90	0,46	0,46
	4	1 084,43	216,02	0,53	2,11	0,53	0,53
	5	1 241,03	247,22	0,60	2,38	0,62	0,61
	6	1 398,63	278,62	0,68	2,60	0,71	0,70
	7	1 554,53	309,67	0,75	2,78	0,75	0,75
	8	1 710,33	340,70	0,84	3,04	0,77	0,80
<b>2 min</b>	-	1 710,33	340,70	0,82	3,04	0,83	0,83
<b>24 h</b>	-	1 710,33	340,70	0,86	5,38	1,01	0,94
<b>Descarga</b>	8	1 554,53	309,67	0,84	5,23	0,67	0,76
	7	1 398,63	278,62	0,80	4,98	0,65	0,73
	6	1 241,03	247,22	0,76	4,90	0,58	0,67
	5	1 084,43	216,02	0,71	4,66	0,53	0,62
	4	927,23	184,71	0,66	4,66	0,44	0,55
	2	768,63	153,11	0,61	3,64	0,39	0,50
	3	610,63	121,64	0,56	3,56	0,34	0,45
	1	452,73	90,18	0,50	3,54	0,28	0,39
<b>2 min</b>	-	452,73	90,18	0,50	3,54	0,28	0,39

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla V.

Tabla VIII. **Esfuerzos y deformaciones reales debidas a dos camas de cilindros de concreto**

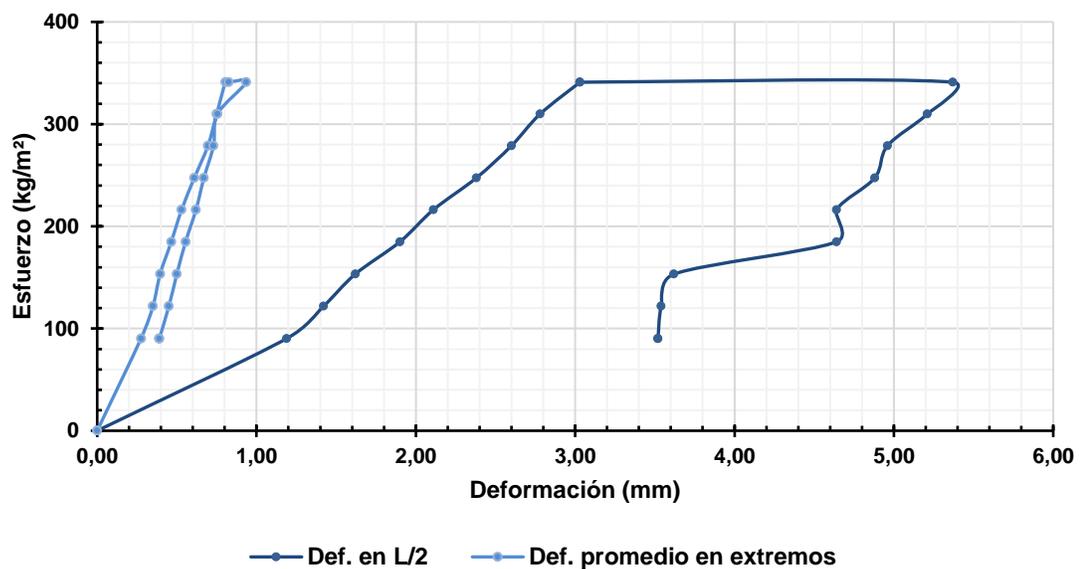
	Ubicación cilindros	carga acumulada (kg)	Esfuerzo (kg/m <sup>2</sup> )	Def. real 1 (mm)	Def, real 2 (mm)	Def, real 3 (mm)	Promedio 1 y 3 (mm)
<b>Primera cama</b>	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Planchas	452,73	90,18	0,50	2,34	0,28	0,39
	1	609,13	121,34	0,66	3,54	0,33	0,49
	2	766,33	152,66	0,66	3,68	0,39	0,52
	3	923,33	183,93	0,66	3,88	0,43	0,54
	4	1 079,63	215,07	0,68	3,89	0,47	0,58
	5	1 237,43	246,50	0,75	4,06	0,51	0,63
	6	1 396,23	278,13	0,79	4,30	0,58	0,68
	7	1 553,43	309,45	0,84	4,32	0,63	0,74
	8	1 710,03	340,64	0,88	4,44	0,69	0,78
<b>Segunda cama</b>	9	1 866,03	371,72	0,93	4,52	0,73	0,83
	1	2 025,23	403,43	0,96	7,12	0,84	0,90
	2	2 182,33	434,73	1,00	7,23	0,86	0,93
	3	2 340,33	466,20	1,05	7,43	0,90	0,97
	4	2 499,03	497,82	1,09	7,53	0,93	1,01
	5	2 658,03	529,49	1,17	7,82	1,02	1,10
	6	2 814,93	560,74	1,20	8,02	1,04	1,12
	7	2 973,03	592,24	1,26	8,22	1,10	1,18
	8	3 136,23	624,75	1,32	8,38	1,17	1,24
	9	3 291,73	655,72	1,35	8,59	1,20	1,28
Tres viguetas	3 791,23	755,23	1,44	8,98	1,34	1,39	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla VI.

### 6.3.3. Resultados

Los datos de las tablas de datos calculados se presentan en gráficas para una mejor comprensión del comportamiento de las respuestas marcadas por la losa durante la prueba de carga.

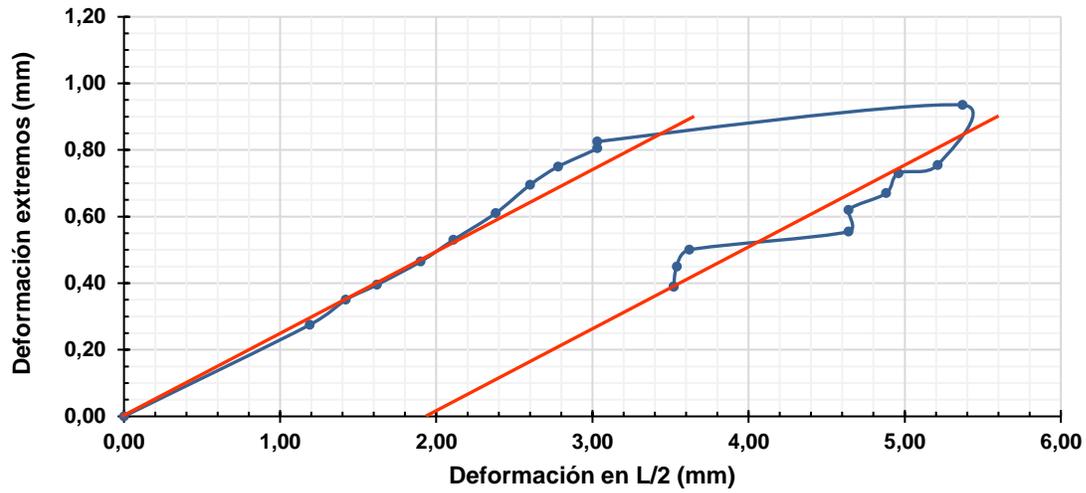
Figura 33. **Esfuerzo y deformación verticales (una cama)**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla VII.

- La capacidad que genera el concreto a tensión debido al presfuerzo está en el orden de 100 kg/m<sup>2</sup>.
- La resiliencia del sistema se encuentra por el orden de 140 kg/m<sup>2</sup>.

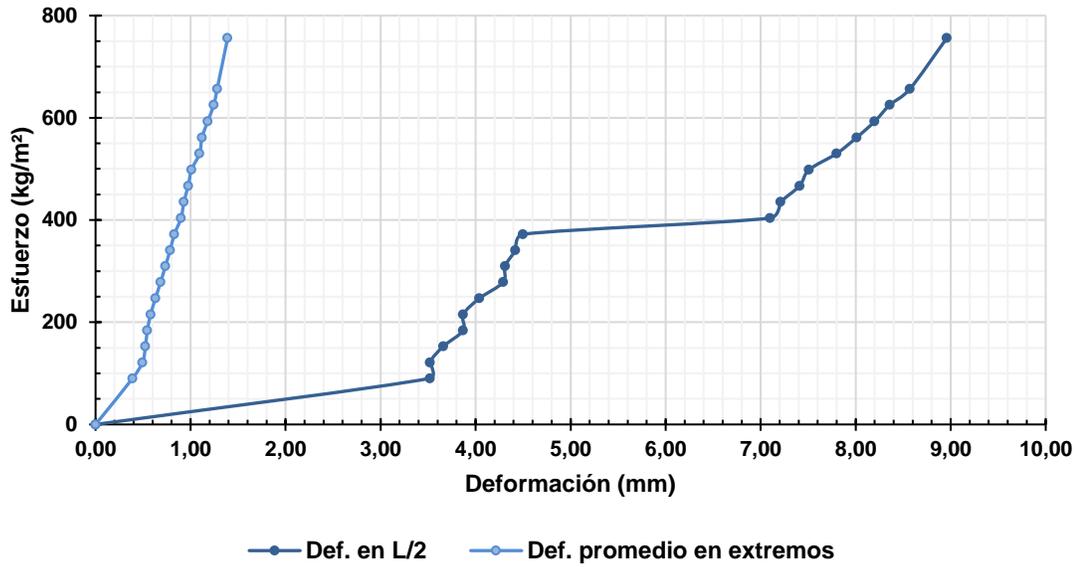
Figura 34. **Correlación de deformaciones a lo largo de la losa**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla VII.

- La buena correlación de las deformaciones demuestra una homogeneidad del sistema y buen comportamiento de recuperación.

Figura 35. **Esfuerzo y deformación verticales (dos camas)**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla VIII.

- El comportamiento de las deformaciones en los extremos es más uniforme en comparación con las deflexiones en el centro de la luz.
- A una carga de  $375 \text{ kg/m}^2$  la losa sufre un acomodo.

#### 6.3.4. Fotografías del ensayo

A continuación, se presentan las fotografías tomadas durante la realización de la prueba de carga, mostrando así cada paso del proceso.

Figura 36. **Marcado y trazado de cuadrícula**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 37. **Cuadrículas de ensayo**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 38. **Ubicación de los deformímetros**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 39. **Primera cama de cilindros**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 40. **Aplicación de segunda cama de cilindros**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 41. **Lectura de respuestas en los deformímetros**

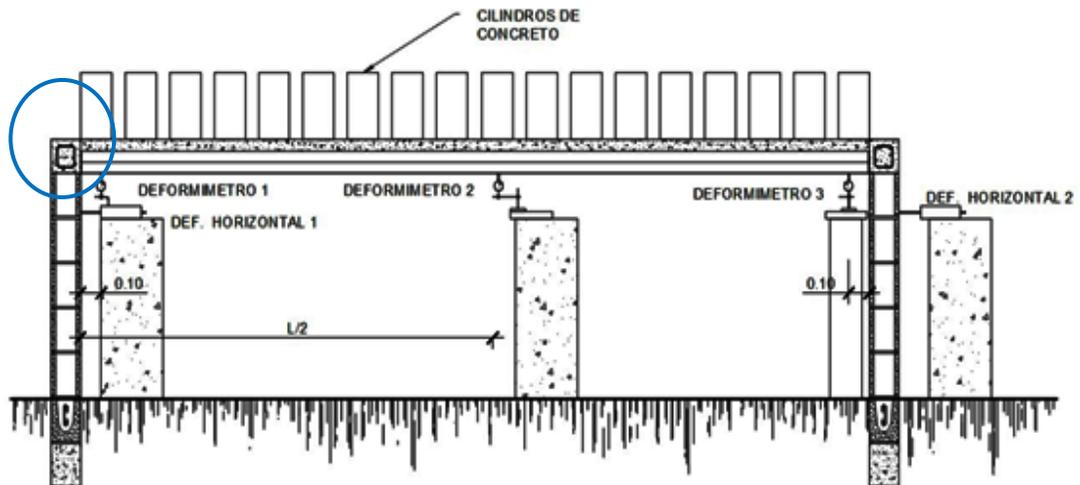


Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

#### 6.4. Losa B: Sistema de losa con conexión por solapo o a tope

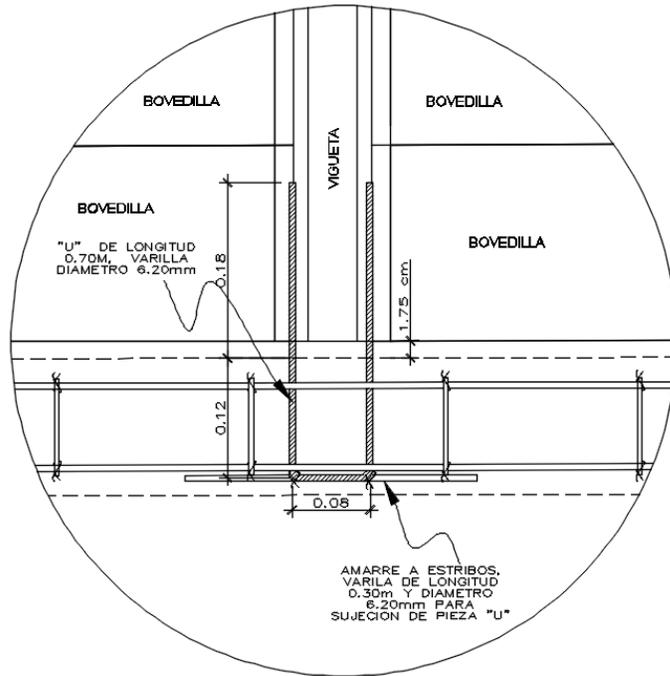
En figura 42 se muestra el esquema de la prueba de carga y en la figura 43 se muestra el detalle de la conexión por solapo. Las dimensiones del sistema de losa son 4,07 m de longitud, 1,32 m de ancho y un espesor promedio de 0,15 m. La luz libre entre apoyos es de 3,81 m. La losa fue fundida sobre muros simulando las condiciones más comunes y reales. Las viguetas se encuentran a 1,75 cm del rostro interno de los muretes portantes.

Figura 42. Ubicación de deformímetros en la losa con conexión por entrega



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

Figura 43. Detalle de la conexión por solapo



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

### 6.4.1. Datos registrados

Datos de carga y descarga de una cama de cilindros más planchas de concreto, la columna de ubicación de cilindros se refiere a los cilindros colocados en las posiciones mostradas en la figura 30.

Tabla IX. **Carga, descarga y deformación de primera cama de cilindros**

	Ubicación cilindros	Carga (kg)	Lectura def. 1 (mm)	Lectura def. 2 (mm)	Lectura def. 3 (mm)
	-	0,00	0,98	1,70	6,14
	Planchas	452,73	1,05	2,02	6,15
<b>2 min</b>	-	452,73	1,06	2,03	6,15
<b>Carga</b>	1	157,90	1,12	2,19	6,20
	2	157,20	1,14	2,32	6,21
	3	158,00	1,18	2,46	6,22
	4	157,80	1,20	2,59	6,25
	5	160,70	1,24	2,76	6,26
<b>2 min</b>	-	-	1,23	2,77	6,26
<b>Descarga</b>	5	160,70	1,23	2,67	6,26
	4	157,80	1,20	2,60	6,25
	3	158,00	1,19	2,50	6,25
	2	157,20	1,15	2,37	6,25
	1	157,90	1,11	2,25	6,25
	Planchas	452,73	0,98	1,92	6,16
<b>2 min</b>	-	0,00	0,98	1,86	6,16

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla X. **Carga, descarga y deformación de dos camas de cilindros de concreto**

	Ubicación cilindros	Carga (kg)	Lectura def. 1 (mm)	Lectura def. 2 (mm)	Lectura def. 3 (mm)
<b>Carga primera cama</b>	-	0,00	0,98	1,86	6,16
	Planchas	452,73	1,03	2,18	6,18
	1	158,20	1,09	2,32	6,20
	2	158,60	1,11	2,46	6,22
	3	161,20	1,14	2,57	6,24
	4	156,60	1,17	2,68	6,25
	5	155,60	1,20	2,83	6,26
	6	156,70	1,20	3,11	6,33
	7	160,90	1,24	3,30	6,35
	8	156,00	1,29	3,46	6,36
<b>Carga 2ª. cama</b>	1	159,60	1,39	3,84	6,40
	7	154,00	1,43	4,03	6,42
<b>2 min</b>	-	-	1,43	4,04	6,42
<b>Vibración</b>	-	-	1,50	4,22	6,45
<b>Descarga</b>	1 y 7	313,60	1,19	4,22	6,43
	9 y 8	312,70	1,10	4,09	6,40
	7 y 6	317,60	1,05	3,76	6,38
	5 y 4	312,20	0,99	3,42	6,33
	3, 2, 1 y planchas	930,73	0,98	2,70	6,27

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 6.4.2. Cálculos efectuados

Para obtener la columna de esfuerzos en la tabla XI, se dividió la carga acumulada entre el área de la losa de 5,03 m<sup>2</sup>

Tabla XI. **Esfuerzo y deformaciones reales debidas a la primera cama de cilindros de concreto**

	Ubicación cilindros	Carga acum. (kg)	Esfuerzo (kg/m <sup>2</sup> )	Def. real 1 (mm)	Def. real 2 (mm)	Def. real 3 (mm)	Promedio 1 y 3 (mm)
	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Planchas	452,73	90,02	0,07	0,32	0,01	0,04
<b>2 min</b>	-	452,73	90,02	0,08	0,34	0,01	0,05
<b>Carga</b>	1	610,63	121,42	0,14	0,50	0,06	0,10
	2	767,83	152,67	0,16	0,62	0,07	0,12
	3	925,83	184,09	0,20	0,76	0,08	0,14
	4	1 083,63	215,47	0,22	0,90	0,11	0,17
	5	1 244,33	247,42	0,26	1,06	0,12	0,19
<b>2 min</b>	-	1 244,33	247,42	0,25	1,08	0,12	0,18
<b>Descarga</b>	5	1 083,63	215,47	0,25	0,98	0,12	0,18
	4	925,83	184,09	0,22	0,90	0,11	0,16
	3	767,83	152,67	0,21	0,80	0,11	0,16
	2	610,63	121,42	0,17	0,68	0,11	0,14
	1	452,73	90,02	0,13	0,56	0,11	0,12
	Planchas	0,00	0,00	0,00	0,22	0,02	0,01
<b>2 min</b>	-	0,00	0,00	0,00	0,16	0,02	0,01

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla IX.

Tabla XII. **Esfuerzo y deformaciones reales debidas a dos camas de cilindros de concreto**

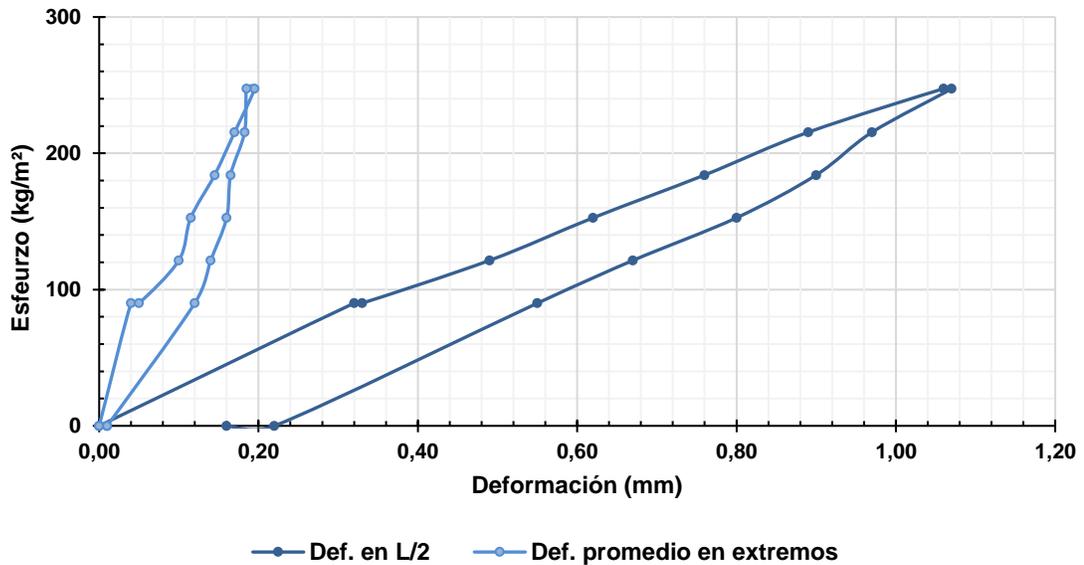
	<b>Ubicación cilindros</b>	<b>Carga acum. (kg)</b>	<b>Esfuerzo (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Def. real 1 (mm)</b>	<b>Def. real 2 (mm)</b>	<b>Def. real 3 (mm)</b>	<b>Promedio 1 y 3 (mm)</b>
<b>Carga primera cama</b>	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Planchas	452,73	90,02	0,05	0,32	0,02	0,04
	1	610,93	121,48	0,11	0,46	0,04	0,08
	2	769,53	153,01	0,13	0,60	0,06	0,10
	3	930,73	185,06	0,16	0,71	0,08	0,12
	4	1 087,33	216,20	0,19	0,82	0,09	0,14
	5	1 242,93	247,14	0,22	0,97	0,10	0,16
	6	1 399,63	278,30	0,22	1,25	0,17	0,20
	7	1 560,53	310,29	0,26	1,44	0,19	0,22
	8	1 716,53	341,31	0,31	1,60	0,19	0,25
<b>Carga 2ª cama</b>	1	2 032,83	404,20	0,41	1,98	0,24	0,32
	7	2 186,83	434,83	0,45	2,17	0,26	0,36
<b>2 min</b>	-	2 186,83	434,83	0,45	2,18	0,26	0,36
<b>Vibración</b>	-	2 186,83	434,83	0,52	2,36	0,29	0,40
<b>Descarga</b>	1 y 7	1 873,23	372,47	0,21	2,36	0,27	0,24
	9 y 8	1 560,53	310,29	0,12	2,23	0,24	0,18
	7 y 6	1 242,93	247,14	0,07	1,90	0,22	0,14
	5 y 4	930,73	185,06	0,01	1,56	0,17	0,09
	3, 2, 1 y planchas	0,00	0,00	0,00	0,84	0,11	0,06

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla X.

### 6.4.3. Resultados

En la figura 44 y 45 se muestra la respuesta de la losa ante las pruebas de carga realizadas.

Figura 44. **Esfuerzo y deformación verticales (una cama)**

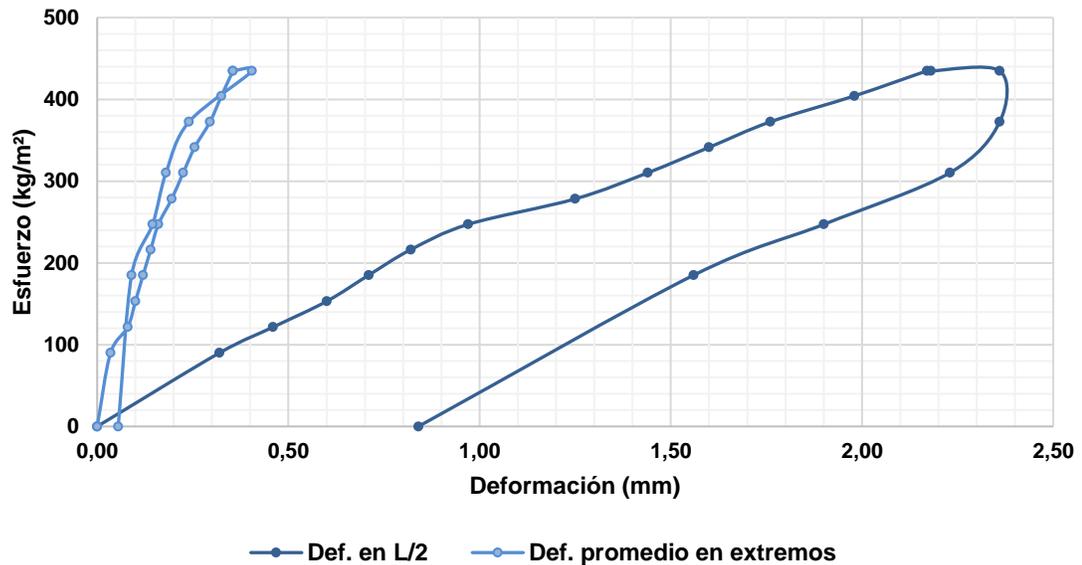


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla XI.

- Se determinó que en la primera fase del ensayo (vigüeta a 10 cm del muro) hay una relación de 6:1 en las deformaciones respecto a la central, es decir que, por cada milímetro de deformación en ese punto, seis veces se presenta al centro de la losa, a pesar de la variación de los espesores de esta que representan un  $\pm 10\%$  de variación.
- Se deberá tener cuidado a la hora de la de la fundición que las variaciones del espesor sean menores al 10% respecto al valor de diseño.

- La deformación remanente es de 0,01 mm en los extremos y 0,17 mm en la parte central de la losa.
- La capacidad de resiliencia del sistema está por los 90 kg/m<sup>2</sup> de carga y se observa una pendiente constante (típica de los elementos presforzados) hasta una carga del orden de 200 kg/m<sup>2</sup> de carga.
- A partir de 200 kg/m<sup>2</sup> a 260 kg/m<sup>2</sup> aproximadamente en este punto corresponde al inicio de la zona elastoplástica.
- La hoja de histéresis forma un rectángulo alargado en el cual su amplitud de carga corresponde a 50 kg/m<sup>2</sup>, y en deformación a 0,2 mm.
- El valor de resiliencia de la losa es de 90 kg/m<sup>2</sup> y genera una flexión de 0,3 mm, al llegar a la carga de 250 kg/m<sup>2</sup> genera un reacomodo del sistema por lo que deja una deformación remanente de 0,12 mm.

Figura 45. **Esfuerzo y deformación verticales (dos camas).**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla XII.

- Para esta condición se llevó a una carga aplicada, del orden de los 450 kg/m<sup>2</sup>, más la carga muerta existente de la losa que es del orden de 240 kg /m<sup>2</sup> para un total de 690 kg/m<sup>2</sup> esta carga total considera las cargas ultimas mayoradas (carga viva y carga muerta).
- La deformación máxima al centro con la carga total reporto 2,35 mm, que corresponde a un 30 % de la deflexión máxima permitida en la tabla 24.2.2 del ACI 318-14.
- La recuperación de la deformación luego de quitar la carga aplicada reportó ser del orden de 0,84 mm, que corresponde al 36 % de la deformación máxima medida.

- No se observaron fisuras o grietas en ninguna de las viguetas tipo Ti utilizadas.
- Pasados los 250 kg/m<sup>2</sup> la zona pretensada inferior de la vigueta tipo Ti comienza a disminuir su compresión. Cuando llega al orden de los 275 kg/m<sup>2</sup> se estabiliza el sistema a compresión de la vigueta tipo Ti, cuando la carga alcanza los 440 kg/m<sup>2</sup> el presfuerzo inferior se considera que llega a cero, como se observa en la parte superior de la gráfica en que hay una horizontal donde el acero sufre de relajación por la carga aplicada.
- En la fase de descarga se observa un paralelismo en el comportamiento de recuperación de la vigueta tipo Ti y el comportamiento registrado en la fase de carga.

#### 6.4.4. Fotografías del ensayo

A continuación, se presentan las fotografías tomadas durante la realización de la prueba de carga a la losa B, mostrando así cada paso del proceso.

Figura 46. **Colocación de hilo de pescar**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 47. **Marcado y trazo de cuadrícula guía**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 48. **Ubicación de los deformímetros**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 49. **Colocación de planchas de concreto**



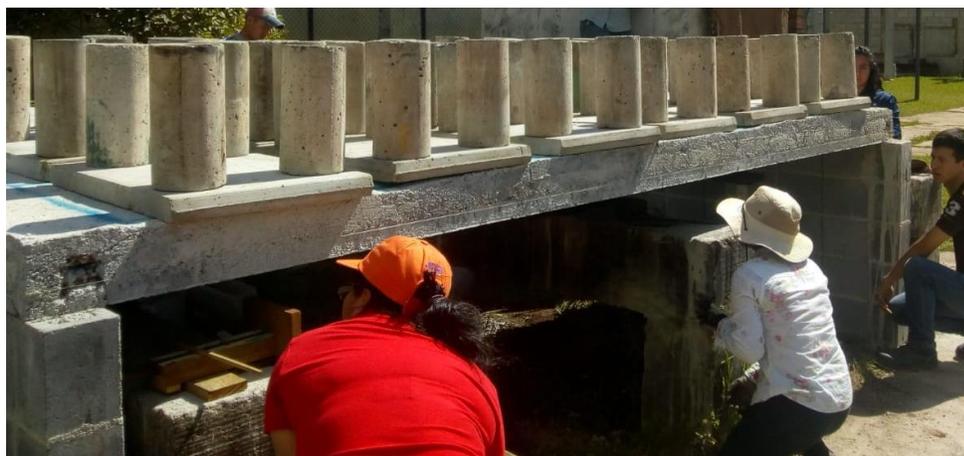
Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 50. **Aplicación de carga con primera cama de cilindros**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 51. **Lectura de las respuestas por medio de los deformímetros**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 52. **Aplicación de carga con segunda cama de cilindros y lectura de los deformímetros**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Las mediciones de las respuestas se realizaron en cada incremento de carga, cada incremento se llevó a cabo en el orden mostrado en la figura 30 hasta completar las 2 camas de carga.

### **6.5. Comparación y análisis de resultados**

De lo mostrado en las gráficas se hace un análisis del comportamiento de cada losa y se comparan los resultados obtenidos con los valores admisibles por la Norma. Los valores admisibles están dados para las deflexiones mostradas con la carga de prueba que también es especificada por la Norma.

Tabla XIII. **Cargas, viva, muerta y de acabados; longitud libre entre apoyos y área superficial de las losas para los ensayos**

CV [kg/m <sup>2</sup> ]	200,00	<b>Carga de diseño</b>	
CM [kg/m <sup>2</sup> ]	240,00		
CA [kg/m <sup>2</sup> ]	20,00	CR [kg/m <sup>2</sup> ]	632,00
Longitud [m] A	3,80	<b>Carga de ensayo</b>	
Longitud [m] B	3,81	CR [kg/m <sup>2</sup> ]	392,00
Área [m <sup>2</sup> ] A	5,02		
Área [m <sup>2</sup> ] B	5,03		

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XIV. **Valores de las cargas máximas aplicadas y sus respectivas deformaciones**

	Descripción ensayo	Carga máxima [kg]	Carga máxima [kg/m <sup>2</sup> ]	Deformación con carga máxima [mm]	Deformación 24h con carga máxima [mm]	Deformación residual [mm]
LOSA A: Con conexión por entrega	1 cama, carga, 24 h y descarga	1 710,33	340,97	3,03	5,37	2,33
	2 camas, solo carga	3 792,23	756,03	8,96		
LOSA B: Con conexión a tope	1 cama, carga y descarga	1 244,33	247,42	1,07		0,16
	1 cama, 1 y 7 segunda cama, descarga	2 186,83	434,83	2,18		0,84

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XV. **Comparación de resultados con los valores teóricos**

		Carga máxima [kg]	Carga máxima [kg/m <sup>2</sup> ] 1,2 CM+1,6 CV	Deformación con carga máxima [mm] L/300	Deformación 24h con carga máxima [mm] L/360	Deformación residual [mm] L/90	Deformación admisible ACI [mm] L/480
Valor Teórico		1 966	392	12,67	10,56	2,64	7,94
<b>Losa A</b>	2 camas	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	No Cumple
<b>Losa B</b>	2 camas	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La carga total de diseño, de acuerdo con la combinación permitida por la norma, es de 632 kg/m<sup>2</sup> incluyendo la carga muerta debida al peso de la vigueta, el peso de la bovedilla y el peso de la losa fundida in situ. Para obtener la carga total que se debe aplicar a la losa, se debe restar de la carga total de diseño la carga muerta, con un valor de 240 kg/m<sup>2</sup>, lo que da un total de 392 kg/m<sup>2</sup>.

En el apartado de apéndice se muestra el desarrollo para la obtención de los valores teóricos de acuerdo con las ecuaciones proporcionadas por la norma y el Reglamento del ACI en cuanto a la deflexión.

- Sobre la losa con conexión por entrega se aplicó una carga máxima de 756 kg/m<sup>2</sup>, si a este valor se le suma el valor de la carga muerta, da un valor de 996 kg/m<sup>2</sup>, y lo comparamos con la carga de diseño, resulta que la carga aplicada fue de un 50 % mayor a la carga de diseño total.

- La deflexión para la carga de un poco más del 1,5 veces la carga de diseño corresponde a 8,96 mm, siendo sólo el 71 % de la deflexión máxima permitida por la norma.
- Continuando con la losa con conexión por entrega, en la primera prueba de carga se le aplicó una carga, extra del su peso propio, de 340 kg/m<sup>2</sup>. Sumando esta carga al peso propio que ya actúa en la losa da un 90 % de la carga teórica de diseño, experimentar una deflexión de 3,03 mm.
- Con un 90 % de carga de diseño sobre la losa se deforma únicamente un 24 % de la deflexión máxima permitida.
- Sostenida la carga sobre la losa durante un periodo de 24 horas, la deflexión medida es de 5,37 mm, siendo un 50 % de la deflexión máxima permitida. Es decir que con un 90 % de la carga de diseño la deflexión es solo el 50 % de la deflexión máxima.
- Removida la carga de 340 kg/m<sup>2</sup>, la deflexión residual fue de 2,33 mm, un 88 % del valor permitido.
- Comparando las deflexiones de ensayo con el valor máximo que permite el Reglamento, se tiene que para la carga de 1,5 veces la carga de diseño su respectiva deflexión es un 13 % mayor al valor permitido siendo de 7,94 mm. Para la carga total de solo el 90 % de la carga de diseño su deflexión está por el orden del 38 % del valor que permite el Reglamento.
- A la losa con conexión por solapo se le aplicó una carga máxima de ensayo, además de su peso propio, de 435 kg/m<sup>2</sup> dando un total de 675

kg/m<sup>2</sup>, dando como resultado un ligero incremento del 6 % sobre la carga de diseño.

- Con un incremento del 6 % de la carga de diseño la deflexión fue de 2,18 mm, un 17 % de la deflexión máxima permitida, muy por debajo del mismo.
- Removida la carga de ensayo de 435 kg/m<sup>2</sup> la deflexión residual fue de un 31 % del valor máximo permitido por la norma con un valor de 0,84 mm.
- Continuando con la losa con conexión por solapo, en la primera carga de prueba se le aplicó una carga de ensayo de 247 kg/m<sup>2</sup>, que sumado con su peso propio da un total de 487 kg/m<sup>2</sup>, un 77 % del total de la carga de diseño solicitada por la norma. Con esta carga experimentó una deflexión de 1,07 mm, un 8 % de la deflexión máxima permitida.
- Al retirar la carga de ensayo, la deflexión residual fue de 0,16 mm, solo un 8 % del valor máximo permitido.
- Ahora corresponde comparar los valores de las deflexiones de ensayo con el valor máximo que permite el Reglamento. Se tiene que para la carga de 1,06 veces la carga de diseño su respectiva deflexión es un 27 % del valor permitido. Para la carga total que es solo el 77 % de la carga de diseño su deflexión está por el orden del 13 % del valor que permite el Reglamento.

## **6.6. Ensayos complementarios**

Con la finalidad de determinar la tenacidad de ambos sistemas de losa, fueron sometidos y castigados en condiciones fuera de norma con ensayos

complementarios. A continuación, se presentan los ensayos realizados en cada losa y los resultados obtenidos.

### **6.6.1. Sistema de losa con conexión por solapo**

A continuación, se describen los ensayos realizados para verificar su comportamiento ante cargas mayores a las cargas de diseño de la prueba de carga.

#### **6.6.1.1. Ensayo con carga horizontal simulando la carga de sismo**

La losa fue sometida a una carga permanente de  $450 \text{ kg/m}^2$ , y se le aplicó carga horizontal (utilizando un gato RC 53) progresivamente misma que fue descargada súbitamente. La losa mantuvo la carga durante 24 horas continuas, posteriormente se descargó y se repitió el procedimiento anterior.

Los datos registrados del ensayo, los datos calculados y los resultados se muestran a continuación.

##### **6.6.1.1.1. Datos registrados**

Los datos registrados de las respuestas del ensayo de carga horizontal se muestran en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Carga y deformaciones horizontales**

	Esfuerzo horizontal (psi)	Carga vertical (kg)	Deformaciones horizontales (mm)	
			Lectura def. h1	Lectura def. h2
<b>Primer ciclo</b>	0	1 242,93	155,00	172,50
	100	1 242,93	155,00	172,50
	200	1 242,93	155,00	172,50
	300	1 242,93	155,00	172,50
	400	1 242,93	155,00	172,50
	600	1 242,93	155,00	172,50
	800	1 242,93	155,00	172,50
	1 000	1 242,93	155,00	173,00
	1 500	1 242,93	155,20	173,50
	0	1 242,93	155,00	172,50
<b>Segundo ciclo</b>	500	2 186,83	154,00	173,30
	1 000	2 186,83	154,50	173,30
	1 500	2 186,83	155,00	173,70
	2 000	2 186,83	156,50	175,20
	2 050	2 186,83	156,50	175,50
	2 100	2 186,83	157,00	176,00
	0	2 186,83	155,00	174,00
<b>Tercer ciclo</b>	400	2 186,83	155,00	174,00
	1 000	2 186,83	156,00	174,80
	1 500	2 186,83	157,00	175,30
	2 000	2 186,83	157,00	176,00
	2 250	2 186,83	158,00	176,50
	0	0,00	155,00	174,00
<b>Cuarto ciclo</b>	150	0,00	155,00	174,00
	500	0,00	155,00	174,00
	1 000	0,00	156,00	174,30
	1 500	0,00	156,50	175,20
	2 000	0,00	158,00	177,00
	2 500	0,00	161,00	181,00
	2 600 (2 min)	0,00	161,00	181,50
	2 650	0,00	162,00	182,00
	0	0,00	155,00	179,50

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 6.6.1.1.2. Cálculos efectuados

La carga horizontal en kg se obtuvo de multiplicar el esfuerzo horizontal aplicado por el gato por el área efectiva del mismo (0,99 plg<sup>2</sup> o 6,39 cm<sup>2</sup>).

Tabla XVII. **Combinación de carga horizontal y esfuerzo vertical y sus respectivas deformaciones horizontales**

	Carga horizontal (kg)	Esfuerzo vertical (kg/m <sup>2</sup> )	Deformación vertical (mm)	Deformaciones horizontales (mm)		
				Def. real h1	Def. real h2	Promedio
<b>Primer ciclo</b>	0	247,14	0,00	0,00	0,00	0,00
	45	247,14	0,97	0,00	0,00	0,00
	90	247,14	0,97	0,00	0,00	0,00
	135	247,14	0,97	0,00	0,00	0,00
	180	247,14	0,97	0,00	0,00	0,00
	269	247,14	0,97	0,00	0,00	0,00
	359	247,14	0,97	0,00	0,00	0,00
	449	247,14	0,97	0,00	0,50	0,25
	674	247,14	0,98	0,20	1,00	0,60
	0	247,14	1,13	0,00	0,00	0,00
<b>Segundo ciclo</b>	225	434,83	2,36	1,00	0,80	0,90
	449	434,83	2,36	1,50	0,80	1,15
	674	434,83	2,63	2,00	1,20	1,60
	898	434,83	2,74	3,50	2,70	3,10
	921	434,83	2,76	3,50	3,00	3,25
	943	434,83	2,97	4,00	3,50	3,75
	0	434,83	3,04	2,00	1,50	1,75
<b>Tercer ciclo</b>	180	434,83	3,04	2,00	1,50	1,75
	449	434,83	3,12	3,00	2,30	2,65
	674	434,83	3,14	4,00	2,80	3,40
	898	434,83	3,19	4,00	3,50	3,75
	1 010	434,83	3,21	5,00	4,00	4,50
	0	0,00	1,62	2,00	1,50	1,75

Continuación de la Tabla XVII

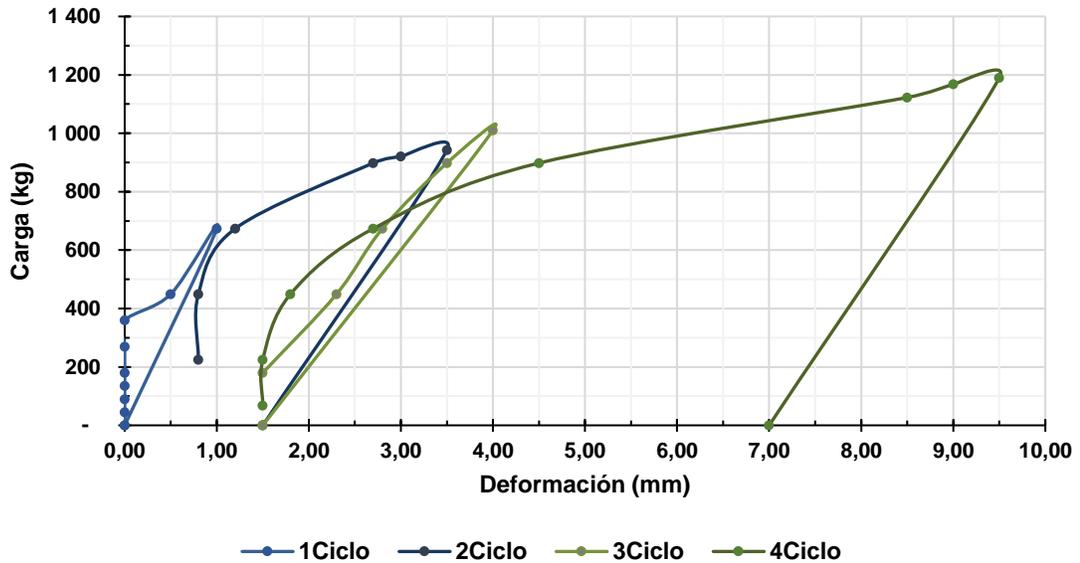
<b>Cuarto ciclo</b>	67	0,00	1,59	2,00	1,50	1,75
	225	0,00	1,56	2,00	1,50	1,75
	449	0,00	1,56	3,00	1,80	2,40
	674	0,00	1,56	3,50	2,70	3,10
	898	0,00	1,58	5,00	4,50	4,75
	1 123	0,00	1,60	8,00	8,50	8,25
	1 168	0,00	1,64	8,00	9,00	8,50
	1 190	0,00	1,64	9,00	9,50	9,25
	0	0,00	0,52	2,00	7,00	4,50

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla XVI.

### 6.6.1.1.3. Resultados

En las figuras 53 y 54 se muestra el comportamiento del sistema de losa relacionado a sus deformaciones horizontales ante carga horizontal.

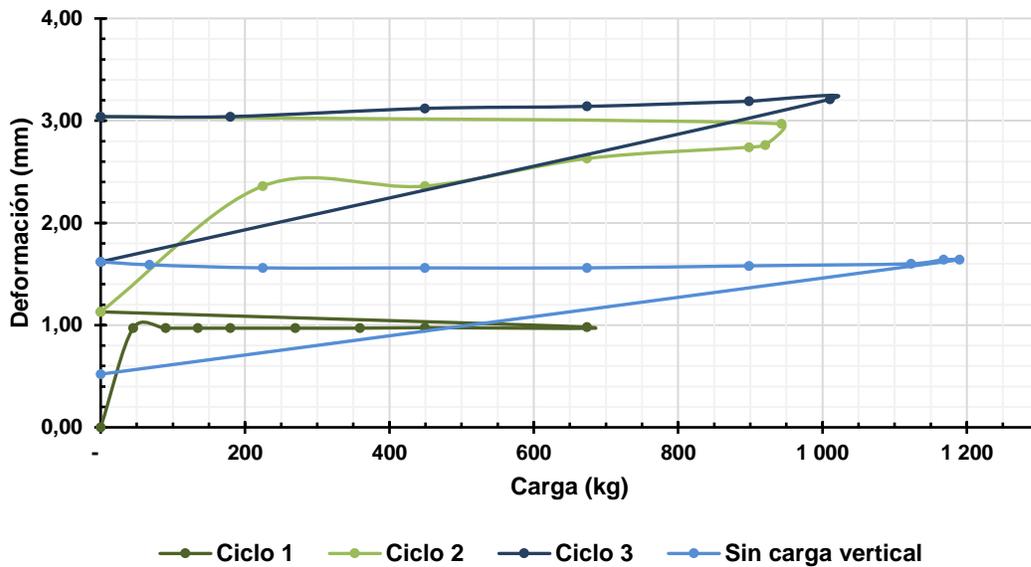
Figura 53. **Comparación de gráficas de carga vrs deformación horizontales de los cuatro ciclos aplicados**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla XVII.

- Primer ciclo de carga horizontal combinado con una carga vertical de 247,14 kg/m<sup>2</sup>.
- Segundo y tercer ciclo de carga horizontal combinado con una carga vertical de 434,83 kg/m<sup>2</sup>.
- Cuarto ciclo de carga horizontal sin carga vertical.

Figura 54. **Comparación de gráficas de Deformación vertical vrs Carga horizontal de los cuatro ciclos aplicados.**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla XVIII.

Posteriormente la losa se volvió a cargar con los  $450 \text{ kg/m}^2$  agregándole una carga de  $364 \text{ kg/m}^2$ . El total de esta carga permaneció sobre la losa durante 10 días. Transcurridos esos días y estando cargada, se le aplicó carga horizontal y carga vertical de abajo hacia arriba, en cada caso se descargó de forma súbita, posteriormente se aplicó una combinación de los casos anteriores descargando súbitamente.

#### 6.6.1.1.4. Fotografías del ensayo

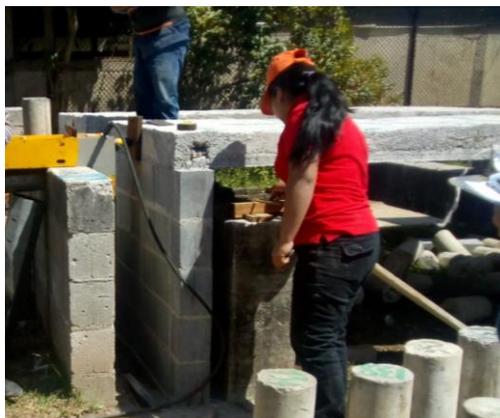
A continuación, se muestran las fotografías del sistema de losa mientras se realiza en ensayo de carga horizontal.

Figura 55. **Aplicación de carga horizontal**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 56. **Lectura de las deformaciones debidas a la carga horizontal**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

### 6.6.1.2. Ensayo de resistencia al fuego

Para finalizar, la losa estando cargada con los 814 kg/m<sup>2</sup>, fue sometida a carga de fuego en la parte inferior de esta durante un periodo de 2 horas, en ese tiempo alcanzó una temperatura máxima de 580 grados centígrados. Concluidas las dos horas, se utilizó un extintor para apagar el fuego y se retiraron los elementos de mampostería colocados para mantener el calor de manera constante con el propósito de generar un choque térmico de la losa e inducir su colapso.

#### 6.6.1.2.1. Fotografías del ensayo

En las siguientes fotografías se muestra el sistema de losa expuesta al fuego, desde la preparación del ensayo hasta su colapso inducido.

Figura 57. Losa con excedencia de carga y exposición al fuego



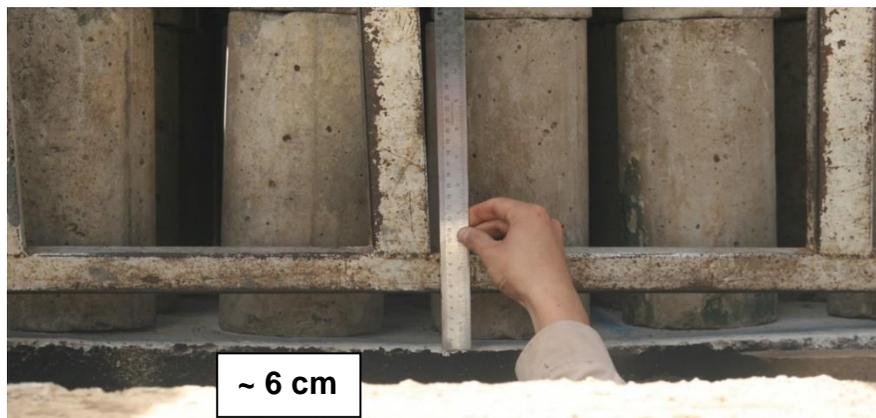
Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 58. **Deflexión debida a la sobrecarga y exposición al fuego**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 59. **Medición de la deflexión durante el periodo expuesto al fuego**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

En la imagen se puede leer que la deflexión marcada durante la sobrecarga y exposición al fuego fue de aproximadamente 6 cm, deflexión que alcanzó

debida a la fluencia del acero provocada por la exposición a las altas temperaturas.

Figura 60. **Extinción del fuego**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 61. **Colapso de la losa, después de aproximadamente 2 horas**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 62. **Separación de la losa del apoyo, grietas en muro de apoyo y grieta por cortante**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 63. **Porción de losa que quedó aún sobre el murete de apoyo**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 64. **Refuerzo en U**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

El perfil de la grieta de figura 62 es similar al marcado por el colapso en la figura 63. La línea de fractura se dio justamente al finalizar el refuerzo en U, a una longitud aproximada de 25 cm a partir del rostro interno del apoyo.

### **6.6.2. Sistema de losa con conexión por entrega**

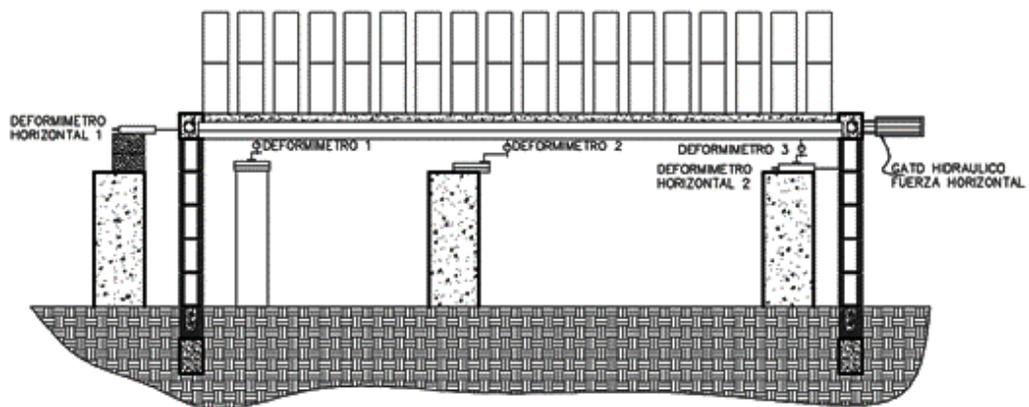
En los siguientes apartados se describen los ensayos complementarios realizados al sistema de losa con conexión por entrega.

#### **6.6.2.1. Ensayo con carga horizontal simulando la carga de sismo**

En el caso del sistema de losa con conexión por entrega, esta fue sometida a cuatro ciclos de carga horizontal, carga que fue incrementando progresivamente y luego se descargó súbitamente. En este caso además de variar la carga horizontal, también se varió la carga vertical, aumentándola en

cada ciclo. La carga aplicada al sistema se realizó por medio de un gato hidráulico ENERPAC RC 256 con capacidad de 25 ton y un área efectiva de 33,29 cm<sup>2</sup> (5,16 plg<sup>2</sup>).

Figura 65. **Esquema del ensayo de carga horizontal y ubicación de los deformímetros**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

Los datos registrados del ensayo, los datos calculados y los resultados se muestran a continuación.

### 6.6.2.1.1. Datos registrados

En las siguientes tablas se muestran los datos registrados del ensayo de carga horizontal, relacionado a sus deformaciones horizontales, así como a las verticales.

Tabla XVIII. **Combinación de carga horizontal con carga vertical y deformaciones horizontales**

	Esfuerzo horizontal (psi)	Carga vertical (kg)	Deformaciones horizontales (mm)	
			Lectura def. h1	Lectura def. h2
<b>Primer ciclo</b>	1	0,00	191,00	112,00
	200	0,00	193,50	115,00
	400	0,00	200,00	119,00
	500	0,00	202,00	122,00
	0	0,00	193,00	114,00
<b>Segundo ciclo</b>	0	1 710,30	192,00	112,00
	200	1 710,30	196,00	116,00
	400	1 710,30	200,00	120,00
	500	1 710,30	202,00	122,00
	0	1 710,30	193,00	113,00
<b>Tercer ciclo</b>	0	1 866,03	193,00	113,00
	50	1 866,03	193,00	113,00
	200	1 866,03	196,00	116,00
	400	1 866,03	201,00	121,00
	500	1 866,03	205,00	123,00
	0	1 866,03	194,00	114,00
<b>Cuarto ciclo</b>	0	3 791,23	193,00	114,00
	200	3 791,23	196,00	116,00
	400	3 791,23	201,00	119,50
	500	3 791,23	203,00	122,00
	0	3 791,23	195,00	114,00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XIX. **Combinación de carga horizontal y carga vertical y deformaciones verticales**

	Esfuerzo horizontal (psi)	Carga vertical (kg)	Deformaciones verticales (mm)		
			Lectura def. 1	Lectura def. 2	Lectura def. 3
<b>Primer ciclo</b>	1	0,00	1,96	6,63	8,69
	200	0,00	1,76	6,45	8,65
	400	0,00	1,40	6,35	8,51
	500	0,00	1,14	6,35	8,39
	0	0,00	1,81	6,19	8,60
<b>Segundo ciclo</b>	0	1 710,30	2,63	9,22	9,43
	200	1 710,30	2,42	9,41	9,52
	400	1 710,30	2,09	9,09	9,43
	500	1 710,30	1,90	8,71	9,37
	0	1 710,30	2,63	9,10	9,57
<b>Tercer ciclo</b>	0	1 866,03	2,74	6,01	9,33
	50	1 866,03	2,71	8,92	9,39
	200	1 866,03	2,54	8,90	9,39
	400	1866,03	2,10	8,52	9,26
	500	1 866,03	1,92	8,40	9,20
	0	1 866,03	2,73	8,72	9,39

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 6.6.2.1.3. Cálculos efectuados

La carga en kg de la prueba de carga horizontal se obtuvo multiplicando la presión aplicada con el gato, por su área efectiva que es de 33,29 cm<sup>2</sup> (5,16 plg<sup>2</sup>), tomado en cuenta las unidades de medida.

Tabla XX. **Combinación de carga horizontal y esfuerzo vertical y sus respectivas deformaciones horizontales**

	Carga horizontal (kg)	Esfuerzo vertical (kg/m <sup>2</sup> )	Deformaciones horizontales (mm)		
			Def. real h1	Def. real h2	Promedio
<b>Primer ciclo</b>	1	0,00	0,00	0,00	0,00
	468	0,00	2,50	3,00	2,75
	936	0,00	9,00	7,00	8,00
	1 170	0,00	11,00	10,00	10,50
	0	0,00	2,00	2,00	2,00
<b>Segundo ciclo</b>	0	340,97	1,00	0,00	0,50
	468	340,97	5,00	4,00	4,50
	936	340,97	9,00	8,00	8,50
	1 170	340,97	11,00	10,00	10,50
	0	340,97	2,00	1,00	1,50
<b>Tercer ciclo</b>	0	372,02	2,00	1,00	1,50
	117	372,02	2,00	1,00	1,50
	468	372,02	5,00	4,00	4,50
	936	372,02	10,00	9,00	9,50
	1 170	372,02	14,00	11,00	12,50
	0	372,02	3,00	2,00	2,50
<b>Cuarto ciclo</b>	0	755,83	2,00	2,00	2,00
	468	755,83	5,00	4,00	4,50
	936	755,83	10,00	7,50	8,75
	1 170	755,83	12,00	10,00	11,00
	0	755,83	4,00	2,00	3,00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla XVIII.

Tabla XXI. **Combinación de carga horizontal y esfuerzo vertical y sus respectivas deformaciones verticales**

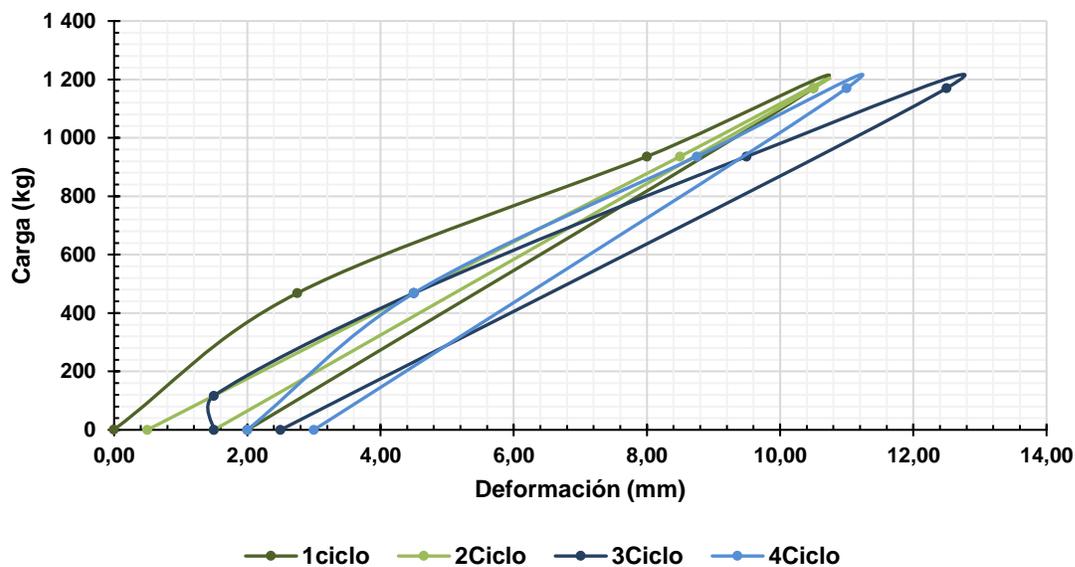
	Carga horizontal (kg)	Esfuerzo vertical (kg/m <sup>2</sup> )	Deformaciones verticales (mm)		
			Def. real 1	Def. real 2	Def. real 3
<b>Primer ciclo</b>	1	0,00	0,00	0,00	0,00
	468	0,00	-0,20	-0,18	-0,04
	936	0,00	-0,56	-0,28	-0,18
	1 170	0,00	-0,82	-0,28	-0,30
	0	0,000	-0,15	-0,44	-0,09
<b>Segundo ciclo</b>	0	340,97	0,67	2,60	0,74
	468	340,97	0,46	2,78	0,83
	936	340,97	0,13	2,46	0,74
	1 170	340,97	-0,06	2,08	0,68
	0	340,97	0,67	2,47	0,88
<b>Tercer ciclo</b>	0	372,02	0,78	3,83	0,64
	117	372,02	0,75	6,74	0,70
	468	372,02	0,58	6,72	0,70
	936	372,02	0,14	6,34	0,57
	1 170	372,02	-0,04	6,22	0,51
	0	372,02	0,77	6,54	0,70

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla XIX.

### 6.6.2.1.5. Resultados

En las gráficas 66 y 67 se muestra el comportamiento del sistema de losa en el sentido horizontal y vertical, respectivamente, ante cargas horizontales.

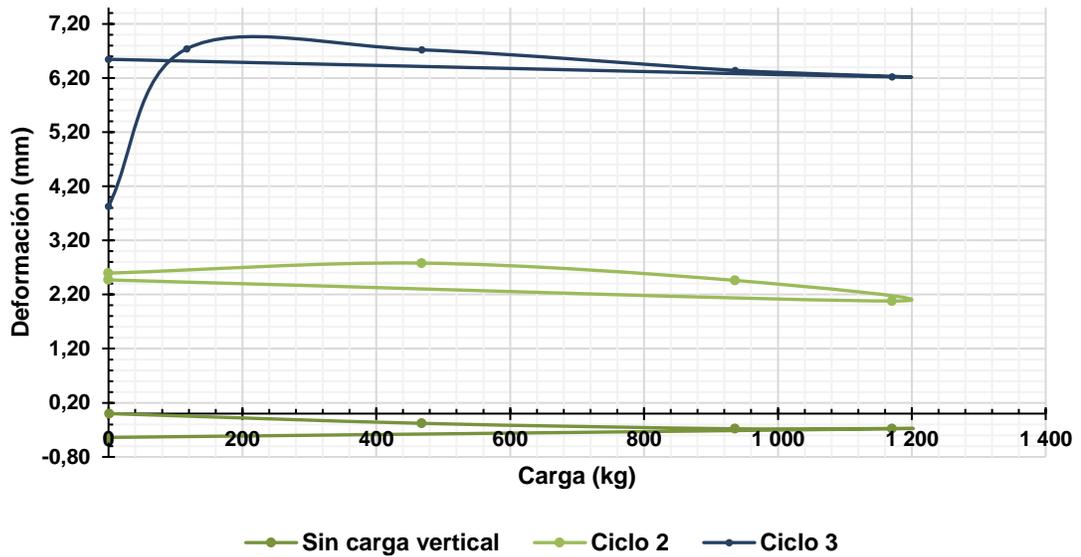
Figura 66. **Carga y deformaciones horizontales, de losa A**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla XX.

- Se presentan cuatro ciclos de carga horizontal con variación de carga vertical distribuida.
- Promedio de deformaciones a los extremos debido a carga horizontal, para cada ciclo.
- Para ciclo 1, carga vertical de 0 kg/m<sup>2</sup>. Para ciclo 2, carga vertical de 340,70 kg/m<sup>2</sup>. Para ciclo 3, carga vertical de 371,72 kg/m<sup>2</sup>. Para ciclo 4, carga vertical de 755,23 kg/m<sup>2</sup>.

Figura 67. Deformación vertical y Carga horizontal



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel. Utilizando datos de la Tabla XXI.

- La gráfica azul muestra el comportamiento de la losa en cuanto a sus deformaciones verticales debidas a una combinación de carga horizontal y una carga vertical de 372 kg/m<sup>2</sup>.
- Las deflexiones aumentan a medida que la carga vertical es mayor aun aplicando la misma carga horizontal.

### 6.6.2.1.7. Fotografías del ensayo

En las siguientes figuras se muestra al sistema de losa sometida al ensayo de carga horizontal.

Figura 68. **Aplicación de carga horizontal sin carga vertical**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 69. **Aplicación de carga horizontal con carga vertical**

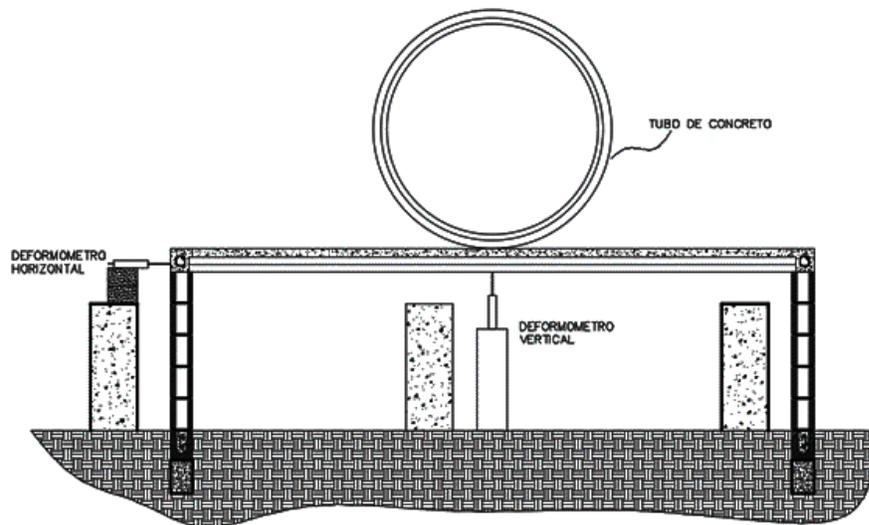


Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

### 6.6.2.2. Ensayo dinámico y estático con tubo de concreto

Para este ensayo se utilizó un tubo de concreto de 2,6 toneladas, el cual se colocó sobre la losa mediante ingenio de la sección de estructuras, con el objetivo de observar su comportamiento ante la vibración que causaba el tubo de concreto al rodarla a lo largo de la losa. Estando el tubo sobre la losa se le indujo movimiento de un extremo a otro (de la losa), de esta manera se realizó el ensayo el ensayo dinámico con carga puntual. Se colocaron deformímetros, uno para medir la respuesta vertical y otro para medir la horizontal.

Figura 70. Esquema del ensayo de dinámico



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

Para el ensayo estático se agregó una carga extra de 323,1 kg, sumando una carga puntual total de 2,92 toneladas, carga que permaneció sobre la losa durante un periodo de 8 días. Transcurridos los ocho días se procedió a retirar la

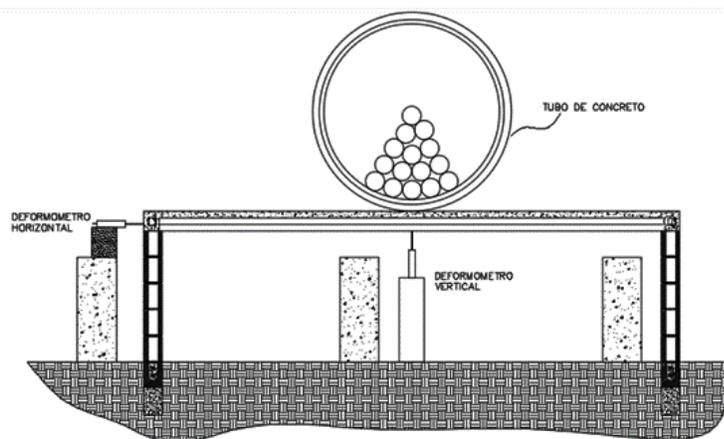
carga extra y a medir las deformaciones, tanto en el sentido vertical como en el horizontal.

Figura 71. **Aplicación de carga dinámica, por medio de un cilindro de concreto**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 72. **Esquema del ensayo estático utilizando un tubo de concreto**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

Figura 73. **Ensayo de carga estática**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

### **6.6.2.3. Ensayo de resistencia a la exposición al fuego**

Finalizados los ensayos descritos anteriormente, se procede a evaluar la losa mediante una excedencia de carga y exposición al fuego. La carga total vertical fue de  $755 \text{ kg/m}^2$  distribuida en su área, excediendo los valores de diseño establecidos y se acondicionó la estructura para exponerla al fuego durante una hora alcanzando una temperatura máxima de  $571 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras se consumía el material que ocasionaba las llamas se registraron lecturas de temperatura a lo interno y externo de la estructura. En esta ocasión, el fuego fue apagado con agua.

En este ensayo, es necesario aclarar que se realizó de forma empírica, no cumpliendo con la normativa correspondiente, ya que el objetivo fue llevarla a condiciones extremas para su colapso.

### 6.6.2.3.1. Fotografías del ensayo

A continuación, se muestran las fotografías del sistema de losa expuesta al fuego, desde su preparación hasta su colapso inducido.

Figura 74. Preparación del ensayo



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 75. Losa con excedencia de carga y exposición al fuego



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 76. **Exudación en el nudo debido al aumento de temperatura**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 77. **Deflexión de la losa con excedencia de carga y exposición al fuego**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 78. **Medición de la deflexión por sobrecarga y exposición al fuego**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 79. **Colapso de losa**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 80. **Fractura por cortante**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 81. **Detalle de la falla de la losa**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 82. **Detalle de falla en el muro de apoyo**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

Figura 83. **Fisuras por flexión, generadas durante la exposición al fuego**



Fuente: elaboración propia. Área de prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

## CONCLUSIONES

1. El sistema de losa pretensada con vigueta tipo Ti, tiene un comportamiento satisfactorio. La pérdida que le llevó al colapso al sistema evaluado, se vio influenciado por los ensayos complementarios y la combinación de: un 40 % por la sobrecarga última de diseño y el tiempo durante la cual estuvo sometida a dicha carga, presentando en la vigueta central al centro de la luz una deflexión de 23 mm; un 20 % por los efectos del armado de losa, solera murete; 20 % debido al choque térmico generado al ser expuesta a altas temperaturas y luego a la disminución de las mismas y por último 20 % debido a la fatiga causada por las vibraciones sumado a esto la relajación por carga y temperatura.
2. La evidencia que se presentó con anterioridad, al realizar las pruebas de carga, indica que la Vigueta Ti prefabricada y pretensada, como elemento principal del sistema de losa, soporta la carga de  $632 \text{ kg/m}^2$  sin presentar evidencias de falla; siendo tal su capacidad que refleja una deflexión respectiva de sólo el 49 % con la conexión por entrega y del 15 % con la conexión por solapo, indicando que el comportamiento de la vigueta es satisfactorio.
3. La relación que se da entre las cargas verticales y sus respectivas deformaciones indican que el comportamiento del sistema de losa es lineal, hasta una carga aproximadamente de  $370 \text{ kg/m}^2$ . Luego sufre un acomodamiento y vuelven al mismo comportamiento, marcando una pendiente promedio de  $130 \text{ kg/m}^2$  por cada milímetro de deformación por

lo que para alcanzar los 12 mm que permite la Norma alcanzaría una carga de 1 680 kg/m<sup>2</sup>.

4. En general ambos sistemas de losa presentaron un comportamiento satisfactorio, sin embargo, con los resultados obtenidos de las pruebas de carga realizadas, se identificó que, para cargas verticales, la losa con una conexión por solapo tiene un mejor comportamiento; ya que las deflexiones que sufre son solo el 30 % de las deflexiones marcadas por la losa con una conexión por entrega al nivel de la carga de servicio; aunque en el colapso ambas presentaron el mismo perfil en la falla, justo al finalizar el refuerzo en forma de U.
5. Las deflexiones son mayores en la losa con conexión por entrega debido a que esta es más rígida; por lo tanto, los efectos de torsión son absorbidos por el muro de apoyo sufriendo volteo, incrementando así las deflexiones. Las deflexiones en la conexión por solapo son menores ya que el comportamiento es como el de una articulación y los efectos de torsión se distribuyen entre la vigueta, la losa y la solera en conjunto con el muro de apoyo.
6. Con los ensayos complementarios finalmente se demuestra que el buen comportamiento del sistema de losa con vigueta Ti se fundamenta en un buen muro de carga.

## RECOMENDACIONES

1. Proporcionar mayor sujeción entre la vigueta y la solera, aumentando la longitud de desarrollo del refuerzo por cortante por fricción, evitando así que se produzca efecto de corte. Además de los anclajes para contrarrestar la torsión producida por el peso propio y la carga aplicada.
2. Emplear un sistema que unifique las viguetas  $T_i$ , debido a los efectos de torsión observados durante la elaboración de los ensayos y así evitar este efecto.
3. Utilizar muros de carga con una buena resistencia, usando bloques de concreto con etiqueta azul (clase A) u otro sistema que evidencie su alta calidad y proveerle de un refuerzo adecuado. No abusar de la capacidad del sistema de losa.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ACI 318. *Requisito de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318SUS-14 y Comentario ACI 318SUS-14. 2014*. Farmington Hills: [s.n.], 2014. 407 p.
2. ANIVIP A.C. *Manual de Diseño Estructural de Sistemas de Piso o Losa a Base de Vigüeta Pretensada y Bovedilla*. [En línea]. <[https://issuu.com/anivip/docs/manual\\_anivip\\_\\_\\_disen\\_o\\_vigüeta\\_y\\_b](https://issuu.com/anivip/docs/manual_anivip___disen_o_vigüeta_y_b)>. [Consulta: 2 de agosto de 2021].
3. BIRKELAND, Philip W.; BIRKELAND, Halvard W. *Connections in precast concrete construction*. En *Journal Proceedings*. 1966. 359 p.
4. BURÓN MAESTRO Manuel; FERNÁNDEZ ORDOÑEZ-HERNÁNDEZ, David. *Evolución de la prefabricación para la edificación en España. Medio siglo de experiencia. Informes de la Construcción*. [En línea]. <<https://core.ac.uk/download/pdf/230697986.pdf>>. [Consulta: 21 de julio de 2020].
5. COGUANOR. *NTG 41084 Vigüeta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto. Especificaciones*. Guatemala: [s.n.], 2017. 18 p.
6. COGUANOR. *NTG 41084 h1 Métodos de ensayo vigüeta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto*. Guatemala: [s.n.], 2017. 19 p.

7. CONSTRUMÁTICA. *Resiliencia*. [En línea]. <<https://www.construmatica.com/construpedia/Resiliencia>>. [Consulta: 5 de abril de 2021].
8. DOMÍNGUEZ ÁLVAREZ, Aurelio, et al. *Resistencia a esfuerzo cortante en forjados de viguetas pretensadas según la nueva instrucción EHE*. [En línea]. <<https://core.ac.uk/reader/36018190>>. [Consulta: 20 de julio 2021].
9. ESTRUCTURANDO. *Contraflecha debida al pretensado*. [En línea]. <<https://estructurando.net/2017/06/26/contraflecha-debida-al-pretensado/>>. [Consulta: 8 de abril de 2021].
10. LEÓN FLORES, Giulio A. y LÓPEZ BATIZ, Oscar y PADILLA ROMERO, Daniel A. *ESTUDIOS EXPERIMENTALES DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOSAS PREFABRICADAS*. [En línea]. [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=Estudios+Experimentales+del+comportamiento+s%C3%ADsmico+de+losas+prefabricadas.&btnG=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Estudios+Experimentales+del+comportamiento+s%C3%ADsmico+de+losas+prefabricadas.&btnG=). [Consulta: 20 de julio de 2020].
11. NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto presforzado*. México D.F. Limusa S.A., 1982. 302 p.
12. NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto*. Bogotá. McGrae Hill, 1999. 374 p.

13. RIBAS GONZALEZ, Carlos R. *Resistencia a cortante de los forjados de vigueta pretensada y bovedilla.* [En línea]. <<http://hdl.handle.net/2117/95159>>. [Consulta: 20 de julio 2020].
14. TORRES, Jorge E. *Filosofía de enseñanza de mecánica de materiales para los ingenieros del Siglo XXI.* [En línea]. <<http://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/u301/43090e1.pdf>>. [Consulta: 7 de abril de 2021].
15. VÁSQUEZ ÁVILA, Gil Enrique y PÉREZ LARA y HERNÁNDEZ, Miguel Ángel. *Estudio experimental de cambio de peralte en un sistema de losa prefabricada con vigueta pretensada y bovedilla aligerante de poliestireno.* Veracruz. [s.n.], 2008. 16 p.



# APÉNDICES

## Apéndice 1. Análisis por el método ASD

Análisis por el método ASD	
<b>Datos y Propiedades de la sección prefabricada</b>	
Longitud	$L := 3.85 \text{ m}$
Peso específico del concreto	$\gamma := 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Peralte de la vigueta	$h := 10 \text{ cm}$
Resistencia del concreto vigueta	$f'_{cv} := 422 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
Resistencia del acero de presfuerzo	$f_{pu} := 17500 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad del acero de presfuerzo	$E_p := 2000000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
Diámetro de acero de presfuerzo	$D_p := 6.35 \text{ mm}$
Número de alambre de presfuerzo	$N := 4$
Recubrimiento	$r := 2.5 \text{ cm}$
Porcentaje de pérdidas	$R := 15\%$

Continuación del Apéndice 1

Dimensiones pastilla		
Base de la pastilla	$b_p := 12 \text{ cm}$	
Altura de la pastilla	$h_p := 5 \text{ cm}$	
Dimensiones nervio		
Base del nervio	$b_n := 5 \text{ cm}$	
Altura del nervio	$h_n := 5 \text{ cm}$	
Datos calculados de la sección prefabricada		
Área de sección de la viga	$A_{vp} := b_p \cdot h_p + b_n \cdot h_n$	$A_{vp} = 85 \text{ cm}^2$
Área de alambre de presfuerzo	$A_p := \frac{\pi}{4} \cdot D_p^2$	$A_p = 0.32 \text{ cm}^2$
Esfuerzo máximo permisible en el acero de presfuerzo al momento de la transferencia, código ACI 319-14 en el inciso 20.3.2.5.1	$f_{pi} := 0.70 f_{pu}$	$f_{pi} = 12250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
Presfuerzo inicial en un alambre	$P'_i := f_{pi} \cdot A_p$	$P'_i = 3879.48 \text{ kg}$
Presfuerzo inicial total	$P_i := N \cdot P'_i$	$P_i = 15517.92 \text{ kg}$
Presfuerzo efectivo	$P_e := P_i \cdot (1 - R)$	$P_e = 13190.23 \text{ kg}$
Centroide plástico de la sección prefabricada		
Módulo de elasticidad del concreto	$E_{cv} := 15100 \cdot \sqrt{f'_{cv} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 310193.84 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	
Resistencia a la fluencia del acero de presfuerzo	$f_{py} := 0.85 f_{pu} = 14875 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	
Relación modular	$n_1 := \frac{E_p}{E_{cv}} = 6.45$	

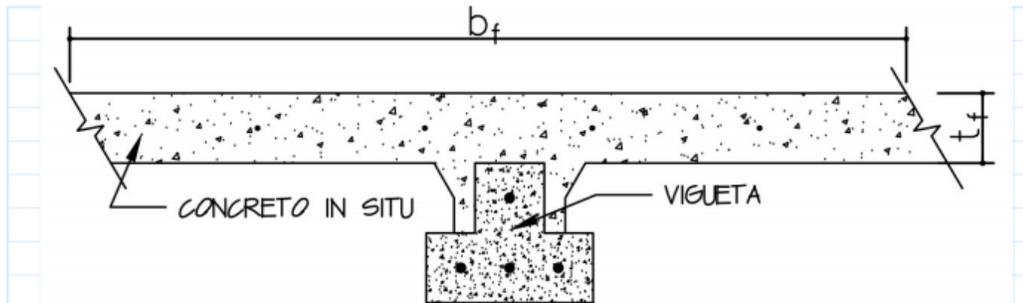
## Continuación del Apéndice 1

<b>Fuerzas</b>	
Fuerzas del concreto	Fuerzas del acero
$C_1 := b_n \cdot h_n \cdot 0.85 f'_{cv} = 8967.5 \text{ kg}$	$C'_{s1} := A_p \cdot (f_{py} - 0.85 f'_{cv}) = 4597.2 \text{ kg}$
$C_2 := b_p \cdot h_p \cdot 0.85 f'_{cv} = 21522 \text{ kg}$	$C'_{s2} := 3 A_p \cdot (f_{py} - 0.85 f'_{cv}) = 13791.6 \text{ kg}$
Fuerza de compresión total	$P_n := C_1 + C_2 + C'_{s1} + C'_{s2} = 48878.29 \text{ kg}$
<b>Centroides</b>	
Centroides de fuerzas del concreto	Centroides de fuerzas del acero
$y_n := h_p + \frac{h_n}{2} = 7.5 \text{ cm}$	$y_{s1} := h - r - \frac{D_p}{2} = 7.18 \text{ cm}$
$y_{pas} := \frac{h_p}{2} = 2.5 \text{ cm}$	$y_{s2} := r + \frac{D_p}{2} = 2.82 \text{ cm}$
$y := \frac{(C_1 \cdot y_n + C_2 \cdot y_{pas} + C'_{s1} \cdot y_{s1} + C'_{s2} \cdot y_{s2})}{P_n}$	
$y = 3.95 \text{ cm}$	
$c_{2p} := y = 3.95 \text{ cm}$	
$c_{1p} := 10 \text{ cm} - c_{2p} = 6.05 \text{ cm}$	
Inercia de la sección prefabricada por el teorema de ejes paralelos	
Inercias parciales	
Inercia del nervio	$I'_n := \frac{1}{12} b_n \cdot h_n^3 = 52.08 \text{ cm}^4$
Inercia de la pastilla	$I'_{pas} := \frac{1}{12} b_p \cdot h_p^3 = 125 \text{ cm}^4$
Distancia del centroide de la sección de la vigueta al centroide del nervio y la pastilla	
Distancia d del nervio	$d_n := c_{1p} - \frac{h_n}{2} = 3.55 \text{ cm}$
Distancia d de la pastilla	$d_{pas} := c_{2p} - \frac{h_p}{2} = 1.45 \text{ cm}$

Continuación del Apéndice 1

Área		
Área del nervio	$A_n := b_n \cdot h_n = 25 \text{ cm}^2$	
Área de la pastilla	$A_{pas} := b_p \cdot h_p = 60 \text{ cm}^2$	
Inercia total del nervio	$I_n := I'_n + A_n \cdot d_n^2 = 367.62 \text{ cm}^4$	
Inercia total de la pastilla	$I_{pas} := I'_{pas} + A_{pas} \cdot d_{pas}^2 = 250.68 \text{ cm}^4$	
Inercia de la sección prefabricada	$I_p := I_n + I_{pas} = 618.31 \text{ cm}^4$	
Radio de giro al cuadrado	$r_{2p} := \frac{I_p}{A_{vp}}$	$r_{2p} = 7.27 \text{ cm}^2$
Módulos de sección		
$S_{1p} := \frac{I_p}{c_{1p}}$	$S_{1p} = 102.15 \text{ cm}^3$	
$S_{2p} := \frac{I_p}{c_{2p}}$	$S_{2p} = 156.64 \text{ cm}^3$	
<b><u>Excentricidad del acero de presfuerzo</u></b>		
Área de las camas de acero		
Área de la primera cama	$A_{c1} := 1 \cdot A_p$	$A_{c1} = 0.32 \text{ cm}^2$
Área de la segunda cama	$A_{c2} := 3 \cdot A_p$	$A_{c2} = 0.95 \text{ cm}^2$
Centroide de las camas de acero		
Centroide de la primera cama	$c_{c1} := y_{s1}$	$c_{c1} = 7.18 \text{ cm}$
Centroide de la segunda cama	$c_{c2} := y_{s2}$	$c_{c2} = 2.82 \text{ cm}$
Centroide del acero de presfuerzo	$c_p := \frac{A_{c1} \cdot c_{c1} + A_{c2} \cdot c_{c2}}{A_{c1} + A_{c2}}$	$c_p = 3.91 \text{ cm}$
Excentricidad del acero de presfuerzo	$e := c_{2p} - c_p$	$e = 0.04 \text{ cm}$

Continuación del Apéndice 1



**Datos y propiedades de la losa**

Resistencia del concreto fundido in situ	$f'_{cl} := 210 \frac{kg}{cm^2}$
Refuerzo por temperatura	Electromalla 6x6 9/9
Ancho efectivo del ala	$b_f := 60 \text{ cm}$
Espesor de la losa	$t_f := 5 \text{ cm}$

**Datos calculados de la sección compuesta**

Peralte de la sección compuesta	$H := h + t_f$	$H = 15 \text{ cm}$
---------------------------------	----------------	---------------------

Área de la sección compuesta. Se empleará el método del área transformada para obtener un área de concreto colada in situ equivalente a un concreto con resistencia igual al concreto prefabricado.

Módulo de elasticidad del concreto vigueta	$E_{cv} = 310193.84 \frac{kg}{cm^2}$	
Módulo de elasticidad del concreto en la losa	$E_{cl} := 15100 \cdot \sqrt{f'_{cl} \cdot \frac{kg}{cm^2}} = 218819.79 \frac{kg}{cm^2}$	
Relación modular	$n := \frac{E_{cl}}{E_{cv}}$	$n = 0.71$
Ancho efectivo modificado	$b_e := b_f \cdot n$	$b_e = 42.33 \text{ cm}$
Área de la sección de concreto colada in situ, obtenida con AutoCAD	$A_l := 320 \text{ cm}^2$	

Continuación del Apéndice 1

Área transformada de la sección fundida in situ	$A_t := A_l \cdot n$	$A_t = 225.74 \text{ cm}^2$
Área de la sección compuesta	$A_c := A_{vp} + A_t$	$A_c = 310.74 \text{ cm}^2$
Centroide de la sección compuesta		
Centroide de la sección colada in situ	$c_l := 12.21 \text{ cm}$	
$c_{3c} := \frac{A_{vp} \cdot (H - c_{2p}) + A_t \cdot (H - c_l)}{A_c}$		$c_{3c} = 5.05 \text{ cm}$
$c_{2c} := H - c_{3c}$		$c_{2c} = 9.95 \text{ cm}$
$c_{1c} := h - c_{2c}$		$c_{1c} = 0.05 \text{ cm}$
$c_{4c} := c_{3c} - t_f$		$c_{4c} = 0.05 \text{ cm}$
Inercia de la sección compuesta		$I_c := 5575.60 \text{ cm}^4$
Radio de giro	$r_{2c} := \frac{I_c}{A_c}$	$r_{2c} = 17.94 \text{ cm}^2$
Módulos de sección		
$S_{1c} := \frac{I_c}{c_{1c}}$		$S_{1c} = 111075.19 \text{ cm}^3$
$S_{2c} := \frac{I_c}{c_{2c}}$		$S_{2c} = 560.37 \text{ cm}^3$

Continuación del Apéndice 1

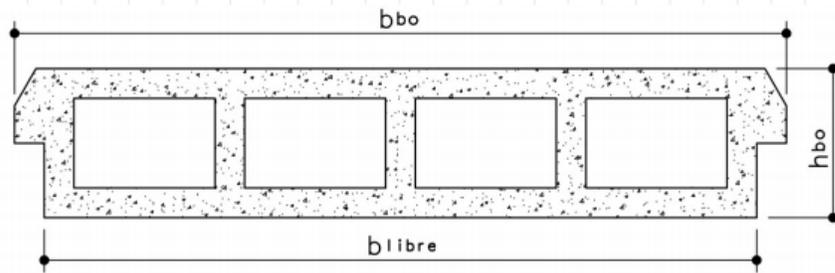
$$S_{3c} := \frac{I_c}{c_{3c}}$$

$$S_{3c} = 1104.04 \text{ cm}^3$$

$$S_{4c} := \frac{I_c}{c_{4c}}$$

$$S_{4c} = 111075.19 \text{ cm}^3$$

**Datos de bovedilla de concreto**



Resistencia sobre área bruta  $R_{bo} := 25 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Peso por unidad de bovedilla  $P_{bo} := 9.4 \text{ kg}$

Base de la bovedilla  $b_{bo} := 52 \text{ cm}$

Base libre de la bovedilla  $b_{libre} := 48 \text{ cm}$

Altura de la bovedilla  $h_{bo} := 10 \text{ cm}$

Ancho de la bovedilla  $a_{bo} := 20 \text{ cm}$

**Integración de cargas**

Peso de la vigueta  $w_o := \gamma \cdot A_{vp}$   $w_o = 20.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Peso de la bovedilla

Unidades de bovedilla por metro lineal  $u := \frac{(1 \text{ m})}{a_{bo}} \cdot \frac{1}{\text{m}}$   $u = 5 \frac{1}{\text{m}}$

$w_{bo} := P_{bo} \cdot u$   $w_{bo} = 47 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Continuación del Apéndice 1

Peso de losa colada in situ	$w_l := \gamma \cdot A_l$	$w_l = 76.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
Peso de acabados	$w'_{ac} := 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$	$w_{ac} := w'_{ac} \cdot b_f$ $w_{ac} = 12 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
Carga viva, NSE 2-10	$w'_L := 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$	$w_L := w'_L \cdot b_f$ $w_L = 120 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
<b><u>Momentos positivos máximos</u></b>		
Peso de la vigueta	$M_o := \frac{w_o \cdot L^2}{12}$	$M_o = 25.2 \text{ kg} \cdot \text{m}$
Peso de la bovedilla	$M_{bo} := \frac{w_{bo} \cdot L^2}{12}$	$M_{bo} = 58.05 \text{ kg} \cdot \text{m}$
Peso de losa colada in situ	$M_l := \frac{w_l \cdot L^2}{12}$	$M_l = 94.86 \text{ kg} \cdot \text{m}$
Peso de acabados	$M_{ac} := \frac{w_{ac} \cdot L^2}{12}$	$M_{ac} = 14.82 \text{ kg} \cdot \text{m}$
Carga viva, NSE 2-10	$M_L := \frac{w_L \cdot L^2}{12}$	$M_L = 148.23 \text{ kg} \cdot \text{m}$

Continuación del Apéndice 1

<b>RESUMEN DE DATOS</b>		
<b>Sección prefabricada</b>	<b>Sección compuesta</b>	
$A_{vp} = 85 \text{ cm}^2$	$A_c = 310.74 \text{ cm}^2$	$S_{1c} = 111075.19 \text{ cm}^3$
$c_{1p} = 6.05 \text{ cm}$	$c_{1c} = 0.05 \text{ cm}$	$S_{2c} = 560.37 \text{ cm}^3$
$c_{2p} = 3.95 \text{ cm}$	$c_{2c} = 9.95 \text{ cm}$	$S_{3c} = 1104.04 \text{ cm}^3$
$I_p = 618.31 \text{ cm}^4$	$c_{3c} = 5.05 \text{ cm}$	$S_{4c} = 111075.19 \text{ cm}^3$
$r_{2p} = 7.27 \text{ cm}^2$	$c_{4c} = 0.05 \text{ cm}$	
$S_{1p} = 102.15 \text{ cm}^3$	$I_e = 5575.6 \text{ cm}^4$	
$S_{2p} = 156.64 \text{ cm}^3$	$r_{2c} = 17.94 \text{ cm}^2$	
<b>Momentos positivos máximos</b>	<b>Del presfuerzo</b>	
$M_o = 25.2 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$e = 0.04 \text{ cm}$	
$M_{bo} = 58.05 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$P_i = 15517.92 \text{ kg}$	
$M_l = 94.86 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$P_e = 13190.23 \text{ kg}$	
$M_{ac} = 14.82 \text{ kg} \cdot \text{m}$		
$M_L = 148.23 \text{ kg} \cdot \text{m}$		

## Continuación del Apéndice 1

### CÁLCULO DE ESFUERZOS

Se evaluarán por separado los esfuerzos en la vigueta y en la sección compuesta (vigueta más losa) provocados por las cargas.

#### Calculo de esfuerzos en la sección prefabricada (vigueta)

##### Esfuerzos debidos al presfuerzo inicial

$$f_{1\_Pi} := -\frac{P_i}{A_{vp}} \left( 1 - \frac{e \cdot c_{1p}}{r_{2p}} \right) \quad f_{1\_Pi} = -176.7 \frac{kg}{cm^2}$$

$$f_{2\_Pi} := -\frac{P_i}{A_{vp}} \left( 1 + \frac{e \cdot c_{2p}}{r_{2p}} \right) \quad f_{2\_Pi} = -186.39 \frac{kg}{cm^2}$$

##### Esfuerzos debidos al presfuerzo inicial más peso propio de la vigueta

$$f_{1\_Pi\_Mo} := -\frac{P_i}{A_{vp}} \left( 1 - \frac{e \cdot c_{1p}}{r_{2p}} \right) - \frac{M_o}{S_{1p}} \quad f_{1\_Pi\_Mo} = -201.37 \frac{kg}{cm^2}$$

$$f_{2\_Pi\_Mo} := -\frac{P_i}{A_{vp}} \left( 1 + \frac{e \cdot c_{2p}}{r_{2p}} \right) + \frac{M_o}{S_{2p}} \quad f_{2\_Pi\_Mo} = -170.3 \frac{kg}{cm^2}$$

#### Primer chequeo

El código ACI 318-14 en el inciso 24.5.3.1 y 24.5.3.2 establece los esfuerzos permisibles a la compresión y a la tracción en el concreto después de la transferencia del presfuerzo, respectivamente.

La práctica, basada en las bibliografías, estima que el concreto debe haber alcanzado una resistencia  $f'_{ci}$  entre el 70% y 80% de su resistencia especificada a la compresión ( $f'_c$ ) al momento de la transferencia de la fuerza de presfuerzo.

Resistencia del concreto en transferencia	$f'_{ci} := 0.8 \cdot f'_c$	$f'_{ci} = 337.6 \frac{kg}{cm^2}$
---	-----------------------------	-----------------------------------

Esfuerzo permisible a la compresión	$f_{ci} := 0.60 \cdot f'_{ci}$	$f_{ci} = 202.56 \frac{kg}{cm^2}$
-------------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------

Esfuerzo permisible a la tracción	$f_{ti} := 3 \cdot \sqrt{f'_{ci} \cdot \frac{kg}{cm^2}}$	$f_{ti} = 55.12 \frac{kg}{cm^2}$
-----------------------------------	--	----------------------------------

## Continuación del Apéndice 1

Al calcular los esfuerzos se obtuvieron que ambas fibras, tanto la superior como la inferior, están experimentando esfuerzos de compresión; entonces el límite que corresponde cumplir es el valor de  $f_{ci}$ .

$$Esfuerzo\_fibra\_superior := \begin{cases} \text{if } |f_{1\_Pe\_Mo}| < f_{ci} \\ \quad \text{"Cumple"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"No Cumple"} \end{cases} \quad Esfuerzo\_fibra\_superior = \text{"Cumple"}$$

$$Esfuerzo\_fibra\_inferior := \begin{cases} \text{if } |f_{2\_Pe\_Mo}| < f_{ci} \\ \quad \text{"Cumple"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"No Cumple"} \end{cases} \quad Esfuerzo\_fibra\_inferior = \text{"Cumple"}$$

### Esfuerzos debidos al presfuerzo efectivo más peso propio de la vigueta

$$f_{1\_Pe\_Mo} := -\frac{P_e}{A_{vp}} \left( 1 - \frac{e \cdot c_{1p}}{r_{2p}} \right) - \frac{M_o}{S_{1p}} \quad f_{1\_Pe\_Mo} = -174.87 \frac{kg}{cm^2}$$

$$f_{2\_Pe\_Mo} := -\frac{P_e}{A_{vp}} \left( 1 + \frac{e \cdot c_{2p}}{r_{2p}} \right) + \frac{M_o}{S_{2p}} \quad f_{2\_Pe\_Mo} = -142.34 \frac{kg}{cm^2}$$

### Esfuerzos debidos al presfuerzo efectivo, peso propio de la vigueta, peso de las bovedillas y peso de la losa

$$f_{1\_Pe\_Mo\_Mbo\_Ml} := -\frac{P_e}{A_{vp}} \left( 1 - \frac{e \cdot c_{1p}}{r_{2p}} \right) - \frac{M_o + M_{bo} + M_l}{S_{1p}} \quad f_{1\_Pe\_Mo\_Mbo\_Ml} = -324.56 \frac{kg}{cm^2}$$

$$f_{2\_Pe\_Mo\_Mbo\_Ml} := -\frac{P_e}{A_{vp}} \left( 1 + \frac{e \cdot c_{2p}}{r_{2p}} \right) + \frac{M_o + M_{bo} + M_l}{S_{2p}} \quad f_{2\_Pe\_Mo\_Mbo\_Ml} = -44.72 \frac{kg}{cm^2}$$

Continuación del Apéndice 1

Calculo de esfuerzos en la sección compuesta (vigüeta+losa)	
<b>Esfuerzos en vigüeta debidos a la carga de acabados y carga viva</b>	
Los esfuerzos en las fibras superior e inferior del miembro prefabricado debido a las cargas de servicio son:	
$f_{1\_Mac\_ML} := -\frac{M_{ac} + M_L}{S_{1c}}$	$f_{1\_Mac\_ML} = -0.15 \frac{kg}{cm^2}$
$f_{2\_Mac\_ML} := \frac{M_{ac} + M_L}{S_{2c}}$	$f_{2\_Mac\_ML} = 29.1 \frac{kg}{cm^2}$
<b>Esfuerzos totales en vigüeta</b>	
Los esfuerzos provocados por las cargas de servicio alrededor de la sección compuesta en las fibras superior e inferior de la vigüeta se le suman los esfuerzos alrededor de la sección prefabricada.	
$f_{1t} := f_{1\_Pe\_Mo\_Mbo\_ML} + f_{1\_Mac\_ML}$	$f_{1t} = -324.71 \frac{kg}{cm^2}$
$f_{2t} := f_{2\_Pe\_Mo\_Mbo\_ML} + f_{2\_Mac\_ML}$	$f_{2t} = -15.62 \frac{kg}{cm^2}$
<b>Esfuerzos en la losa debidos a la carga de acabados y carga viva</b>	
$f_{1l\_Mac\_ML} := -\frac{M_{ac} + M_L}{S_{3c}} \cdot n$	$f_{1l\_Mac\_ML} = -10.42 \frac{kg}{cm^2}$
$f_{2l\_Mac\_ML} := \frac{M_{ac} + M_L}{S_{4c}} \cdot n$	$f_{2l\_Mac\_ML} = -0.1 \frac{kg}{cm^2}$

Continuación del Apéndice 1

Segundo chequeo		
El código ACI 318-14 en las tablas 24.5.4.1 y 24.5.2.1 establece los esfuerzos permisibles a la compresión y tracción, respectivamente, bajo cargas de servicio.		
Esfuerzo permisible a la compresión	$f_{cs} := 0.45 \cdot f'_{cv}$	$f_{cs} = 189.9 \frac{kg}{cm^2}$
Esfuerzo permisible a la tracción	$f_{ts} := 6 \cdot \sqrt{f'_{cv} \cdot \frac{kg}{cm^2}}$	$f_{ts} = 123.26 \frac{kg}{cm^2}$
Al calcular los esfuerzos se obtuvieron que ambas fibras, tanto la superior como la inferior, están experimentando esfuerzos de compresión; entonces el límite que corresponde cumplir es el valor de $f_{cs}$		
$EsfuerzosCompresión :=$	$\left\  \begin{array}{l} \text{if }  f_{1t}  < f_{cs} \\ \quad \left\  \begin{array}{l} \text{"Cumple"} \end{array} \right\  \\ \text{else} \\ \quad \left\  \begin{array}{l} \text{"No Cumple"} \end{array} \right\  \end{array} \right\ $	$EsfuerzosCompresión = \text{"No Cumple"}$
$EsfuerzosTracción :=$	$\left\  \begin{array}{l} \text{if }  f_{2t}  < f_{cs} \\ \quad \left\  \begin{array}{l} \text{"Cumple"} \end{array} \right\  \\ \text{else} \\ \quad \left\  \begin{array}{l} \text{"No Cumple"} \end{array} \right\  \end{array} \right\ $	$EsfuerzosTracción = \text{"Cumple"}$

Fuente: elaboración propia, empleando Mathcad Prime 7.0.0.0.

## Apéndice 2. Análisis bajo resistencia última por flexión

### Análisis bajo resistencia última por flexión

#### Ancho del alma

En el artículo 9.6.1.2 del ACI 318-14, establece que para una viga estáticamente determinada con el ala en tracción, en ancho del alma para el diseño será el menor entre:  $b_f$  y  $2 \cdot b_w$

$$\text{Ancho del alma} \quad b_n = 5 \text{ cm}$$

$$\text{Ancho del patín} \quad b_p = 12 \text{ cm}$$

$$b_w := \begin{cases} \text{if } b_p < 2 b_n \\ \quad \parallel b_p \\ \text{else} \\ \quad \parallel 2 b_n \end{cases} \quad b_w = 10 \text{ cm}$$

#### Ancho efectivo del ala

Artículo 6.3.2.1 del ACI 318-14, establece que será el menor entre  $8 \cdot t_f$ ,  $S_w/2$  y  $l_n/8$ .

$$S_w := 52.00 \text{ cm} \quad t_f = 5 \text{ cm} \quad b_w \text{ cm} = 10 \text{ cm}^2 \quad l_n := 380 \text{ cm}$$

$$b_f := \min \left( 16 t_f + b_w, S_w + b_w, \frac{1}{4} l_n + b_w \right) \quad b_f = 62 \text{ cm}$$

#### Cuantía de acero:

$$\text{Altura útil de la sección} \quad d_p := H - c_p = 11.09 \text{ cm}$$

$$\rho_p := \frac{A_p \cdot 4}{b_f \cdot d_p} \quad \rho_p = 0.0018$$

## Continuación del Apéndice 2

### Esfuerzo en el refuerzo presforzado

En el ACI 318-14 en el artículo 20.3.2.3.1 se da una ecuación con base en la compatibilidad de deformaciones para el cálculo del esfuerzo en el refuerzo presforzado.

**Primera condición:** Este esfuerzo es válido si todo el refuerzo se encuentra en la zona de tracción y si  $f_{se} > 0.5f_{pu}$ .

$$R = 0.15$$

$$f_{se} := (1 - R) \cdot f_{pi} = 10412.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Condición } f_{ps} := \begin{cases} \text{if } f_{se} > 0.5 f_{pu} \\ \quad \text{||} \\ \quad \text{||} \text{ "La ecuación para el cálculo de } f_{ps} \text{ es válida" } \\ \quad \text{||} \\ \text{else} \\ \quad \text{||} \\ \quad \text{||} \text{ "No cumple la condición" } \\ \quad \text{||} \end{cases}$$

$$\text{Condición } f_{ps} = \text{"La ecuación para el cálculo de } f_{ps} \text{ es válida"}$$

### Refuerzo de compresión

En el inciso (a) del mismo artículo se da la condición para no tomar en cuenta la influencia del refuerzo de compresión.

$$d' := r + \frac{D_p}{2}$$

$$\text{Refuerzo de compresión} := \begin{cases} \text{if } d' > 0.15 d_p \\ \quad \text{||} \\ \quad \text{||} \text{ "No se debe tomar en cuenta por lo que } \rho' \text{ debe ser igual a cero" } \\ \quad \text{||} \\ \text{else} \\ \quad \text{||} \\ \quad \text{||} \text{ "Se debe tomar en cuenta y la expresión debe ser mayor a 0.17" } \\ \quad \text{||} \end{cases}$$

$$\text{Refuerzo de compresión} = \text{"No se debe tomar en cuenta por lo que } \rho' \text{ debe ser igual a cero"}$$



## Continuación del Apéndice 2

$Sección := \begin{cases} \text{if } t_{fm} < t_f \\ \quad \parallel \text{ "Se comporta como una sección rectangular" } \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Se comporta como una sección T" } \end{cases}$

**Sección = "Se comporta como una sección rectangular"**

### Opción 2: Con la distancia medida desde la fibra extrema en compresión al eje neutro

Profundidad del bloque rectangular de esfuerzos  $a := \frac{4 A_p \cdot f_{psm}}{0.85 \cdot f'_{cl} \cdot b_f} \quad a = 1.7 \text{ cm}$

distancia medida desde la fibra extrema en compresión al eje neutro  $c := \frac{a}{\beta_1} \quad c = 2 \text{ cm}$

$Sección := \begin{cases} \text{if } c < t_f \\ \quad \parallel \text{ "Se comporta como una sección rectangular" } \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Se comporta como una sección T" } \end{cases}$

**Sección = "Se comporta como una sección rectangular"**

Ya que el comportamiento de la sección es como una sección rectangular se continúa con el procedimiento, de lo contrario se debe recalcar c para una sección T.

#### Cálculo de la resistencia nominal

$$M_n := 4 A_p \cdot f_{psm} \cdot \left( d_p - \frac{a}{2} \right) \quad M_n = 1929.53 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

#### Cálculo de la resistencia de Diseño

$$\phi M_n := 0.90 M_n \quad \phi M_n = 1736.58 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

#### Cálculo de la resistencia requerida

Efectos de la carga muerta  $CM := M_o + M_{bo} + M_l + M_{ac} \quad CM = 192.94 \text{ kg} \cdot \text{m}$

## Continuación del Apéndice 2

Efectos de la carga viva	$CV := M_L$	$CV = 148.23 \text{ kg} \cdot \text{m}$
Resistencia requerida	$M_u := 1.2 CM + 1.6 CV$	$M_u = 468.69 \text{ kg} \cdot \text{m}$
Condición :=	$\left\  \begin{array}{l} \text{if } M_u < \phi M_n \\ \quad \left\  \begin{array}{l} \text{"CUMPLE"} \\ \text{else} \\ \quad \left\  \text{"NO CUMPLE"} \end{array} \right. \end{array} \right\ $	Condición = "CUMPLE"

Fuente: elaboración propia, empleando Mathcad Prime 7.0.0.0.

### Apéndice 3. Análisis de cortante por fricción

Análisis de cortante por fricción		
Base de la sección que resiste la transferencia de cortante	$b_c := 12 \text{ cm}$	
Altura de la sección que resiste la transferencia de cortante	$h_c := 15 \text{ cm}$	
Resistencia especificada a la compresión del concreto	$f'_{cl} = 210 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	
Resistencia a la fluencia del acero de refuerzo	$f_y := 4900 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	
Diámetro del acero de refuerzo	$d_v := 6.20 \text{ mm}$	
Coefficiente para concreto de peso normal	$\lambda := 1.00$	
Coefficiente de fricción	$\mu := 0.6 \lambda$	$\mu = 0.6$
Cálculos efectuados		
Área de la sección de concreto que resiste la transferencia de cortante	$A_c := b_c \cdot h_c$	$A_c = 180 \text{ cm}^2$
Área de acero real	$A_{vr} := 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_v^2$	$A_{vr} = 0.6 \text{ cm}^2$

### Continuación del Apéndice 3

Carga muerta	$w_{CM} := w_o + w_{bo} + w_l + w_{ac}$	$w_{CM} = 156.2 \frac{kg}{m}$
Carga viva	$w_{CV} := w_L$	$w_{CV} = 120 \frac{kg}{m}$
Carga mayorada por unidad de longitud	$w_u := 1.2 w_{CM} + 1.6 w_{CV}$	$w_u = 379.44 \frac{kg}{m}$
<b>Cálculo de la resistencia requerida</b>		
Resistencia requerida	$V_u := \frac{w_u \cdot L}{2}$	$V_u = 730.42 \text{ kg}$
<b>Cálculo de la resistencia nominal con refuerzo requerido</b>		
Factor de reducción de resistencia	$\phi := 0.75$	
Área de acero requerida	$A_{vf} := \frac{V_u}{\phi \cdot f_y \cdot \mu}$	$A_{vf} = 0.33 \text{ cm}^2$
Resistencia nominal	$V_n := \mu \cdot A_{vf} \cdot f_y$	$V_n = 973.9 \text{ kg}$
El valor del cortante nominal no debe ser mayor al menor valor entre $0.2f_c A_c$ y $55A_c$		
	$V_{n\_perm} := \min \left( 0.2 \cdot f'_c \cdot A_c, 55 \frac{kg}{cm^2} A_c \right)$	$V_{n\_perm} = 7560 \text{ kg}$
<i>Cortantenominal</i>	$:= \begin{cases} \text{if } V_n < V_{n\_perm} \\ \quad \text{"El valor de } V_n \text{ sí cumple"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"El valor de } V_n \text{ no cumple"} \end{cases}$	
<i>Cortantenominal</i> = "El valor de $V_n$ sí cumple"		

### Continuación del Apéndice 3

**Cálculo de la resistencia nominal con refuerzo real**

Área de acero real  $A_{vf\_r} := \frac{\pi}{4} \cdot d_v^2 \cdot 2$   $A_{vf\_r} = 0.6 \text{ cm}^2$

Resistencia nominal real  $V_{n\_r} := \mu \cdot A_{vf\_r} \cdot f_y$   $V_{n\_r} = 1775.21 \text{ kg}$

El valor del cortante nominal no debe ser mayor al menor valor entre  $0.2f_c A_c$  y  $55A_c$

$V_{n\_perm} := \min\left(0.2 \cdot f'_c \cdot A_c, 55 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} A_c\right)$   $V_{n\_perm} = 7560 \text{ kg}$

$Cortantenominal := \begin{cases} \text{if } V_{n\_r} < V_{n\_perm} \\ \quad \text{“El valor de } V_{n\_r} \text{ sí cumple”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“El valor de } V_{n\_r} \text{ no cumple”} \end{cases}$

**$Cortantenominal = \text{“El valor de } V_{n\_r} \text{ sí cumple”}$**

Fuente: elaboración propia, empleando Mathcad Prime 7.0.0.0.

## Apéndice 4. Comparación de resultados

Comparación de resultados		
<u>Datos comunes a las dos losas</u>		
Entreeje	$E := 0.6 \text{ m}$	
Longitud entre apoyos	$L_t := 3.81 \text{ m}$	
Carga viva de ensayo	$C_v := 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$	
Carga muerta de ensayo	$C_m := \frac{(w_o + w_{bo} + w_l)}{E}$	$C_m = 240.33 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
Carga de acabados	$C_a := 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$	
Criterios de aceptación según NTG 41084 h1		
Carga total de ensayo	$T_t := 1.2 (C_m + C_a) + 1.6 C_v$	$T_t = 632.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
Carga real para aplicar	$T_a := T_t - C_m$	$T_a = 392.07 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
Deflexión después de 24 h de carga	$\Delta_1 := \frac{L_t}{360}$	$\Delta_1 = 1.06 \text{ cm}$
Deflexión residual 24h después de la remoción de la carga	$\Delta_r := \frac{\Delta_1}{4}$	$\Delta_r = 2.65 \text{ mm}$
Deflexión final después de la aplicación de $T_t$	$\Delta := \frac{L_t}{300}$	$\Delta = 12.7 \text{ mm}$

Fuente: elaboración propia, empleando Mathcad Prime 7.0.0.0.

## ANEXOS

### Anexo 1. Cantidad de bovedillas a ensayar según cantidad fabricada

**Cuadro 1: Cantidad de bovedillas a ensayar según cantidad fabricada**

Cantidad fabricada	Bovedilla Ensayo a flexión Muestra mínima
De 1 a 10,000 unidades	3
De 10,001 a 100,000 unidades	5
Mayor a 100,000 unidades	3 unidades por cada 50,000 unidades fabricada

Fuente: COGUANOR. *NTG 41084 h1 Método de ensayo vigueta y bovedilla para sistemas de losas prefabricadas de concreto.* p. 19.

### Anexo 2. Cortante nominal máximo a través del plano de cortante supuesto.

**Tabla 22.9.4.4. —  $V_n$  máximo a través del plano de cortante supuesto**

Condición	Máximo $V_n$		
Concreto de peso normal construido monolíticamente o colocado contra concreto endurecido e intencionalmente rugoso con una amplitud total de 1/4 de pulg.	El menor de (a), (b), y (c)	$0.2f'_cA_c$	(a)
		$(480 + 0.08f'_c)A_c$	(b)
		$1600A_c$	(c)
Otros casos	El menor de (d) y (e)	$0.2f'_cA_c$	(d)
		$800A_c$	(e)

Fuente: ACI. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318SUS-14.* p. 406.

Anexo 3. **Coefficiente de fricción.**

**Tabla 22.9.4.2 — Coeficientes de fricción**

Estado de la superficie de contacto	Coeficiente de fricción $\mu$ [1]	
Concreto construido monolíticamente	1.4 $\lambda$	(a)
Concreto colocado contra concreto endurecido que está limpio, libre de lechada, e intencionalmente rugoso con una amplitud total de aproximadamente 1/4 de pulg.	1.0 $\lambda$	(b)
Concreto colocado contra concreto endurecido que está limpio, libre de lechada, y que no se hizo intencionalmente rugoso	0.6 $\lambda$	(c)
Concreto construido contra acero estructural que está tal como fue laminado, sin pintar, y con el cortante transferido a través de la superficie de contacto por medio de pernos con cabeza o por medio de barras o alambres corrugados soldados.	0.7 $\lambda$	(d)

[1]  $\lambda = 1.0$  para concreto de peso normal,  $\lambda = 0.75$  para concreto totalmente ligero. En los otros casos,  $\lambda$  se debe calcular con base en las proporciones volumétricas de agregado de peso normal y ligero como se indica en 19.2.4, pero no debe exceder 0.85.

Fuente: ACI. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318SUS-14*. p. 405.