



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

**DISEÑO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE
MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC**

Daniel Alexander Herrera Velásquez
Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, octubre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE
MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DANIEL ALEXANDER HERRERA VELÁSQUEZ

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordoñez Hernández
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:

DISEÑO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 16 de octubre de 2012.



Daniel Alexander Herrera Velásquez

Guatemala 18 de septiembre de 2013

Ingeniero
Ronald Estuardo Galindo Cabrera
Coordinador Área de Estructuras
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero:

Cumpliendo con lo resuelto con la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación: **DISEÑO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC**, presentado por el estudiante: Daniel Alexander Herrera Velásquez.

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


Mario Rodolfo Corzo Ávila
Ingeniero Civil Colegiado No. 2089

Mario Rodolfo Corzo Ávila
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 2089



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



Guatemala,
9 de octubre de 2013

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación DISEÑO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Daniel Alexander Herrera Velásquez quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
Jefe del Departamento de Estructuras



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
ESTRUCTURAS
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y del Jefe del Departamento de Estructuras, Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera, al trabajo de graduación del estudiante Daniel Alexander Herrera Velásquez, titulado **DISEÑO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Hugo Leonel Montenegro Franco
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre de 2013.

/bbdeb.

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



Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.747-2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC**, presentado por el estudiante universitario: **Daniel Alexander Herrera Velásquez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, octubre de 2013



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Jehová	Mi Dios y Dios de mis padres, quien me ha acompañado en cada momento de mi vida, proveyendo de sus bendiciones a diario.
Mi hermana	Esther Nohemí Herrera Velásquez, por ser un gran ejemplo a seguir en todo aspecto de la vida. Que Dios la tenga en su gloria.
Mis padres	Humberto Herrera y Margarita Velásquez, por su amor, comprensión y apoyo a lo largo de estos años.
Mi hermano	Gerson David Herrera Velásquez, por todo su apoyo y compañía en cada etapa de mi vida.
Mis abuelos	Aníbal Velásquez y Juanita Rodríguez, por su amor demostrado desde siempre y el apoyo recibido en todo momento.
Mis familiares	Tíos y primos de ambas familias.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrir sus puertas y darme la oportunidad de tener una formación académica y profesional.
Facultad de Ingeniería	Por facilitarme los conocimientos adquiridos a lo largo de estos años de formación.
Licenciado Mynor Adán Silvestre	Por la confianza y apoyo incondicional recibido de su persona.
Mi asesor	Ingeniero Mario Corzo, por su amistad, ayuda y constante supervisión en mi formación académica y trabajo de graduación.
Señor Fabio Sánchez	Por su ayuda en la realización de este proyecto, compartir sus conocimientos y brindar una amistad sincera.
Mis amigos y compañeros de la Facultad.	Especialmente a los compañeros de la Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones, por su ayuda, apoyo y lo más valioso, su amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE PUENTES	1
1.1. Clasificación de puentes por su función	2
1.1.1. Puentes vehiculares	2
1.1.2. Acueductos	2
1.1.3. Puente peatonal.....	3
1.2. Clasificación de puentes por los materiales de construcción.....	4
1.2.1. Puentes de madera	4
1.2.2. Puentes de piedra o mampostería	6
1.2.3. Puentes de concreto armado.....	7
1.2.4. Puentes de acero estructural	8
1.3. Clasificación de puentes por el tipo de estructura	9
1.3.1. Puente en arco	9
1.3.2. Puente viga.....	10
1.3.3. Puentes colgantes	11
1.3.4. Puentes atirantados.....	12
1.3.5. Puente tipo hamaca.....	14
1.3.6. Pasarelas.....	15

2.	CARACTERÍSTICA DE LOS MATERIALES A UTILIZAR EN EL PROYECTO DE PUENTE PEATONAL A BASE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC	17
2.1.	Ferrocemento.....	17
2.1.1.	Materiales usados en el ferrocemento	18
2.1.1.1.	Acero de armazón	18
2.1.1.2.	Armadura de refuerzo	19
2.1.1.3.	Aditivos.....	20
2.1.1.4.	Mortero	20
2.1.1.5.	Proporciones de mezcla	21
2.1.1.6.	Agregados.....	21
2.1.2.	Ventajas del ferrocemento.....	21
2.1.3.	Desventajas del ferrocemento.....	22
2.2.	Electromalla soldada	22
2.3.	Tubería PVC	24
2.3.1.	Policloruro de vinilo PVC	24
2.3.1.1.	Aplicaciones del PVC	24
2.3.2.	Tubería	25
3.	TEORÍA DE ARCOS.....	29
3.1.	Arcos	29
3.2.	Partes de un arco.....	31
3.3.	Tipología estructural de arcos	32
3.4.	Comportamiento estructural de un arco	33
3.5.	Cargas.....	34
3.6.	Analogía de columna.....	40

4.	DISEÑO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC.....	43
4.1.	Características geométricas	43
4.2.	Diseño de módulos de ferrocemento	45
4.2.1.	Cargas distribuidas	45
4.2.1.1.	Carga muerta.....	46
4.2.1.2.	Carga viva.....	47
4.2.2.	Diseño de refuerzo de acero.....	48
4.2.3.	Diseño de nervios	50
4.2.3.1.	Carga viva.....	51
4.2.3.2.	Chequeo en la deformación de los nervios	52
4.3.	Análisis estructural en arcos.....	56
4.3.1.	Deflexión en la clave del arco	56
4.3.2.	Cálculo de cargas distribuidas	57
4.3.3.	Cálculo de reacciones	59
4.3.3.1.	Cálculo de reacciones máximas en apoyos	60
4.3.3.2.	Cálculo de momentos en la clave y riñones.....	62
4.3.3.3.	Cálculo de reacciones y fuerza normal en riñones	64
4.3.3.4.	Cálculo de reacciones, horizontal y verticales “l” y “r”	64
4.3.3.5.	Cálculo en la fuerza normal “N” a la sección transversal del arco	65
4.3.3.6.	Cálculo del acero de refuerzo	66
4.3.4.	Diseño de cimiento	68
4.3.4.1.	Diseño de tensor.....	70

5.	COMPARACIÓN DE ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
5.1.	Generalidades	73
5.2.	Cargas.....	73
5.2.1.	Carga viva	73
5.2.2.	Carga muerta	74
5.3.	Comparación en el diseño y resultados de los módulos de ferrocemento	74
5.4.	Análisis de resultados en arcos.....	79
5.5.	Comportamiento de los tensores en los apoyos	89
5.6.	Resistencia de la tubería PVC adicionada al mortero de relleno (grout).....	93
5.7.	Comportamiento general de la estructura	98
	CONCLUSIONES.....	99
	RECOMENDACIONES	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	103
	ANEXOS.....	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Acueducto de Pinula, ciudad de Guatemala	3
2.	Puente de madera usado por los primitivos	5
3.	Puente de piedra labrada	7
4.	Sección transversal de puente viga de alma llena	9
5.	Puente en arco	10
6.	Puente en arco con tablero superior	10
7.	Sección transversal de puente viga	11
8.	Puente colgante	12
9.	Puente atirantado	13
10.	Puente peatonal tipo hamaca.....	14
11.	Armadura de una pasarela de acero	15
12.	Tipos de mallas utilizadas en el ferrocemento	20
13.	Línea de transmisión de cargas en un arco	30
14.	Partes del arco	31
15.	Tipos de arcos.....	32
16.	Comparación entre viga rectangular y un arco.....	33
17.	Carga distribuida en la directriz del arco (g).....	35
18.	Carga distribuida por metro lineal de luz (g').....	35
19.	Componente horizontal de la carga distribuida	36
20.	Esquema de posición de carga sobre un arco	37
21.	Esquema de posición de carga sobre un arco	40
22.	Resistencia del arco ante las cargas actuantes	41
23.	Nomenclatura usada en la geometría de los arcos	43

24.	Geometría del puente peatonal en arco.....	45
25.	Módulo de ferrocemento	46
26.	Momento máximo en viga simplemente apoyada.....	48
27.	Peso muerto soportado por los nervios	51
28.	Peso vivo soportado por los nervios	52
29.	Dimensiones de nervios en módulos de ferrocemento	54
30.	División en tramos equivalentes a un cuarto de la luz	56
31.	Vista frontal del puente y ancho tributario.....	58
32.	Reacciones provocadas por carga distribuida	59
33.	Cargas por metro lineal en la directriz	61
34.	Sección del arco	67
35.	Reacciones en el arco	70
36.	Módulo de ferrocemento	75
37.	Ensayo de módulo de ferrocemento	75
38.	Carga versus deformación en modulo de ferrocemento	77
39.	Efecto de Poisson en elementos sometidos a compresión.....	80
40.	Diagrama del puente en planta y posición de deformómetros	81
41.	Ensayo de puente peatonal a carga de diseño.....	82
42.	Gráficas del comportamiento de los arcos en el punto de la clave ante la carga de diseño.....	84
43.	Gráficas del comportamiento en el punto de la clave de los arcos con un 60 por ciento adicional a la carga de diseño	87
44.	Ensayo de puente peatonal con el 60 por ciento de carga adicional a la carga de diseño.....	88
45.	Gráficas de deformómetros en apoyos ante la carga de diseño	90
46.	Gráficas de deformómetros en apoyos ante el 60 por ciento adicional a la carga de diseño	91
47.	Ensayo a compresión de testigos	96
48.	Cilindro deformado después de ensayo a carga axial	97

TABLAS

I.	Propiedades de tubería PVC 160 psi	26
II.	Propiedades de tubería PVC 250 psi	26
III.	Propiedades de tubería de alcantarillado y sistemas pluviales	27
IV.	Momentos y reacciones para arcos biarticulados	38
V.	Momentos y reacciones para arcos empotrados.....	39
VI.	Cálculo de área de acero en módulo de ferrocemento	49
VII.	Resumen de resultados de momentos y reacciones en el arco	66
VIII.	Datos de carga versus deformación, obtenidos del ensayo del módulo de ferrocemento	76
IX.	Propiedades físicas de los módulos de ferrocemento	79
X.	Datos obtenidos del ensayo del puente peatonal ante la carga de diseño	83
XI.	Datos obtenidos del ensayo aplicando 60 por ciento de carga adicional a la carga de diseño.....	86
XII.	Datos y resultados de ensayo de cilindro de grout 1	93
XIII.	Datos y resultados de ensayo de cilindro de grout 2.....	94
XIV.	Datos y resultados de ensayo de cilindro de grout y tubo 1	95
XV.	Datos y resultados de ensayo de cilindro de grout y tubo 2	95

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
α	Abscisa unitaria en función de las cargas parciales determinadas por su posición.
h	Altura de un elemento.
A_g	Área bruta de una sección de concreto.
A_{Smin}	Área de acero longitudinal mínimo a flexión
A_s	Área de refuerzo longitudinal no preesforzado a tracción.
A_{St}	Área total de refuerzo longitudinal.
b	Base de un elemento rectangular.
N	Carga axial sobre un elemento sometido a compresión.
P_u	Carga axial última debido a la combinación de cargas afectadas por factores de magnificación.
C_m	Carga muerta
w_m	Carga muerta uniformemente distribuida.
C_u	Carga última, usando factores de magnificación.
g	Carga uniformemente distribuida por metro de directriz.
g'	Carga uniformemente distribuida por metro de luz.
w	Carga uniformemente distribuida.
p	Carga viva mayorada.
w_v	Carga viva uniformemente distribuida.
C_v	Carga viva.

cm²	Centímetro cuadrado
cm	Centímetro.
U	Combinación de cargas afectadas por factores de amplificación.
Def_{max}	Deflexión máxima de un elemento rectangular sometido a cargas de servicio.
Def_{teórica}	Deflexión teórica, dada por análisis estructural.
D-1	Deformómetro 1
D-2	Deformómetro 2
D-3	Deformómetro 3
D-4	Deformómetro 4
D-5	Deformómetro 5
D-6	Deformómetro 6
D-7	Deformómetro 7
D-8	Deformómetro 8
D	Diámetro
φ	Diámetro
x	Eje de las abscisas en plano cartesiano.
y	Eje de las ordenadas en plano cartesiano.
V_{max}	Esfuerzo cortante que actúa sobre un elemento.
σ	Esfuerzo; magnitud de fuerza aplicada perpendicularmente a una superficie.
λ	Factor de modificación del concreto
kg	Kilogramo
π	La razón matemática entre la longitud de una circunferencia y su diámetro.
lb	Libra.
L	Luz libre medida entre los apoyos del arco.
θ	Medida angular.

Mpa	Megapascales.
m	metro
mm	Milímetro
Ec	Módulo de elasticidad del concreto
I	Momento de inercia de la sección de un elemento respecto al eje que pasa por su centroide.
M	Momento flector
M_c	Momento flector en la clave del arco
M_{L/4}	Momento flector en los riñones del arco.
M_{max}	Momento máximo producido en un elemento simplemente apoyado con carga aplicada.
Mu	Momento último debido a la combinación de cargas afectadas por factores de magnificación.
d	Peralte efectivo de un elemento estructural, distancia desde la fibra extrema en compresión al centroide del refuerzo longitudinal en tensión.
a	Profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos en el concreto.
Pulg	Pulgada.
H	Reacción horizontal.
Vr	Reacción vertical en el riñón derecho del arco.
VI	Reacción vertical en el riñón izquierdo del arco.
V	Reacción vertical.
“	Representación de pulgada en sistema inglés de medidas.
fy	Resistencia especificada a fluencia del acero.
f'c	Resistencia especificada a la compresión del concreto.

V_c	Resistencia nominal al cortante proporcionada por el concreto.
Vol	Volumen.

GLOSARIO

Aceras	Camino para peatones que se sitúa a los costados de una calle o calzada.
Acueductos	Es un sistema estructural aéreo que permite transportar agua desde una captación natural, hasta un punto donde se requiera su uso por medio de gravedad
Antifunicular	Contrario a la forma geométrica que tiene una cuerda al estar apoyada únicamente en sus extremos formando una parábola.
ACI	Código del Instituto Americano del Concreto.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Asociación Americana para la evaluación y estandarización de materiales)
Bóvedas	Obra de forma curvada que sirve para cubrir el espacio comprendido entre dos muros o una serie de pilares alineados
Catenaria	Curva que describe una cadena suspendida por sus extremos, sometida a la fuerza de gravedad.

Celosilla	Estructura reticular de barras rectas interconectadas en nudos formando triángulos planos o pirámides tridimensionales.
Cercos	Marco que delimita terrenos.
Cisternas	Depósito subterráneo que se utiliza para recoger y guardar agua.
Clave del arco	Punto más alto del arco, también llamado vértice.
Colapso	Llevar una estructura más allá de su capacidad resistente y por lo tanto falla.
Contraflecha	Ligera curvatura, convexa, que se realiza en una viga o cercha para compensar cualquier flecha prevista cuando soporte un peso.
Corrosión	Deterioro de un elemento a causa de reacciones químicas
Cúpula	Cubierta con forma de media esfera o aproximadamente semiesférica que cierra un espacio de planta central poligonal o circular:
Depresión	Zona del relieve terrestre situada a una altura inferior que las regiones circundantes.

Diafragma	Sistema estructural que permite la disipación de esfuerzos por cada elemento hasta llegar al suelo.
Directriz	Línea, superficie o volumen que delimita la dirección de un arco
Dovelas	Elemento constructivo que conforma un arco y que puede ser de diferentes materiales, como ladrillo o piedra.
Eje neutro	Fibra de un elemento donde su deformación por compresión y tracción es cero.
Estribos	Elementos sobre los que apoya el arco y resiste las reacciones horizontales y verticales.
Fluencia del acero	Punto donde comienza el periodo de deformación plástica del acero.
Grietas	Abertura larga y estrecha producto de la separación de dos materiales.
Grout	Mortero especializado para el relleno de espacios.
Hondonadas	Pequeña parte de la superficie terrestre de un área que se encuentra en un nivel más bajo que la mayor parte de la tierra que la rodea.

Losetas	Unidad de superficie de un elemento estructural, por lo general es relativamente delgada en relación a su superficie.
Mampostería	Obra de albañilería hecha con piedras pequeñas o ladrillos, unidos con mortero.
Módulos	estructura o bloque de piezas que en una construcción, se ubican en cantidad a fin de hacerla más sencilla, regular y fácil de ensamblar.
Mortero	Material formada por una mezcla de cemento, agua y agregado fino.
Nervios	Pequeñas vigas que permiten dar rigidez y estabilidad al módulo de ferrocemento y además contribuye a su resistencia a esfuerzos de flexión.
Pasta cementante	Pasta compuesta por agua y cemento que trabaja como pegamento entre materiales de construcción.
Péndolas	Cualquiera de las varillas verticales que sostienen el piso de un puente colgante o de otras obras.
Peralte	Distancia desde la fibra extrema a compresión hasta el centroide del refuerzo a tensión en una viga
Perfilería	Conjunto de perfiles utilizados en la construcción ya sea de acero estructural o perfileríaPVC.

Pilas	Estribos u obras de cimentación.
Plastificante	Aditivos que suavizan los materiales normalmente mezclas de plástico u hormigón
PVC	Policloruro de vinilo.
Rampas	Plano o superficie inclinada dispuesta para subir o bajar.
Recubrimiento	Protección de la intemperie del refuerzo de un elemento estructural.
Revenimiento	Prueba de laboratorio que indica el nivel de consistencia o capacidad de flujo del concreto
Rigidez	Capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones y/o desplazamientos.
Riñones del arco	Parte del arco situado entre los apoyos y la clave del arco.
Tamiz	Utensilio que se usa para separar las partes finas de las gruesas de algún material y que está formado por una tela metálica o rejilla tupida que está sujeta a un aro.

Tensor	Elemento estructural encargado de absorber esfuerzos de tracción.
Termoplástico	Plástico sujeto a variaciones en sus propiedades debido a la temperatura que se le aplica.
Testigos	Muestras de concreto de forma cilíndrica o cúbica que son ensayadas para conocer sus propiedades mecánicas.
Yuxtapuesto	Cosa que está puesta junto con otra sin superposición ni nexos o elementos de relación.
Zanjas	Excavación lineal que se realiza sobre un terreno.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la propuesta de un puente peatonal en arco a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC, desde la descripción de cada uno de sus materiales constitutivos, hasta el análisis y diseño estructural del mismo, llevándolo a la construcción y realizando los ensayos respectivos para conocer las propiedades mecánicas de sus componentes estructurales, y comportamiento general de la estructura ante la simulación de carga viva aplicada.

Se presenta también, el análisis de la comparación de resultados tanto del diseño teórico como resultados del ensayo y comportamiento real del puente peatonal ante la carga de diseño y un ensayo más a la estructura como sistema, en el cual se aplicó un sesenta por ciento de carga adicional a la carga de diseño, obteniendo los resultados esperados y aceptables.

En el anexo del presente trabajo, se adjunta el informe completo aprobado por el Sección de Estructuras y el Centro de investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, detallando el procedimiento constructivo del puente, procedimiento de ensayo y análisis de resultados.

OBJETIVOS

General

Proveer una propuesta del análisis y diseño estructural de un puente peatonal en base a módulos de ferrocemento y tubería PVC, como alternativa a los sistemas constructivos tradicionales en la construcción de puentes de uso peatonal.

Específicos

1. Dar parámetros de diseño para el estudio de los módulos de ferrocemento y de los arcos.
2. Diseñar los módulos de ferrocemento y los arcos, que forman la estructura principal del puente peatonal.
3. Evaluar cada uno de los elementos estructurales del puente, por medio de ensayos de laboratorio.
4. Analizar el comportamiento del sistema estructural por medio de los resultados obtenidos de los diferentes ensayos.
5. Determinar la capacidad de resistencia a compresión que la tubería PVC le adhiere al grout o mortero de relleno.

INTRODUCCIÓN

Un puente peatonal es una estructura que permite salvar los obstáculos que interrumpen el paso fluido y constante de personas en cualquier lugar.

La importancia del diseño y construcción de un puente peatonal en arco a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC, radica en la necesidad que muchas comunidades tienen de salvar un obstáculo o una depresión y por razones socioeconómicas no cuentan con los recursos necesarios para la realización de un puente tradicional y en consecuencia opten por utilizar una vía alterna o muchas veces utilicen una estructura improvisada e insegura.

El diseño del puente peatonal permite a las personas de muchos lugares marginados de Guatemala, contar con una estructura eficiente, estable, segura duradera y económica que les permita mejorar sus actividades de locomoción diarias.

Por esta razón, por medio de este trabajo se presenta la propuesta de un puente peatonal en arco a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC y en el cual incluye una descripción de sus materiales y elementos constitutivos, el diseño estructural de éstos y un análisis detallado del comportamiento general de la estructura por medio de los resultados de los ensayos realizados a la misma.

1. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE PUENTES

Un puente es una obra de arte que tiene como función salvar obstáculos como depresiones del relieve topográfico, cruces a desnivel y corrientes de agua y que además garantice una circulación continua y fluida de vehículos, peatones, ductos de cualquier servicio, agua, entre otros.

Los puentes se pueden clasificar principalmente en tres categorías según:

- Su uso
 - Vehiculares
 - Acueductos
 - Peatonales

- Sus materiales de construcción
 - Madera
 - Piedra o mampostería
 - Concreto armado
 - Acero estructural

- Su tipología
 - Puente en arco
 - Puente viga
 - Puente colgante
 - Puente atirantado
 - Puente tipo hamaca
 - Pasarelas.

1.1. Clasificación de puentes por su función

Siendo un puente una estructura que permite salvar un accidente geográfico o cualquier otro obstáculo físico, su diseño se basa principalmente en la función que a éste se le dé, por lo tanto los puentes se pueden clasificar según su función en:

1.1.1. Puentes vehiculares

Son estructuras que unen dos carreteras separadas por un obstáculo y su función es hacer eficiente el tráfico automovilístico.

Los puentes vehiculares son construidos de diversidad de materiales, especialmente concreto armado debido a su durabilidad, rigidez y economía, así como por la relativa facilidad con que se puede lograr un agradable aspecto arquitectónico, aunque también son muy comunes los puentes de acero estructural o la combinación de ambos materiales.

1.1.2. Acueductos

Es un sistema estructural aéreo que permite transportar agua en forma fluida y constante desde una captación natural, hasta un punto donde se requiera su uso por medio de gravedad.

Este sistema fue muy eficiente en la antigüedad y la mayor parte de su recorrido se hacía por medio de canales, por lo general cubiertos, que se construían por las laderas de los montes, siguiendo una pendiente pequeña de aproximadamente el 0.004 por ciento.

Figura 1. **Acueducto de Pinula, ciudad de Guatemala**



Fuente: Zona 13, Guatemala.

1.1.3. Puente peatonal

Un puente peatonal es la estructura que permite salvar obstáculos o atravesar depresiones, como barrancos, zanjas, hondonadas y ríos en lugares que se utilizan para el tránsito de personas y animales, facilitando el traslado de un lugar a otro, y evitando las rutas alternas lejanas e inadecuadas, evitando de esa manera fatiga y tiempo.

En muchos lugares de Guatemala se pueden observar diversidad de puentes peatonales y de distintos materiales constructivos y tipologías, siendo los más comunes los puentes de concreto armado o estructuras de acero en poblaciones con un nivel económico medio, también destacan los puentes colgantes o tipo hamaca, puentes de madera, puentes de mampostería entre otros, pero en muchos lugares con un nivel económico bajo, se puede observar prácticas improvisadas para atravesar algún obstáculo, conformándose muchas

veces con colocar el tronco de un árbol de tamaño adecuado sobre alguna depresión, arriesgando su seguridad y se exponiéndose a accidentes.

Los puentes los podemos clasificar por los materiales de construcción y por el tipo de estructura.

1.2. Clasificación de puentes por los materiales de construcción

A lo largo de los años en la construcción de puentes se han usado diversidad de materiales, tanto para obras permanentes como temporales y los cuales pueden ser clasificados de la siguiente manera:

1.2.1. Puentes de madera

La madera es uno de los primeros materiales que se utilizó en la construcción debido a su precedencia directamente de la naturaleza. Es muy seguro el hombre utilizó el tronco de un árbol en algún momento para poder saltar algún obstáculo dando directamente a éste la función de un puente peatonal.

La construcción de un puente de madera tiene como ventaja sobre un puente de piedra o mampostería, facilidad y rapidez de ejecución, dando como resultado una estructura económicamente factible. Es por esto que los primeros puentes construidos fueron de madera, habiéndose construido gran cantidad de estructuras de este material a lo largo de la historia.

Una desventaja de los puentes de madera es su poca durabilidad, por lo tanto los puentes de piedra están en una categoría superior a los de madera,

haciendo de estos una estructura provisional mientras se cuentan con los recursos suficientes para realizar una estructura durable.

Los dos problemas básicos de durabilidad de los puentes de madera son los siguientes:

- Este material se deteriora con el paso del tiempo si no se cuida adecuadamente.
- Cuando el objetivo de la estructura es salvar un río, se tiene problemas con las avenidas o crecidas máximas pues muchos puentes de madera han sufrido colapso por causa de debilidad ante las corrientes del río.

Figura 2. **Puente de madera usado por los primitivos**



Fuente: CLAROS, Ricardo;MERUVIA, Pedro. Apoyo didáctico en la enseñanza-aprendizaje de la asignatura de puentes. p. 26.

1.2.2. Puentes de piedra o mampostería

La piedra es también un material que se puede encontrar en la naturaleza sin modificar sus características, basta simplemente con crear formas para construir una estructura. También se puede utilizar en lugar de la piedra, ladrillos para crear un sistema de arcos con dovelas yuxtapuestas para la construcción de un puente.

Las estructuras de mampostería o piedra sirven para salvar luces considerables y son creadas a partir de arcos formados por dovelas colocadas adecuadamente para crear bóvedas y cúpulas. Por esta razón los puentes de piedra que salvan ríos tienen una bóveda como estructura resistente.

El puente de piedra es el puente histórico por excelencia. Actualmente el arco de piedra como técnica para hacer puentes es solamente historia; ya no se construyen puentes de este tipo porque resultan poco prácticos en función del tiempo de construcción, salvo casos excepcionales en parques o lugares naturales protegidos, con una intención puramente paisajística, y muchos de ellos son de hormigón recubiertos de piedra.

La construcción de puentes de piedra no presenta problemas distintos a la de cualquier obra de su misma característica, siendo un sistema constructivo bastante simple, excepto la cimentación que debido al río presenta alguna singularidad en su construcción.

El sistema constructivo en piedra para puentes en arco, hicieron del puente una estructura única, durable y segura hasta la aparición de nuevos materiales como el acero y el concreto.

Figura 3. **Puente de piedra labrada**



Fuente: Aldea el Rancho, Aguacatán, Huehuetenango.

1.2.3. Puentes de concreto armado

El concreto armado se ha utilizado en puentes desde el año 1875 con la construcción de la pasarela de Chazelet, en París. Después de esto, el concreto armado se extendió rápidamente por toda Europa para diferentes propósitos dándose a conocer este material como tal en el año 1880 el arco de Düsseldorf, Alemania.

Fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial que se construyeron puentes de concreto armado, algunos de ellos de luz grande, pero rápidamente se impuso el concreto pretensado y los puentes de hormigón armado han quedado reducidos a las losas de pequeña luz.

1.2.4. Puentes de acero estructural

La construcción en general, obtuvo un avance significativo con la llegada del acero estructural, pues con este material se empezaron a ver cambios en la infraestructura de las ciudades alrededor del mundo, superando en dimensión las pequeñas edificaciones de concreto.

El primer puente de gran magnitud construido con una estructura principal de acero es el puente de San Luis sobre el río Mississippi Estados Unidos en el año 1874, con un soporte de tres arcos de 152 metros cada uno.

Los puentes de aradura de acero usan un conjunto de vigas transversales que permiten trasladar las cargas móviles y peso propio hacia los nodos de la armadura donde estas se descomponen en esfuerzos de compresión y tracción los cuales son disipados por cada uno de los elementos de la estructura hasta llegar a los apoyos donde se distribuirán las fuerzas resultantes.

Al igual que en concreto, en acero también se diseñan puentes viga, en los cuales las cargas móviles que son soportadas por el tablero se transportan hacia las vigas de acero de alma llena o en celosilla y éstas a su vez descansan en dos o más apoyos según el diseño.

La ventaja en la utilización del acero, radica en la elasticidad y ductilidad del sistema, permitiendo a los elementos soportar grandes deformaciones y recuperarse a su estado inicial sin sufrir fallas que afecten al sistema estructural.

Figura 4. **Sección transversal de puente viga de alma llena**



Fuente: <http://www.eadic.com/blog/index.php/2013/04/08/puentes-acero-puentes-viga-vigas-de-alma-llena-armadas>. Consulta: agosto de 2013

1.3. Clasificación de puentes por el tipo de estructura

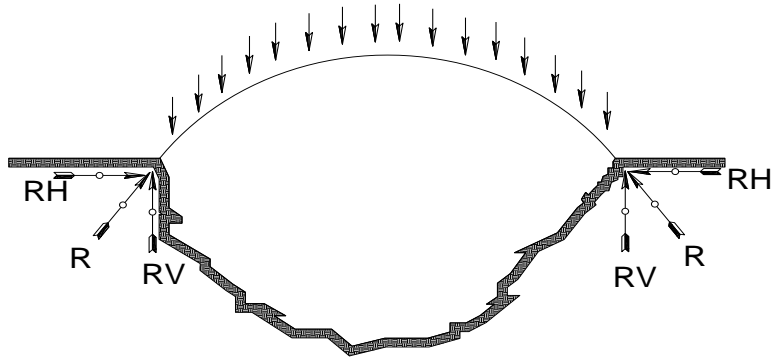
Según su tipología, los puentes pueden clasificarse de la siguiente manera:

1.3.1. Puente en arco

Es un puente cuya estructura principal es un arco que forma una bóveda y cuenta con apoyos en cada extremo de la luz los cuales tienen la función de resistir todas las cargas aplicadas a lo largo de toda su trayectoria

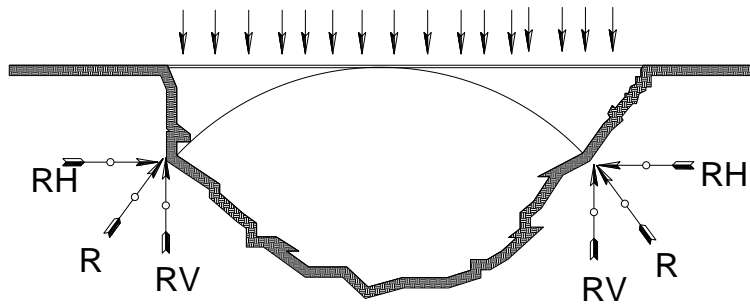
Estos puentes trabajan transfiriendo tanto el peso propio como las sobrecargas hacia los apoyos mediante la compresión del arco donde se descomponen los esfuerzos en un empuje vertical y uno horizontal, por lo tanto el terreno de cimentación debe ser capaz de resistir tales esfuerzos.

Figura 5. **Puente en arco**



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

Figura 6. **Puente en arco con tablero superior**



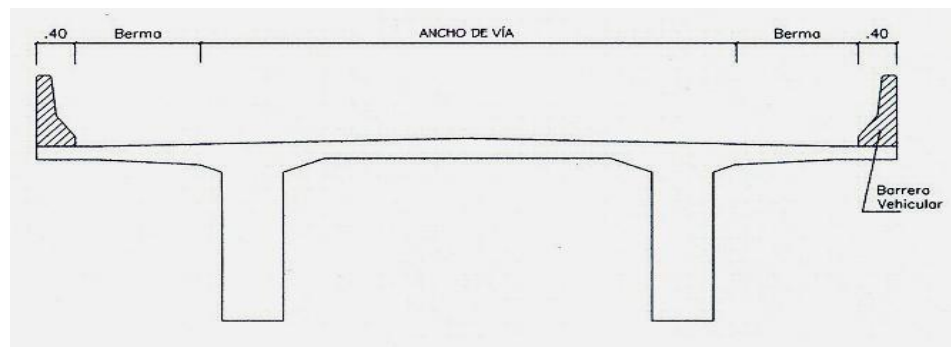
Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

1.3.2. **Puente viga**

Son puentes cuya estructura esta soportada principalmente por vigas como su nombre lo indica, es decir piezas horizontales rectas apoyadas en dos puntos de las cuales se aprovecha su resistencia a esfuerzos de flexión. La

resistencia de las vigas viene dada por su forma destacando que el peralte debe ser mayor a la base logrando de este modo aumentar momento de inercia.

Figura 7. **Sección transversal de puente viga**



Fuente: RODRÍGUEZ, Arturo. Puentes con AASHTO LRFD 2007, p. 3.

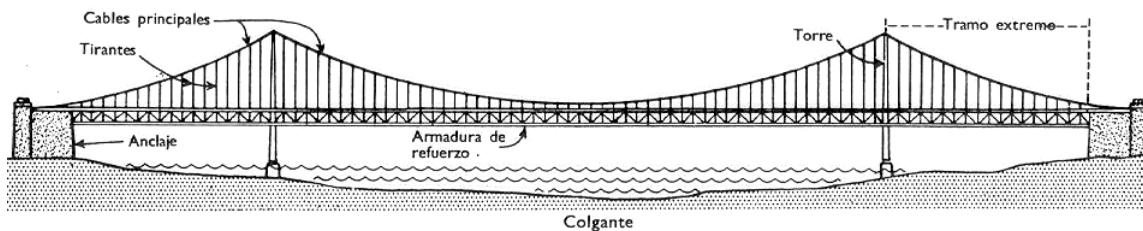
1.3.3. **Puentes colgantes**

Este tipo de puentes, presenta como característica principal que su estructura se basa en cables al igual que los puentes atirantados. Por esta razón muchos de los puentes de grandes luces que actualmente se construyen son colgantes o atirantados. La utilización del cable en este tipo de puentes se debe a tres razones fundamentales:

- El cable es un elemento que trabaja exclusivamente a tracción, por lo que se aprovecha al máximo su capacidad.
- Por su gran flexibilidad puede deformarse transversalmente sin que aparezcan flexiones y permite utilizar en su sección toda su capacidad de resistencia.

- El cable está formado por muchos hilos y cordones lo que permite hacer cables de gran diámetro en puentes de grandes luces.
- Por lo que se refiere a los puentes colgantes en concreto su estructura está formada por los cables principales que se fijan en los extremos del vano a salvar y tienen la flecha necesaria para soportar a través de un mecanismo de tracción pura las cargas que actúan sobre él.

Figura 8. **Puente colgante**



Fuente: CLAROS, Ricardo y Meruvia, Pedro, Apoyo didáctico en la enseñanza-aprendizaje de la asignatura de puentes. p. 2-9.

1.3.4. **Puentes atirantados**

Sus elementos fundamentales son los tirantes, siendo éstos cables rectos que atirantan o tensan el tablero proporcionándole una serie de apoyos intermedios más o menos rígidos.

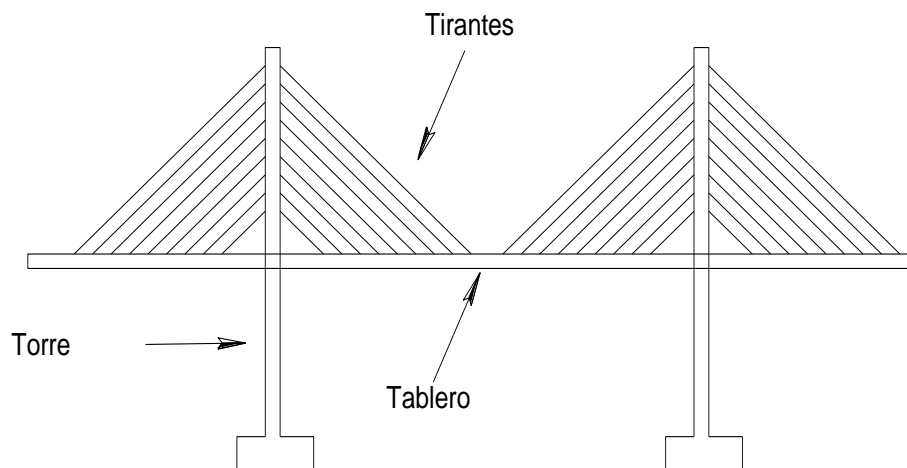
Además de los tirantes son necesarias las torres para elevar el anclaje fijo de los tirantes de forma que introducen fuerzas verticales en el tablero para crear subapoyos.

El tablero es el segundo elemento resistente básico e interviene en el esquema resistiendo las componentes horizontales que transmiten los tirantes. Estas componentes generalmente se equilibran en el propio tablero porque su resultante en conjunto con la de la torre debe ser nula. Su sección transversal depende en gran medida de la disposición de los tirantes.

El tercer elemento resistente son las torres que pueden adoptar formas muy diversas. En caso de grandes puentes atirantados a ambos bordes del tablero las torres pueden ser análogas a los de los puentes colgantes (dos pilares verticales unidos entre sí por vigas horizontales o cruces de San Andrés).

Si los tirantes están contenidos en planos inclinados la solución clásica es la construcción de torres en forma de A de la cual caben diversas variantes.

Figura 9. **Puente atirantado**



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

1.3.5. Puente tipo hamaca

El sistema estructural de un puente tipo hamaca está formado por pilas en los extremos de las depresiones por atravesar, sobre las cuales se pasan cables principales flexibles y de los que cuelgan péndolas, generalmente equiespaciadas y verticales. Estas péndolas sujetan las vigas de rigidez, sobre las cuales se dispone la plataforma de paso.

Los cables principales son los que soportan todo el peso de la pasarela y de las cargas que la solicitan.

Es aconsejable limitar puentes tipo hamacas de grandes luces a peatones pues cargas grandes podrían necesitar mayor número de cables en su diseño y construcción.

Figura 10. Puente peatonal tipo hamaca



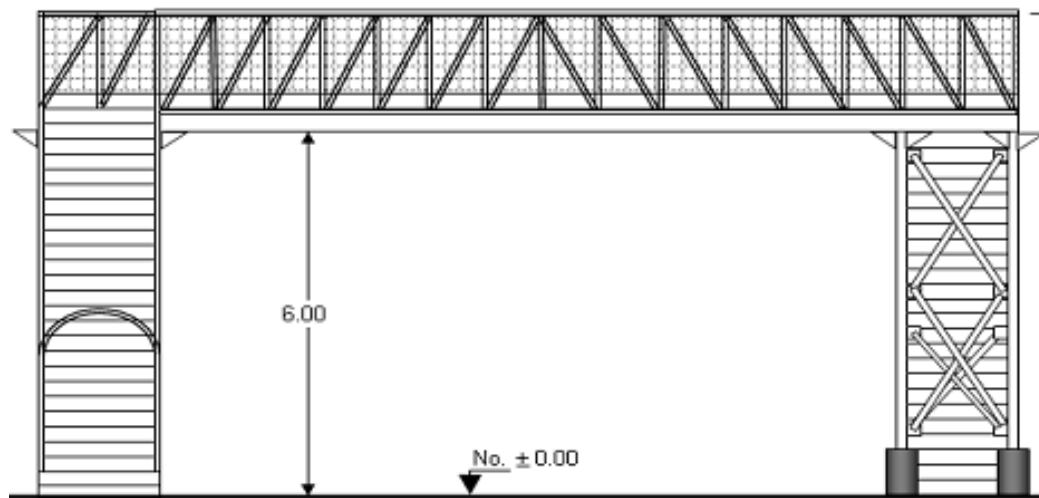
Fuente: Puente peatonal tipo hamaca, Chiantla, Huehuetenango.

1.3.6. Pasarelas

Las pasarelas son puentes peatonales ubicados en lugares estratégicos y permiten el traslado de personas sobre una vía de comunicación terrestre siendo éstas avenidas o calzadas por donde transitan gran número de vehículos, accediendo a ella por medio de un módulo de gradas o bien por rampas.

En Guatemala existe diversidad de pasarelas las cuales han sido construidas con concreto armado, estructuras de acero y también de la combinación de ambos materiales

Figura 11. Armadura de una pasarela de acero



Fuente: OVANDO, Edwin. Diseño y cálculo de una pasarela de metal. fig. 10 p. 12.

2. CARACTERÍSTICA DE LOS MATERIALES A UTILIZAR EN EL PROYECTO DE PUENTE PEATONAL A BASE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC

El puente peatonal en arco a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC, se diseña y construye con aprovechando las características de los siguientes materiales:

2.1. Ferrocemento

El ferrocemento es una variante del concreto armado en el cual el refuerzo está distribuido en toda el área del elemento, embebido en un mortero compuesto por agregado fino y una pasta cementante y exhibe un comportamiento diferente al concreto reforzado convencional, tanto en resistencia, en deformación y aplicación.

El ferrocemento aparece en 1849, siendo éste un material constituido básicamente por un refuerzo de malla de alambre y mortero de cemento hidráulico, resultando de esta combinación un material homogéneo resistente, rígido y con capacidad de oponerse a la corrosión, al fuego, al impacto, caracterizándose por su flexibilidad, elasticidad, ductilidad y sobre todo bajo costo económico¹.

Esta técnica se utilizó con mayor frecuencia a partir de 1941, construyendo pequeñas embarcaciones aprovechando sus propiedades

¹Alfaro, Luis Fernando Vásquez. Losas Plegadas de Ferrocemento. Guatemala : s.n., 1997

mecánicas y desde entonces el ferrocemento ha sido utilizado en la construcción de cúpulas y cubiertas de estadios.

El ferrocemento por su poco peso posee una elevada resistencia a la tensión y un buen comportamiento contra el agrietamiento. Esto significa que las estructuras delgadas de ferrocemento pueden ser relativamente ligeras, impermeables y resistentes al impacto.

Por su poco espesor, los elementos estructurales contruidos con ferrocemento son flexibles y fáciles de manipularse, evitando la mano de obra calificada. Algunas de sus aplicaciones pueden ser en viviendas individuales, techos de grandes luces, bóvedas, cúpulas, embarcaciones, silos, tanques de almacenamiento de granos, etc.

2.1.1. Materiales usados en el ferrocemento

Las propiedades mecánicas del ferrocemento como elemento estructural, son proporcionadas por cada uno de los materiales que lo conforman, siendo éstos:

2.1.1.1. Acero de armazón

Se emplea para dar forma a la estructura y es en esta donde se colocarán las capas de refuerzo. El armazón se caracteriza porque las varillas de acero se encuentran separadas uniformemente con un espaciamiento mayor de 30 centímetros y no son consideradas como parte del refuerzo estructural sino como varillas de separación de la malla de refuerzo.

2.1.1.2. Armadura de refuerzo

Es el refuerzo total formado por malla de refuerzo y el acero de armazón si éste no tiene una separación mayor a 7,5 centímetros. Las varillas que están espaciadas a mayor distancia no son consideradas como armadura de refuerzo, sino como acero de armazón.

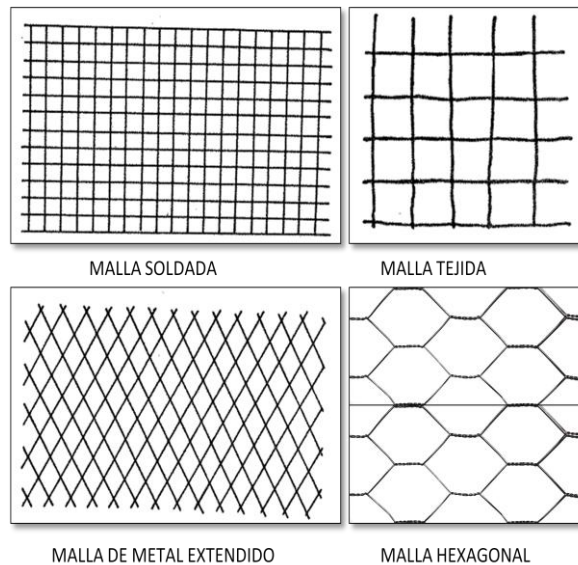
La función de la malla de alambre y las barras de refuerzo es proveer forma al mortero en estado fresco. El mortero endurecido no es capaz de resistir esfuerzos de tensión, torsión o flexión a los que la estructura está sometida a lo largo de su vida útil por lo que es necesario el refuerzo de malla de alambres para absorber estos esfuerzos y que a su vez reducen agrietamiento y fracturas.

El comportamiento mecánico del ferrocemento depende más del tipo, calidad, cantidad, orientación y propiedades de la malla de refuerzo, que de las propiedades del mortero.

Entre los sistemas de mallas de alambres más conocidos destacan las siguientes:

- Malla de alambre hexagonal
- Malla de alambre soldada
- Malla tejida
- Malla de metal desplegado o metal extendido

Figura 12. **Tipos de mallas utilizadas en el ferrocemento**



Fuente: elaboración propia, con programa Power Point.

2.1.1.3. Aditivos

Material que se le agrega al concreto en fresco para modificar sus propiedades mecánicas.

2.1.1.4. Mortero

El mortero usado en el ferrocemento es la mezcla de cemento hidráulico y agregado fino. El agregado consiste en arena bien graduada capaz de pasar el tamiz #8, sin embargo dependiendo de las características del refuerzo (abertura de la malla, espaciamiento de refuerzo, etc.) puede usarse un mortero que contenga grava pequeña.

El resultado de la reacción del cemento con el agua, es el endurecimiento del material. El agua debe ser potable y libre de componentes orgánicos y la relación agua-cemento varía entre el 0,35 y 0,55.

2.1.1.5. Proporciones de mezcla

El valor de resistencia de la mezcla para el ferrocemento $f_c=210$ kilogramos por centímetro cuadrado se logra con la proporción de la mezcla 1,5:2 y para una resistencia de 280 kilogramos por centímetro cuadrado la proporción debe ser 1:1.5

2.1.1.6. Agregados

Es el material inerte disperso en conjunto con la pasta de cemento el cual ocupa aproximadamente el 60 o 70 por ciento del volumen del mortero y para el mismo se requiere agregados de calidad para que el mortero sea fuerte, impermeable y trabajable para permitir la impregnación apropiada en la malla.

2.1.2. Ventajas del ferrocemento

La utilización del ferrocemento como técnica constructiva presenta muchas ventajas, entre las cuales podemos mencionar.

- No se necesita mano de obra especializada.
- No se necesitan herramientas ni equipo sofisticado.
- Se pueden armar las piezas en serie y repararse con facilidad.
- Es un material impermeable, lo que lo hace ideal en la construcción de cubiertas.

- Los materiales utilizados se pueden obtener con mucha facilidad, debido a la existencia en todas las regiones, como lo es el acero de refuerzo, la malla de gallinero, arena y cemento.
- Las piezas de ferrocemento son económicas
- El ferrocemento es buen material como aislante del sonido.
- El ferrocemento es resistente a la humedad
- Es resistente al fuego a determinadas temperaturas

2.1.3. Desventajas del ferrocemento

- Poco conocimiento del uso del ferrocemento en Guatemala.
- No es recomendable utilizarlo en lugares con climas muy cálidos o muy fríos.
- Limitación del uso en estructuras por falta de estudio de muchas propiedades mecánicas.

2.2. Electromalla soldada

La electromalla soldada está formada por varillas de acero lisas o corrugadas laminadas en frío alcanzando resistencias de grado 50 y grado 70 formando cuadros de 6 pulgadas por 6 pulgadas.

Las ventajas del uso de electromalla soldada son:

- Ahorro en material y mano de obra de hasta un 50 por ciento en pisos y 25 por ciento en losas.

- Ahorro en el tiempo de colocación de hasta 70 por ciento.
- Anclaje efectivo en el concreto por sus uniones sólidas.
- Reducción de desperdicios.
- Se corta fácilmente.

El uso de la electromalla soldada se puede extender a diferentes aplicaciones tales como:

- Cisternas
- Pavimentos
- Cercos
- Muros
- Aceras
- Losas
- Tubos de Concreto
- Muros de Contención
- Sistemas prefabricados

Para el proyecto de la construcción de un puente peatonal a base módulos de ferrocemento y tubería PVC se utilizará electromalla grado 70 lisa con un área efectiva de 0,884 centímetros cuadrados/metro y además cumple con las normas ASTM A-497 y ASTM-185, según lo especifica el proveedor y con las características siguientes:

- 6,00 metros de largo
- 2,35 metros de ancho
- Cuadros de 15 x 15 centímetros. (6 pulgadas x 6 pulgadas)
- Fabricada con varilla de acero Grado 70

2.3. Tubería PVC

Esta tubería está creada de un polímero con características descritas a continuación.

2.3.1. Policloruro de vinilo PVC

Es un material producto de la polimerización del cloruro de vinilo y la resina que resulta de esta polimerización es la más versátil entre los plásticos pues aparte su propiedad termoplástica puede crearse productos de consistencias rígidas y flexibles.

El PVC a demás de ser muy versátil es una resina muy compleja y difícil de formular y procesar, debido a una cantidad considerable de ingredientes y un balance adecuado para poder obtener un producto final deseado.

Fue en el año 1930 cuando B.F. GoodrichChemical descubre que el PVC absorbe plastificante y con un proceso adecuado de transformación se obtiene un producto flexible y con esto se inicia el desarrollo para este producto. Posteriormente con el empleo de estabilizadores más adecuados se hizo posible el desarrollo del mercado del PVC rígido; estos dos importantes desarrollos permitieron que el PVC se convirtiera en el termoplástico más versátil e importante del mercado mundial.

2.3.1.1. Aplicaciones del PVC

El Policloruro de vinilo puede usarse para la creación de diferentes productos y en gran variedad de campos como lo es en la fabricación de juguetes, automóviles, empaques, utensilios en medicina, electricidad,

electrónica, entre otras, destacando también su uso en la construcción con productos como:

- Aislamiento de cables y alambres
- Marcos de puertas y ventanas
- Ductos y tuberías
- Membranas de revestimiento y de tejados
- Tapices de paredes
- Suelo
- Losetas
- Perfilería

2.3.2. Tubería

La tubería de policloruro de vinilo tiene diversidad de aplicaciones en la construcción y la industria desde ductos para la protección de cables hasta tubería que transportan fluidos como líquidos o gases.

Existen varios tipos de tubería PVC; las que trabajan con líquidos bajo presión como el agua potable, líquidos por gravedad en redes pluviales, instalaciones sanitarias; para desechos sólidos, y tuberías para transportar y proteger el cableado eléctrico.

Los tubos de PVC tienen una longitud de 6 metros y de diferentes diámetros como lo muestra la tabla siguiente para tubería PVC que trabaja a presión:

Tabla I. **Propiedades de tubería PVC 160 psi**

Diámetro nominal		Diámetro Exterior		Espesor de pared (mm)		Diámetro Interior		Peso aproximado	
mm	Pulg.	Mm	pulg.	Mm	Pulg.	Mm	pulg.	kgs.	lbs.
18	¾	26.67	0.840	1.57	0.062	23.52	0.926	1.10	2.42
25	1	33.40	1.315	1.96	0.077	29.49	1.161	1.71	3.77
31	1 ¼	42.16	1.660	2.49	0.098	37.19	1.464	2.74	6.05
38	1 ½	48.26	1.900	2.84	0.112	42.57	1.676	3.59	7.91
50	2	60.33	2.375	3.56	0.140	53.21	2.095	5.61	12.36
62	2 ½	73.03	2.875	4.29	0.169	64.44	2.537	8.20	18.07
75	3	88.90	3.500	5.23	0.206	78.44	3.088	12.16	26.81
100	4	114.30	4.500	6.73	0.265	100.84	3.970	20.11	44.34
125	5	141.30	5.563	8.30	0.327	124.69	4.909	30.68	67.64
150	6	168.28	6.625	9.91	0.390	148.46	5.845	43.58	96.07
200	8	219.08	8.625	12.90	0.508	193.27	7.609	73.89	162.90
250	10	273.05	10.750	16.05	0.632	240.94	9.486	114.59	252.63
300	12	323.85	12.750	19.05	0.750	285.75	11.250	161.28	355.56

Fuente: AGUILAR, Pedro. Apuntes sobre el curso de Ingeniería Sanitaria 1. p. 61

Tabla II. **Propiedades de tubería PVC 250 psi**

Diámetro nominal		Diámetro Exterior		Espesor de pared (mm)		Diámetro Interior		Peso aproximado	
mm	Pulg.	Mm	pulg.	Mm	Pulg.	Mm	pulg.	kgs.	lbs.
18	¾	26.67	0.840	1.57	0.062	23.52	0.926	1.10	2.42
25	1	33.40	1.315	1.96	0.077	29.49	1.161	1.71	3.77
31	1 ¼	42.16	1.660	2.49	0.098	37.19	1.464	2.74	6.05
38	1 ½	48.26	1.900	2.84	0.112	42.57	1.676	3.59	7.91
50	2	60.33	2.375	3.56	0.140	53.21	2.095	5.61	12.36
62	2 ½	73.03	2.875	4.29	0.169	64.44	2.537	8.20	18.07
75	3	88.90	3.500	5.23	0.206	78.44	3.088	12.16	26.81
100	4	114.30	4.500	6.73	0.265	100.84	3.970	20.11	44.34
125	5	141.30	5.563	8.30	0.327	124.69	4.909	30.68	67.64
150	6	168.28	6.625	9.91	0.390	148.46	5.845	43.58	96.07
200	8	219.08	8.625	12.90	0.508	193.27	7.609	73.89	162.90
250	10	273.05	10.750	16.05	0.632	240.94	9.486	114.59	252.63
300	12	323.85	12.750	19.05	0.750	285.75	11.250	161.28	355.56

Fuente: AGUILAR, Pedro. Apuntes sobre el curso de Ingeniería Sanitaria 1. p. 62

Para tubería PVC de drenaje y sistema pluvial

Tabla III. **Propiedades de tubería de alcantarillado y sistemas pluviales**

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro Exterior (mm)	Diámetro Interior (mm)	Espesor de pared (mm)
4"	110	103,2	3,4
6"	160	152,0	4,0
8"	200	190,2	4,9
10"	250	237,6	6,2
12"	315	299,5	7,7
14"	355	337,6	8,7
16"	400	380,4	9,8
18"	450	428,0	11,0
20"	500	475,4	12,3
24"	630	599,2	15,4

Fuente: Catálogo de Válvulas y Termoplásticos Industriales, S.A de CV.

En la construcción del puente peatonal en arco a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC se usaron tubos de cuatro pulgadas de diámetro de uso pluvial y son los que permiten dar forma a la estructura en arco, aprovechar su resistencia a compresión para ser adicionada al grout o mortero de relleno y aprovechar la forma cerrada del tubo para ayudar al confinamiento del grout que fue colado dentro de los tubos.

El porcentaje de resistencia que la tubería proporciona al mortero de relleno, se evalúa en un ensayo de testigos de grout y luego se compara con otro ensayo donde los testigos son de tubería de PVC rellenos del mismo mortero de relleno.

3. TEORÍA DE ARCOS

Previo al análisis y diseño de un arco, se deben considerar aspectos importantes de su comportamiento ante cargas aplicadas, siendo éste el objetivo principal del estudio de la teoría de arcos.

3.1. Arcos

En la búsqueda de estructuras que permitan cubrir grandes luces sin apoyos intermedios y usando la cantidad mínima de materiales ha llevado al estudio de arcos como estructura, pues es un elemento con una trayectoria curva que permite minimizar o incluso eliminar los esfuerzos de tensión directa que actúan en la parte inferior del eje neutro si se compara con una viga rectangular.

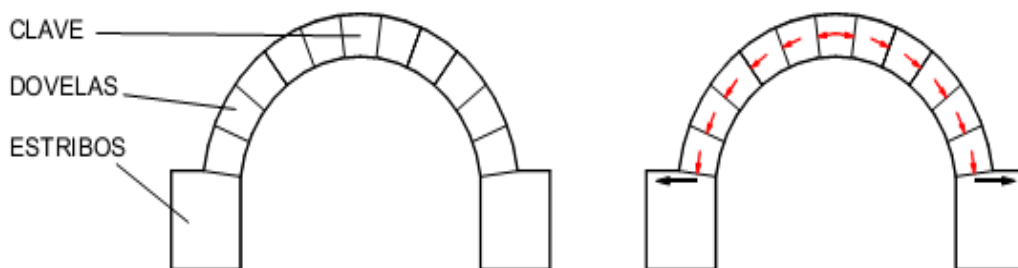
Por esta razón los arcos son una de las estructuras más utilizadas desde la antigüedad. Ello es debido a que su geometría es adecuada para soportar grandes cargas transversales y las transmiten a los apoyos en los extremos trabajando básicamente a compresión, con muy poco esfuerzo de flexión. Esto permite utilizar en su construcción, materiales que no soportan bien la tracción, como el hormigón en masa o sencillamente ladrillos o bloques de piedra independientes, adosados unos a otros.

Cuando el arco es de piedra o ladrillo, las piezas que lo forman reciben el nombre de dovelas, y los elementos sobre los que apoya el arco y reciben la carga del mismo se llaman estribos.

Los arcos pueden ser considerados elementos lineales al igual que una viga o una columna, pues su sección es relativamente pequeña en comparación a su longitud, sin embargo en el caso de los arcos, su eje neutro está curvado de manera que la línea de acción resultante de la aplicación de las cargas coincide con bastante aproximación al eje del elemento, y por consiguiente los momentos flectores y los esfuerzos cortantes transversales se reducen a un mínimo e incluso en algunas estructuras se eliminan.

Cada uno de los elementos de un arco trabaja a compresión, transmitiendo las fuerzas de dovela en dovela, provocando en los estribos una fuerza resultante con una componente horizontal y una vertical. La línea de transmisión de cargas desde la clave hasta la dovela del arranque, mantiene una forma antifunicular, es decir, la forma inversa que adoptaría un cable del que cuelgan cargas verticales. Si estas cargas estuvieran distribuidas uniformemente, adopta la forma de una catenaria, mientras que la línea de cargas en un arco forma una parábola.

Figura 13. **Línea de transmisión de cargas en un arco**



Fuente: GUARDIOLA, Ariana. SALOM, Luisa. Evolución histórica del arco como elemento estructural en arquitectura. p. 4.

3.2. Partes de un arco

Para el estudio de arcos de piedra, mampostería y concreto se utiliza la siguiente nomenclatura para describir cada una de sus partes.

Centro: se encuentra ubicado a la mitad de la luz o longitud total del arco

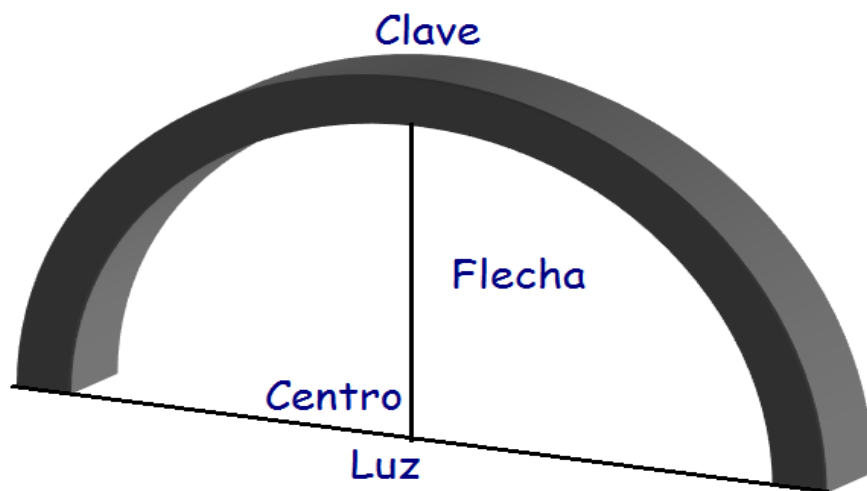
Flecha: altura del arco que se mide desde la línea en que arranca hasta el vértice.

Luz: anchura de un arco.

Semiluz: mitad de la anchura de un arco.

Clave: punto más alto del arco, también llamado vértice.

Figura 14. Partes del arco



Fuente: elaboración propia, con programa Power Point.

3.3. Tipología estructural de arcos

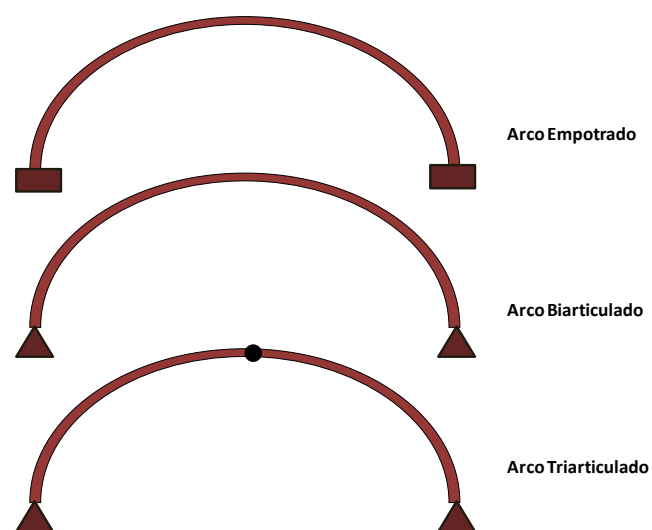
Según su función estructural, los arcos pueden ser:

Arcos empotrados: son los que están unidos rígidamente a sus apoyos o estribos, que son los encargados de resistir la fuerza resultante en los extremos de la estructura.

Arcos biarticulados: estos se caracterizan especialmente porque sus extremos se unen directamente a una rótula que descansa en cada uno de sus apoyos.

Arcos triarticulados: sus extremos están sustentados sobre rótulas al igual que los arcos biarticulados con la diferencia que éstos tienen una rótula adicional en la clave.

Figura 15. Tipos de arcos



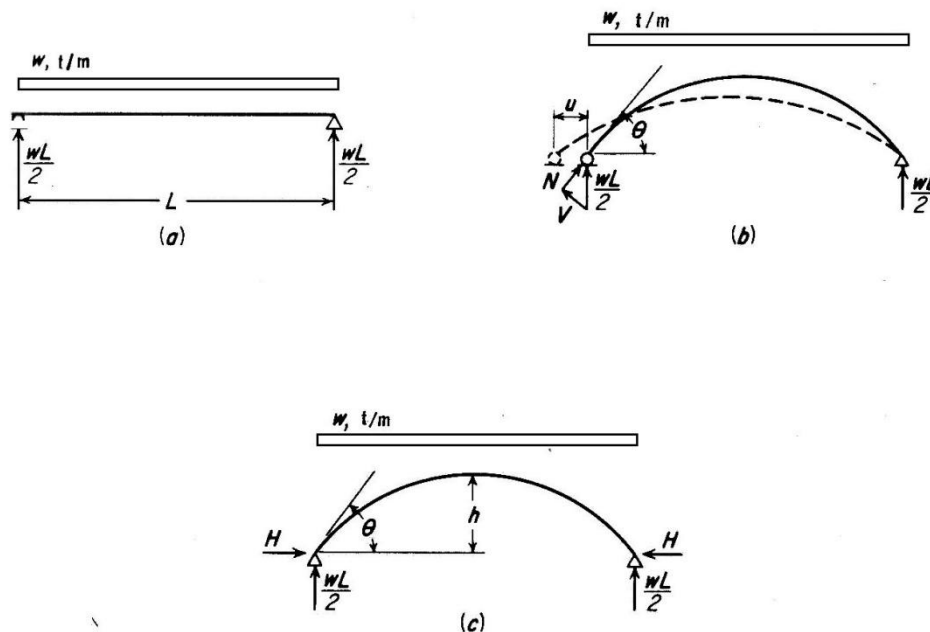
Fuente: elaboración propia, con programa Power Point.

3.4. Comportamiento estructural de un arco

Para conocer el comportamiento y la ventaja de un arco basta con estudiar un arco biarticulado y su comparación con una viga rectangular.

En la figura 16.a se observa una viga simplemente apoyada, con una carga uniformemente distribuida en la que su momento máximo es igual a $M_{\max} = wL^2/8$, un cortante máximo $V_{\max} = wL/2$ y un esfuerzo axial $N = 0$. Si la viga es de forma curva, como sucede en la figura 16.b, el valor de M_{\max} se mantendrá como en la viga rectangular, pero el esfuerzo cortante en el apoyo se reducirá al valor $V_{\max} = (wL/2)\cos\theta$, y además aparecerá ahora un esfuerzo axial en los apoyos $N = (wL/2)\sin\theta$.

Figura 16. Comparación entre viga rectangular y un arco



Fuente: WINTER, George; Arthur H. Nilson. Proyecto de estructuras de hormigón. p. 505.

Cuando la viga curva se encuentra bajo las solicitaciones de las cargas correspondientes, ésta tenderá a enderezarse a causa de la flexión, provocando que sus fibras superiores se compriman y las inferiores se extiendan. Este efecto produce un desplazamiento de los extremos del arco aumentando la luz del mismo como se observa en la figura 16.b. Para conservar la luz original en el arco con apoyos inmóviles (figura 16.c), habrá que aplicar una reacción H, con lo que se obtendrá:

$$M_{\max} = \frac{wL^2}{8} - Hh$$

$$V_{\max} = \left(\frac{wL}{2}\right) \cos\theta - H \operatorname{sen}\theta$$

$$N = \left(\frac{wL}{2}\right) \operatorname{sen}\theta + H\cos\theta$$

De lo anterior se comprueba que, en comparación con la viga simplemente apoyada, el arco presenta una disminución considerable en su momento flector y esfuerzo cortante máximo, pero además aparece una carga axial de compresión N adicional, el cual no existía en la viga.

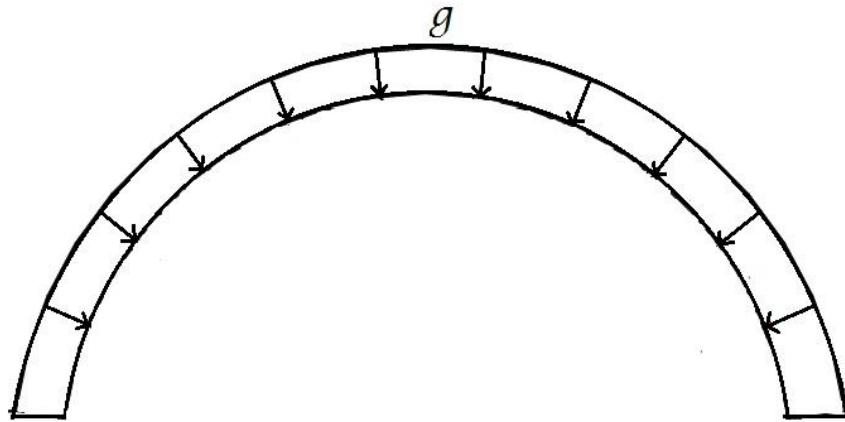
3.5. Cargas

En un arco las cargas que actúan son las mismas que en cualquier estructura, pero las más comunes que se utilizan para el diseño estructural son la carga viva que hace referencia a las sobrecargas de uso, no permanentes de la estructura y carga muerta o cargas permanentes en las cuales también incluye el peso propio de los elementos estructurales. El Código del Instituto Americano de Concreto ACI 318 del 2008 especifica hacer un mayoreo de cargas con la siguiente combinación:

$$U = 1,4C_m + 1,7C_v$$

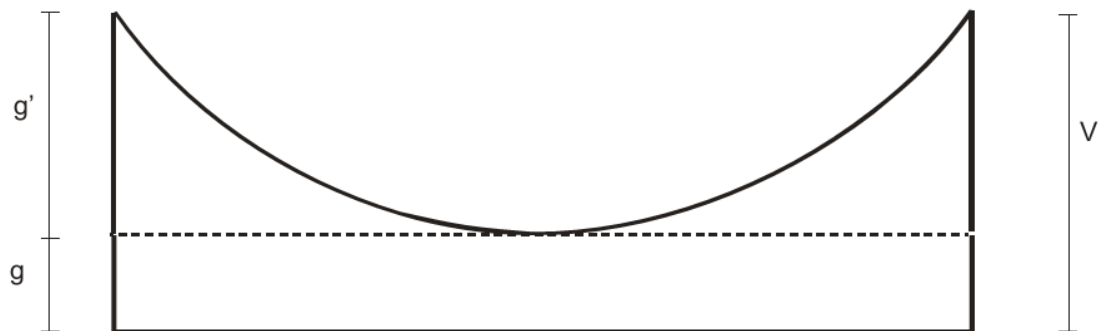
En la cubierta, la carga permanente suele distribuirse de forma casi uniforme a lo largo de la directriz (vea figura 17), y la carga por metro lineal de luz se distribuirá, por tanto en la forma representada por la figura 18.

Figura 17. **Carga distribuida en la directriz del arco (g)**



Fuente: elaboración propia, con programa Power Point.

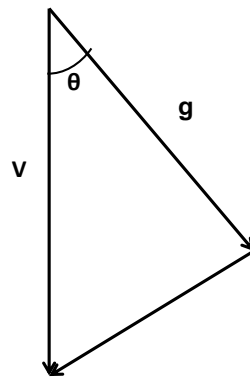
Figura 18. **Carga distribuida por metro lineal de luz (g')**



Fuente: WINTER, George; Arthur H. Nilson. Proyecto de estructuras de hormigón. p. 528.

Para encontrar las reacciones en los extremos del arco se dividirá la distribución anterior en una parte constante (g) y en una parte variable con magnitud máxima en el arranque (g'), la cual se deduce a partir de una semejanza de triángulos, así:

Figura 19. **Componente horizontal de la carga distribuida**

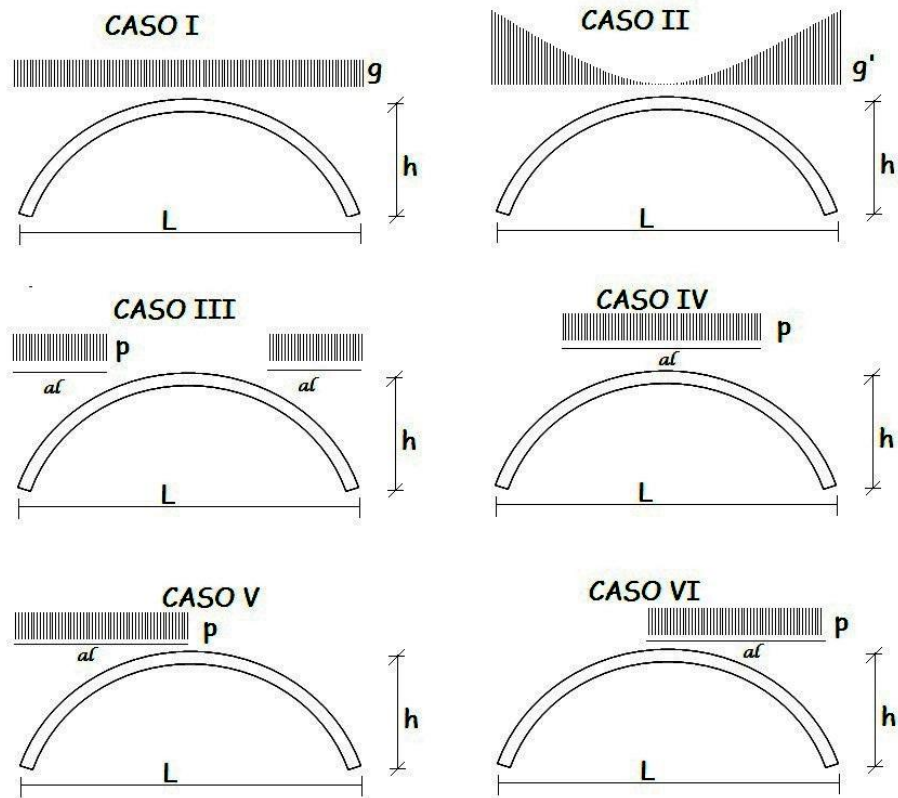


Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

$$V = g + g'$$
$$g + g' = \frac{g}{\cos\theta}$$
$$g' = \frac{g}{\cos\theta} - g$$

Con la obtención de estos datos se puede encontrar las reacciones y momentos con ayuda de la tabla IV y tabla V para cada uno de los casos de distribución de carga mostrados a continuación.

Figura 20. Esquema de posición de carga sobre un arco



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

En las tablas IV y V, se incluyen las fórmulas necesarias para estudiar la influencia de las cargas parciales, la posición de éstas viene determinada por la abscisa unitaria $\alpha = a/l$, según se representa en los esquemas de los arcos. En la figura 21 aparecen las posiciones de las cargas y sus valores de α , que conducen a los máximos momentos flectores tanto en la clave como en los puntos situados en los cuartos de la luz y en los arranques del arco.

Tabla IV. Momentos y reacciones para arcos biarticulados

	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Caso V	Caso VI
R_l	$\frac{gl}{2}$	$\frac{g'l}{6}$	pal	$\frac{pl}{2}(1-2\alpha)$	$\frac{pal}{2}(2-\alpha)$	$\frac{pa^2l}{2}$
R_r	$\frac{gl}{2}$	$\frac{g'l}{6}$	pal	$\frac{pl}{2}(1-2\alpha)$	$\frac{pa^2l}{2}$	$\frac{pal}{2}(2-\alpha)$
H	$\frac{gl^2}{8h}$	$\frac{g'l^2}{42h}$	$\frac{pl^2}{8h}\alpha^2(2\alpha^3 - 5\alpha^2 + 5)$	$\frac{-pl^2}{8h}(2\alpha^5 - 5\alpha^4 + 5\alpha^3 - 1)$	$\frac{pl^2}{16h}\alpha^2(2\alpha^3 - 5\alpha^2 + 5)$	$\frac{pl^2}{16h}\alpha^2(2\alpha^3 - 5\alpha^2 + 5)$
M_c	No existe	$-\frac{g'l^2}{338}$	$\frac{-pl^2}{8}\alpha^2(2\alpha^3 - 5\alpha^2 + 1)$	$\frac{pl^2}{8}\alpha^2(2\alpha^3 - 5\alpha^2 + 1)$
$M_{1/4}$	No existe	$\frac{g'l^2}{234}$	$\frac{-pl^2}{64}(6\alpha^5 - 15\alpha^4 + 23\alpha^3 - 16\alpha + 2)$	$\frac{-pl^2}{64}\alpha^2(6\alpha^3 - 15\alpha^2 + 7)$

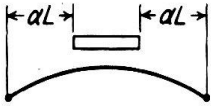
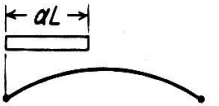
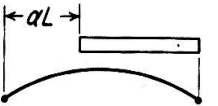
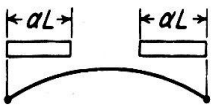
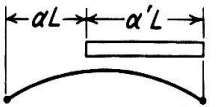
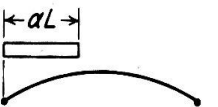
Fuente: WINTER, George; Arthur H. Nilson. Proyecto de estructuras de hormigón. p.526.

Tabla V. Momentos y reacciones para arcos empotrados

	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Caso V	Caso VI
R_i	$\frac{gl}{2}$	$\frac{g'l}{6}$	pal	$\frac{pl}{2}(1-2\alpha)$	$\frac{pl}{2}\alpha(\alpha^3-2\alpha^2+2)$	$\frac{pl}{2}(1+\alpha)$ $\frac{pl}{2}(1-\alpha)^3$
R_r	$\frac{gl}{2}$	$\frac{g'l}{6}$	pal	$\frac{pl}{2}(1-2\alpha)$	$\frac{pl}{2}\alpha^3(2-\alpha)$	$\frac{pl}{2}(1-2\alpha^3+\alpha^4)$
H	$\frac{gl^2}{8h}$	$\frac{gl^2}{56h}$	$\frac{pl^2}{4h}\alpha^3(6\alpha^2-15\alpha+10)$	$\frac{-pl^2}{8h}(12\alpha^5-30\alpha^4+20\alpha^3-1)$	$\frac{pl^2}{8h}\alpha^3(6\alpha^2-15\alpha+10)$	$\frac{pl^2}{8h}(1-\alpha)^3(6\alpha^2+3\alpha+1)$
$M_{i,s}$	No existe	$\frac{-g'l^2}{210}$	$\frac{pl^2}{2}\alpha^2(1-\alpha)^2(1-2\alpha)$	$\frac{pl^2}{2}\alpha^2(1-\alpha)^2(1-2\alpha)$	$\frac{pl^2}{2}\alpha^2(1-\alpha)^3$	$\frac{pl^2}{2}\alpha^2(1-\alpha)^3$
$M_{r,s}$	No existe	$\frac{-g'l^2}{210}$	$\frac{pl^2}{2}\alpha^2(1-\alpha)^2(1-2\alpha)$	$\frac{pl^2}{2}\alpha^2(1-2\alpha)$	$\frac{pl^2}{2}\alpha^3(1-\alpha)^2$	$\frac{pl^2}{2}\alpha^3(1-\alpha)^2$
M_c	No existe	$\frac{-g'l^2}{560}$	$\frac{pl^2}{4}\alpha^3(1-2\alpha)$	$\frac{pl^2}{4}\alpha^3(1-2\alpha)$	$\frac{pl^2}{8}\alpha^3(1-2\alpha)$ $\frac{pl^2}{8}\alpha^3(1-2\alpha)$	$\frac{pl^2}{8}\alpha^3(1-2\alpha)$ $\frac{pl^2}{8}\alpha^3(1-2\alpha)$

Fuente: WINTER, George; Arthur H. Nilson. Proyecto de estructuras de hormigón. p. 527.

Figura 21. Esquema de posición de carga sobre un arco

	Clave	Riñón izquierdo	Arranque izquierdo
Momentos positivos	 <p>Arco biarticulado $\alpha = 0,350$ Empotrado $\alpha = 0,375$</p>	 <p>Arco biarticulado $\alpha = 0,425$ Empotrado $\alpha = 0,400$</p>	 <p>Empotrado $\alpha = 0,40$</p>
Momentos negativos	 <p>Arco biarticulado $\alpha = 0,350$ Empotrado $\alpha = 0,375$</p>	 <p>Arco biarticulado $\alpha' = 0,575$ Empotrado $\alpha = 0,400$</p>	 <p>Empotrado $\alpha = 0,40$</p>

Fuente: WINTER, George; Arthur H. Nilson. Proyecto de estructuras de hormigón. p. 528

3.6. Analogía de columna

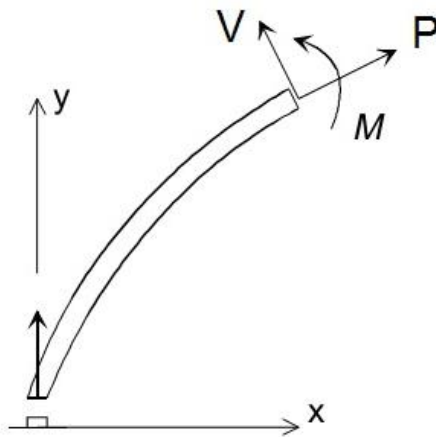
La analogía de la columna brinda un método sencillo e intuitivo para el cálculo de carga axial y momento flector en un arco y con éstos se determina el área de acero requerido para el correcto desempeño de la estructura.

Esta analogía parte de la suposición de estudiar un arco infinitamente rígido soportando carga distribuida, la cual se va descomponiendo en la directriz del arco en una fuerza axial, una fuerza cortante y un momento flector. Esto permite considerar el arco como una columna empotrada en su base, que se encuentra resistiendo las mismas fuerzas que actúan en el arco.

Tanto las fuerzas como momentos actuantes en cualquier parte del arco, se calculan como anteriormente se observó en las tablas IV y V dependiendo

del caso de combinación de cargas y tipo de arco en estudio, tomando como crítico el mayor de los resultados obtenidos.

Figura 22. **Resistencia del arco ante las cargas actuantes**



Fuente: CELIGÜETA, Juan Tomás. Curso de Análisis Estructura. p. 217.

Conociendo las reacciones y momentos en el arco, se calcula el área de acero requerida con los diferentes métodos utilizados en el estudio de columnas.

Para el caso del diseño de los arcos del puente peatonal en arco a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC, el diseño de la columna se efectúa con las condiciones citadas en el capítulo 10.3.6.1 del Código ACI 318-08, debido a que la sección del los arcos es pequeña comparada con la sección de columnas diseñadas en construcciones de mayores dimensiones y por lo tanto mayores cargas aplicadas.

4. DISEÑO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC

Se realiza el análisis y diseño estructural del puente peatonal en arco a base de los módulos de ferrocemento y tubería PVC.

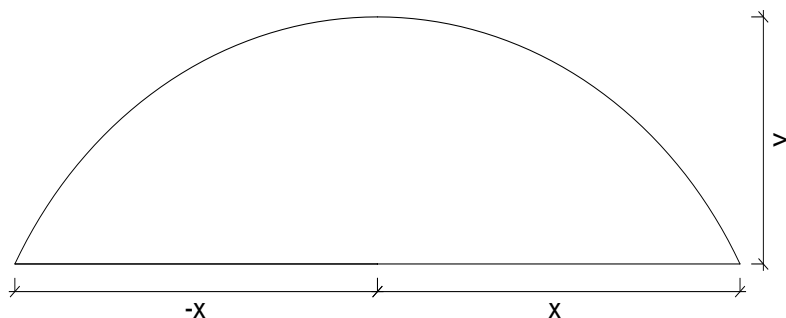
4.1. Características geométricas

El Puente peatonal en arco a base módulos de ferrocemento y tubería PVC está formado por cuatro arcos paralelos (vea figura 24), los arcos inferiores, son los que soportarán directamente los módulos de ferrocemento por donde se han de transportar las personas, que se designan como cargas de servicio; la geometría de los arcos se desarrollan con la ecuación general de la parábola:

:

$$y = ax^2 + b$$

Figura 23. Nomenclatura usada en la geometría de los arcos



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

Para arco superior con contra flecha 1,80m y 6 metros de luz

Si $x=0$, $y=1,8$

$$1,8 = a(0)^2 + b$$

$$b = 1,8$$

Si $x=3$, $y=0$

$$0 = a(3)^2 + 1,8$$

$$a = -0,2$$

$$y = -0,2x^2 + 1,8$$

X	Y
-3,0	0,0
0,0	1,8
3,0	0,0

Para arco inferior con contra flecha 1,80m y 6 metros de luz

Si $x=0$, $y=0,9$

$$0,9 = a(0)^2 + b$$

$$b = 0,9$$

Si $x=3$, $y=0$

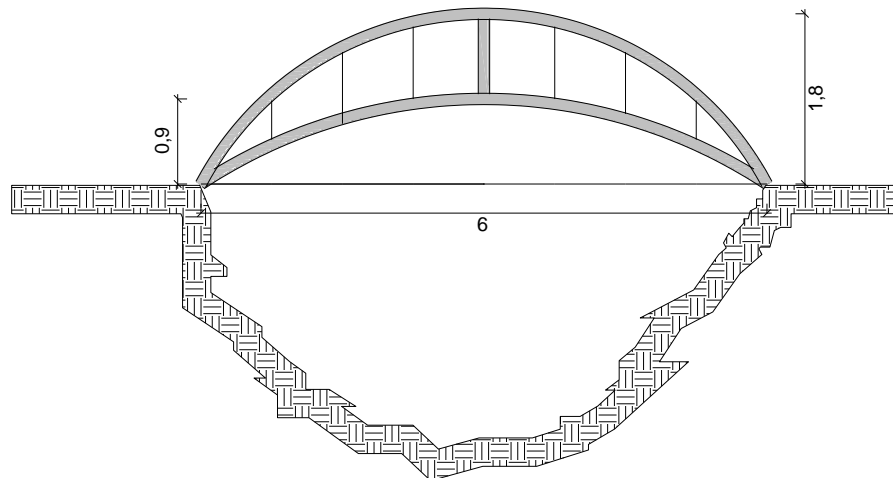
$$0 = a(3)^2 + 0,9$$

$$a = -0,1$$

$$y = -0,1x^2 + 0,9$$

X	Y
-3,0	0,0
0,0	0,9
3,0	0,0

Figura 24. **Geometría del puente peatonal en arco**



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

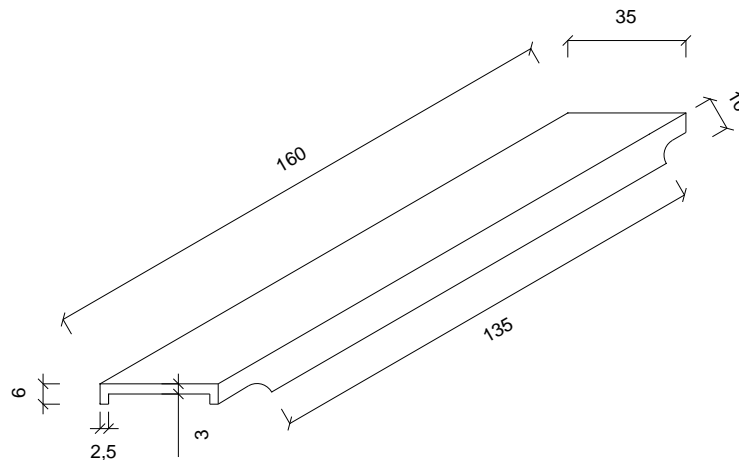
4.2. **Diseño de módulos de ferrocemento**

El diseño de los módulos de ferrocemento, se basa en el diseño de losas por medio del método de franja unitaria.

4.2.1. **Cargas distribuidas**

Se realiza el análisis estructural, tomando en cuenta las cargas aplicadas directamente sobre el módulo de ferrocemento, siendo éstas la carga viva o cargas móviles que provienen directamente de los peatones y la carga muerta, del peso propio de la estructura.

Figura 25. **Módulo de ferrocemento**



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

Según AASHTO en su artículo 3.6.1.6, los puentes exclusivamente para tráfico peatonal y/o ciclista se deberán diseñar para una sobrecarga de $4,1 \times 10^{-3}$ megapascales (Mpa), equivalente a 418 kilogramos por metro cuadrado.

Carga viva= 418 kilogramos por metro cuadrado

4.2.1.1. **Carga muerta**

La carga distribuida tomando en cuenta el peso del módulo de ferrocemento y la encontramos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Peso} &= \text{Volumen} * \text{Peso Especifico} \\ \text{Vol} &= 1,6 * 0,35 * ,03 + 2(0,07 * 0,025 * 1,6) \\ \text{Vol} &= 0,024\text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso} = 0,024\text{m}^3 * 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso} = 57,6 \text{ kg}$$

Para 1,6 m de longitud del módulo de ferrocemento, tenemos que:

$$w_m = \frac{57,6 \text{ kg}}{1,6 \text{ m}} = 36 \text{ kg/m}$$

4.2.1.2. Carga viva

Es la carga móvil y es la carga para la cual deben ser diseñados los módulos de ferrocemento, AASHTO indica en su sección 3.6.1.6 que la carga de diseño de un puente peatonal debe de ser:

$$\text{Carga Viva} = 418 \text{ kg/m}^2$$

El peso soportado por todo el módulo será:

$$\text{Peso Vivo} = 418 * 1,6\text{m} * 0,35\text{m} = 234 \text{ kg}$$

Si el peso anterior lo distribuimos en la longitud de 1.6 m del módulo obtendremos la siguiente carga distribuida viva

$$w_v = \frac{234 \text{ kg}}{1.6 \text{ m}} = 146 \text{ kg/m}$$

4.2.2. Diseño de refuerzo de acero

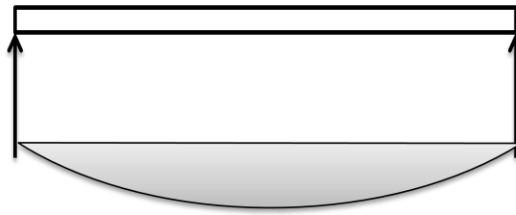
La carga última, es la combinación de carga viva y muerta aplicando los factores de mayorqueo indica el Código ACI 318-08 Apéndice C 9.2.2

$$C_u = 1,7C_v + 1,4C_m$$

$$C_u = 1,7(146) + 1,4(36) = 298,6 \text{ kg/m}$$

Cálculo de momentos para viga simplemente apoyada

Figura 26. **Momento máximo en viga simplemente apoyada**



$$M_{max} = \frac{wl^2}{8}$$

Fuente: elaboración propia, con programa Power Point.

$$M = \frac{wl^2}{8}$$

$$M = \frac{(298,6 \text{ kg/m})(1,6\text{m})^2}{8} = 95,55 \text{ kg. m} = 9\ 555 \text{ kg. cm}$$

Recubrimiento = 1 centímetro

d=espesor- recubrimiento

d=2 centímetros

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$As = \frac{Mu}{0,9 * fy * (d - a/2)}$$

Usando como refuerzo de acero, electromalla grado 70 = 4900 kilogramos por centímetro cuadrado.

As=0.884 centímetro cuadrado por metro (cm²/m).

f'c=280 kilogramos por centímetro cuadrado.

$$a = \frac{As * 4900}{0,85 * 280 * 100} = 0,206As$$

$$As = \frac{9555}{0,9 * 4900 * (2 - a/2)}$$

Usando el método iterativo en la tabla VI.

Tabla VI. **Cálculo de área de acero en módulo de ferrocemento**

a	As	a
1,00	1,44	0,2975
0,2975	1,17	0,2411
0,2411	1,15	0,2375
0,2375	1,15	0,2373
0,2373	1,15	

Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

Según el proveedor el área de acero de la electromalla 8/8 de 15 centímetros de espaciamiento y grado 70 es 0,884 centímetros cuadrados/metro.

Área de acero en módulo de ferrocemento:

$$0,884 \text{ cm}^2/\text{m} * 1,6\text{m} = 1,41 \text{ cm}^2$$

Para que se cumpla la condición el área de acero calculada debe ser menor que el refuerzo propuesto y como 1,15 centímetros cuadrados menor que 1,41 centímetros cuadrados entonces el refuerzo resiste las cargas en los módulos de ferrocemento por tanto sí chequea.

4.2.3. Diseño de nervios

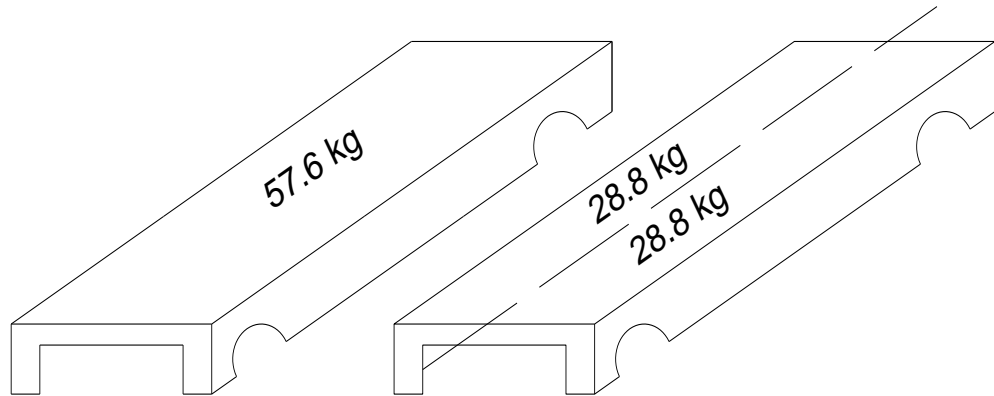
Los nervios son pequeñas vigas que dan rigidez el módulo de ferrocemento y a la vez soportan las cargas y las transmiten hacia los arcos del puente.

Cada nervio soportará la carga correspondiente a la mitad del módulo de ferrocemento por lo tanto las cargas se dividen en dos partes como se observa en la figura 27.

Por lo antes mencionado procede al análisis de cargas vivas y muertas previo al diseño de los nervios.

Para el diseño de los nervios se simula una viga simplemente apoyada con carga aplicada.

Figura 27. **Peso muerto soportado por los nervios**



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

$$\text{Peso muerto} = 57,6 \text{ kg}$$

El peso muerto distribuido en la longitud del nervio es:

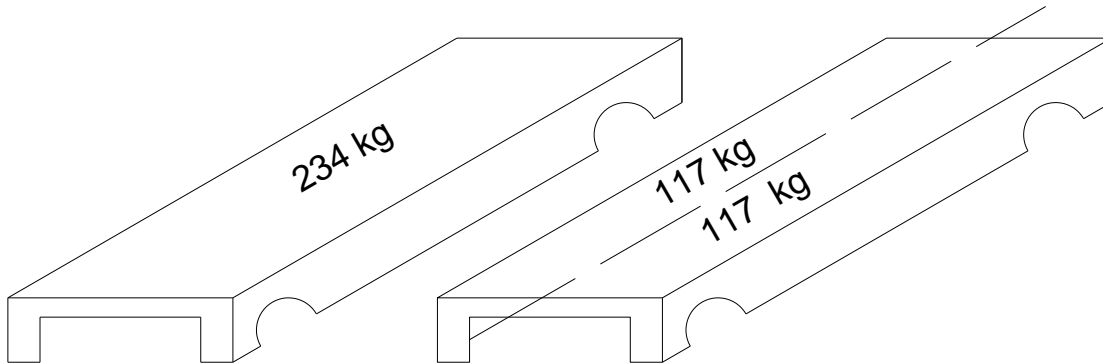
$$w_m = \frac{28,8 \text{ kg}}{1,6 \text{ m}} = 18 \text{ kg/m}$$

4.2.3.1. **Carga viva**

Se hace el análisis de carga viva tomando como parámetro de diseño la carga recomendada por AASHTO en su sección 3.6.1.6, siendo ésta igual a:

$$\text{Carga Viva} = 418 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 1,6\text{m} * 0,35\text{m} = 234 \text{ kg}$$

Figura 28. **Peso vivo soportado por los nervios**



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

Y finalmente la carga distribuida viva será:

$$w_v = \frac{117 \text{ kg}}{1,6 \text{ m}} = 73,13 \text{ kg/m}$$

Carga última según ACI 318-08 Apéndice C 9.2.2

$$C_u = 1,7C_v + 1,4C_m$$

$$C_u = 1,7(73,13) + 1,4(18) = 149,5 \text{ kg/m}$$

4.2.3.2. Chequeo en la deformación de los nervios

La deformación permisible se calcula en base al Código ACI 318-08 tabla 9.5 (b) para entrepisos que no soporten equipos que sufran daños por deformaciones excesivas de las losas.

$$\text{Def}_{\max} = \frac{l}{180}$$

$$\text{Def}_{\text{teorica}} = \frac{-5wl^4}{384EI}$$

Deformacion teórica < *Deformación Máxima permitida*

$$\frac{-5wl^4}{384EI} < \frac{l}{180}$$

$$\text{Def}_{\max} = \frac{160 \text{ cm}}{180} = 0,889 \text{ cm}$$

$$E_c = 15100\sqrt{f'c}$$

$$E_c = 15100\sqrt{280} = 252671,33 \text{ kg/cm}^2$$

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

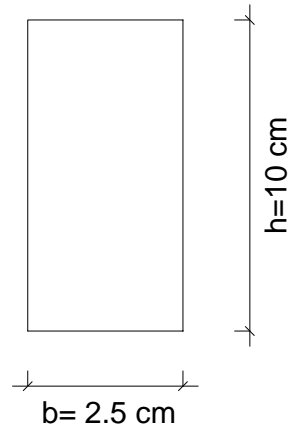
$$I = \frac{1}{12} * (2.5)(10)^3 = 208,33\text{cm}^4$$

$$\text{Def}_{\text{teorica}} = \frac{5 * 149,5 * 160^4 * (1/100)}{384(252671,33)(208,33)} = 0,24 \text{ cm}$$

$$0,24 \text{ cm} < 0,889 \text{ Sí chequea}$$

Siendo la deformación teórica menor que la máxima permitida, se da por aceptada la comparación y se continúa con el diseño.

Figura 29. Dimensiones de nervios en módulos de ferrocemento



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

$$M = \frac{wl^2}{8}$$

$$M = \frac{\left(149,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}}\right) (1,6\text{m})^2}{8} = 47,84 \text{ kg. m} = 4784 \text{ kg. cm}$$

Recubrimiento = 3 centímetros

d=espesor- recubrimiento

d=7 centímetros

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$As = \frac{Mu}{0,9 * fy * \left(d - \frac{a}{2}\right)}$$

$$fy = 40000 \text{ PSI} = 2800 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{14}{f_y} b d$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{14}{2800} (2,5 * 7) = 0,088 \text{ cm}^2$$

Área de Acero

$$a = \frac{0,88 * 2800}{0,85 * 280 * 2,5} = 0,414 \text{ cm}$$

$$A_s = \frac{4784}{0,9 * 2800 * \left(7 - \frac{0,414}{2}\right)} = 0,28 \text{ cm}^2$$

Usar una varilla de ¼ pulgadas de diámetro $f_y = 2800$ kilogramos por centímetro cuadrado con $A_s = 0,32$ centímetros cuadrados

Comprobando el momento resistente con $A_s = 0,32 \text{ cm}^2$

$$M = 0,9 A_s f_y (d - a/2)$$

$$a = \frac{0,32 * 2800}{0,85 * 280 * 2,5} = 0,15 \text{ cm}$$

$$M = 0,9(0,320)(2800) \left(7 - \frac{0,15}{2}\right) = 5\,614 \text{ kg. cm}$$

Momento resistente > Momento actuante

5 614 kilogramo - centímetro > 4 784 kilogramo - centímetro Sí cumple

Usar una varilla de ¼ pulgadas de diámetro $f_y = 2\,800$ kilogramos por centímetro cuadrado con $A_s = 0,32$ centímetros cuadrados la cual ha de trabajar a flexión.

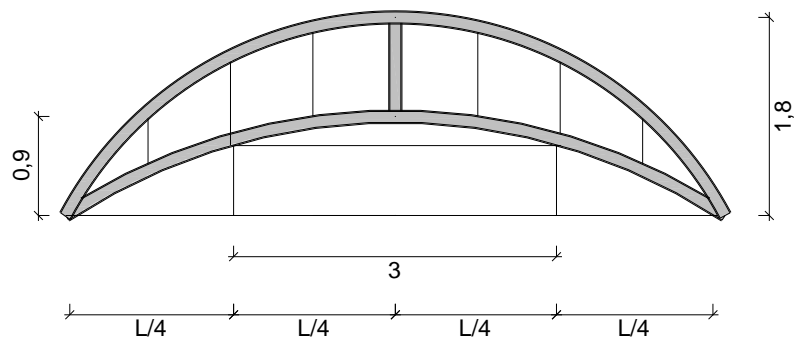
4.3. Análisis estructural en arcos

Los arcos son los elementos estructurales encargados de absorber las cargas que transmiten los módulos de ferrocemento, llevándolas hacia los cimientos de la estructura.

4.3.1. Deflexión en la clave del arco

Para determinar la deformación máxima permisible en la clave del arco se toma la proyección horizontal del recorrido del perímetro entre los dos cuartos centrales del arco, suponiendo un segmento recto tal como sucede en una viga rectangular

Figura 30. División en tramos equivalentes a un cuarto de la luz



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

$$\text{Def}_{\max} = \frac{l}{180}$$
$$\text{Def}_{\max} = \frac{300 \text{ cm}}{180} = 1,66 \text{ cm}$$

Por lo tanto en la clave del arco no puede existir una deformación mayor a 1,66 centímetros.

4.3.2. Cálculo de cargas distribuidas

A las cargas que provienen del peso propio de los arcos se le suma las cargas ya analizadas del módulo de ferrocemento.

Peso arco superior e inferior de longitud 7.32 m.

$$V = \frac{\pi}{4} \phi^2 * l = \frac{\pi}{4} * 0,1^2 * 7,32 = 0,057 \text{m}^3$$

$$\text{Peso} = 0,057 \text{m}^3 * 2\,400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 138 \text{ kg}$$

Arco superior = 138 kg

Arco inferior = 138 kg

Peso de Módulos de Ferrocemento calculado en 4.2.1

$$\text{Peso} = 57,6 \text{ kg}$$

$$\# \text{de Módulos} = 18 \text{ Módulos}$$

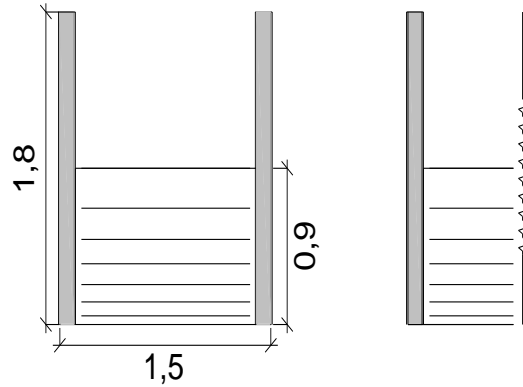
$$\text{Peso} = 57,6 \text{ kg} * 21 = 1\,037 \text{ kg}$$

Carga muerta de la estructura completa

Esto incluye los cuatro arcos más el peso de los 18 módulos de ferrocemento

$$C_{m_{\text{total}}} = 4 * 138 + 1\,037 = 1\,589 \text{ kg}$$

Figura 31. Vista frontal del puente y ancho tributario



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

El arco inferior soportará el ancho tributario de la carga tal como lo muestra la figura 31, siendo éste exactamente la mitad del peso.

$$W_m = \frac{0,5 * 1\ 589}{\text{longitud de arco}} \quad W_m = \frac{795 \text{ kg}}{7,32\text{m}} = 108,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Si la carga viva peatonal según AASHTO 3.6.1.6 es de $418 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$, la distribución en la estructura quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Peso vivo} = 418 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * (7,32\text{m} * 1,5\text{m}) = 4\ 590 \text{ kg}$$

El peso total vivo distribuido en la longitud de arco de 7.32 metros es:

$$W_v = \frac{4\ 590 \text{ kg}}{7,32 \text{ m}} = 627 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

El peso vivo total se distribuye en los dos arcos inferiores y para el análisis de un solo arco la carga total se divide en dos, quedando entonces:

$$W_v = 313 \text{ kg/m}$$

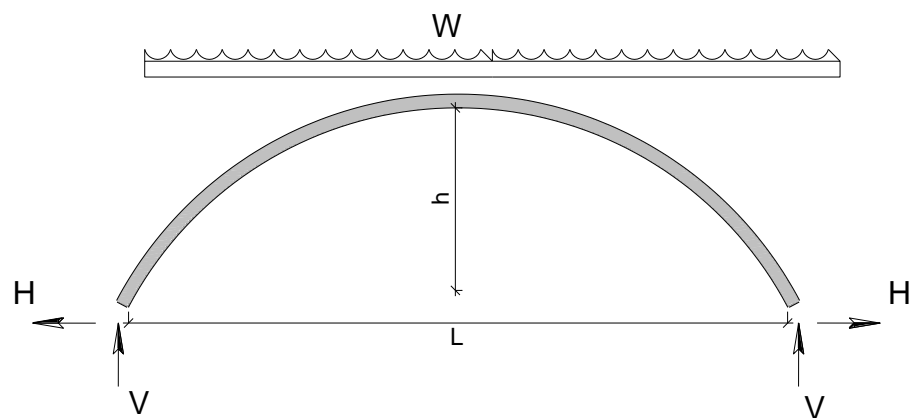
La carga última sería:

$$C_u = 1,7(313) + 1,4(108,5) = 684 \text{ kg/m}$$

4.3.3. Cálculo de reacciones

Las reacciones son las magnitudes de fuerza transmitidas a lo largo del arco y que son producidas por todas las cargas aplicadas al sistema estructural

Figura 32. Reacciones provocadas por carga distribuida



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

4.3.3.1. Cálculo de reacciones máximas en apoyos

Tal como se ha estudiado en la sección 3.5 del presente trabajo, las cargas a utilizar para calcular reacciones máximas en apoyos son:

$$g = 1,4C_m + 1,7C_v$$

$$g = 1,7(313) + 1,4(108,5) = 684 \text{ kg/m}$$

$$\Phi = \text{tag}^{-1}\left(\frac{0,9}{3}\right) = 16,7^\circ$$

$$g' = \frac{g}{\cos(\Phi)} - g$$

$$g' = \frac{684}{\cos(16,7^\circ)} - 684$$

$$g' = 30,12 \text{ kg/m}$$

Para el cálculo de las reacciones vertical y horizontal se utilizan las ecuaciones de "H" y "R" para los casos 1 y 2 de la tabla V de momentos y reacciones para un arco empotrado, con la ayuda de la figura 33a.

Cálculo de reacción máxima horizontal en apoyos:

$$H = \frac{gl^2}{8h} + \frac{g'l^2}{56h}$$

$$H = \frac{684(6)^2}{8(0,9)} + \frac{30,12(6)^2}{56(0,9)}$$

$$H = 3\,442 \text{ kg}$$

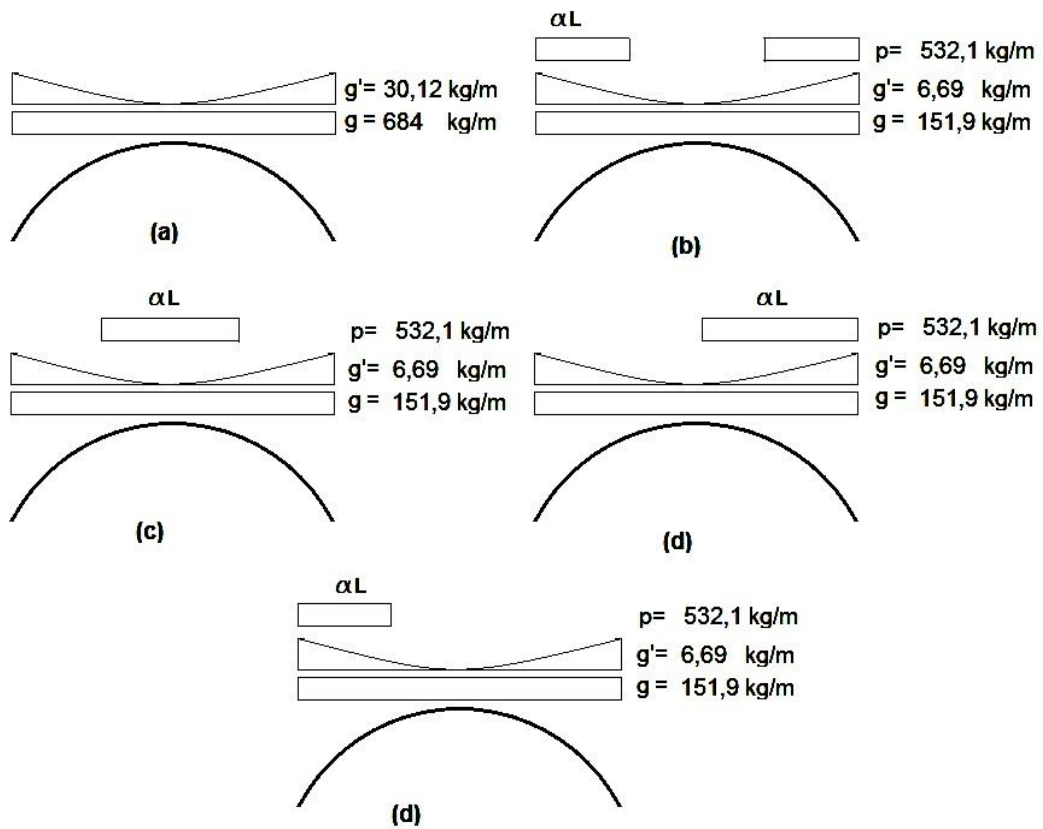
Cálculo de reacción máxima vertical en apoyos:

$$V = \frac{gl}{2} + \frac{g'l}{6}$$

$$V = \frac{684(6)}{2} + \frac{30,12(6)}{6}$$

$$V = 2\,082 \text{ kg}$$

Figura 33. Cargas por metro lineal en la directriz



Fuente: elaboración propia, en base a las cargas distribuidas actuantes.

4.3.3.2. Cálculo de momentos en la clave y riñones

Cargas a utilizar para calcular los momentos en la clave y los riñones:

$$g = 1,4Cm$$

$$g = 1,4(108,5)$$

$$g = 151,9 \text{ kg/m}$$

$$g' = \frac{g}{\cos(\Phi)} - g$$

$$g' = \frac{151,9}{\cos(16,7^\circ)} - 151,9$$

$$g' = 6,69 \text{ kg/m}$$

$$p = 1,7Cv$$

$$p = 1,7(313)$$

$$p = 532.1 \text{ kg/m}$$

Cálculo de momento positivo y negativo en la clave del arco:

Para el momento negativo se utilizaran las ecuaciones de los casos 2 y 3 de la tabla IV de momentos y reacciones y el valor de $\alpha=0,375$ de la figura 21 y con la ayuda de la figura 33.b.

$$M_c(-) = -\frac{g'l^2}{560} - \frac{pl^2}{4}\alpha^3(1 - 2\alpha)(2 - \alpha)$$

$$M_c(+)= -\frac{g'l^2}{560} - pl^2(0,00535)$$

$$M_c(-)= -\frac{(6,69)(6)^2}{560} - 0,00535(532,1)(6)^2$$

$$M_c(-)= -103,02 \text{ kg. m}$$

Para el momento positivo se utilizaran las ecuaciones de los casos 2 y 4 de la tabla V de momentos y reacciones, $\alpha=0,375$ con la ayuda de la figura 32.c:

$$M_c(+)= -\frac{g'l^2}{560} + \frac{pl^2}{4}\alpha^3(1 - 2\alpha)(2 - \alpha)$$

$$M_c(+)= -\frac{g'l^2}{560} + pl^2(0,00535)$$

$$M_c(+)= -\frac{(6,69)(6)^2}{560} + 0,00535(532,1)(6)^2$$

$$M_c(+)= 102,16 \text{ kg. m}$$

Cálculo de momento positivo y negativo en los riñones del arco:

Para el momento negativo se utilizaran las ecuaciones de los casos 2 y 5 de la tabla V de momentos y reacciones, donde $\alpha=0,4$, con ayuda de la figura 33.d.

$$M_{1/4}(-)= -\frac{g'l^2}{210} - \frac{pl^2}{2}\alpha^2(1 - \alpha)^3$$

$$M_{1/4}(-)= -\frac{g'l^2}{210} - pl^2(0,01728)$$

$$M_{1/4}(-) = -\frac{(6,69)(6)^2}{210} - 0,01728(532,1)(6)^2$$

$$M_{1/4}(-) = 332,15 \text{ kg. m}$$

Para el momento positivo se utilizaran las ecuaciones de los casos 2 y 6 de la tabla V de momentos y reacciones, donde $\alpha=0,4$, con ayuda de la figura 33.e:

$$M_{1/4}(-) = -\frac{g'l^2}{210} + \frac{pl^2}{2}\alpha^2(1-\alpha)^3$$

$$M_{1/4}(-) = \frac{g'l^2}{210} + pl^2(0,01728)$$

$$M_{1/4}(-) = -\frac{(6,69)(6)^2}{210} + 0,01728(532,1)(6)^2$$

$$M_{1/4}(-) = 329,9 \text{ kg. m}$$

4.3.3.3. Cálculo de reacciones y fuerza normal en riñones

En los cálculos anteriores se puede observar que el mayor momento actúa sobre los riñones, siendo éste un momento negativo de 332 kg-m.

4.3.3.4. Cálculo de reacciones, horizontal y verticales "l" y "r"

Para el cálculo de la remarcación horizontal se utilizaran las ecuaciones de los casos 1, 2 y 5 de la tabla V de momentos y reacciones, $\alpha=0,4$:

$$H = \frac{gl^2}{8h} + \frac{g'l^2}{56h} + \frac{pl^2}{8h}\alpha^3(6\alpha^2 - 15\alpha + 10)$$

$$H = \frac{151,9(6)^2}{8(0,9)} + \frac{6,69(6)^2}{56(0,9)} + \frac{532,1(6)^2}{8(0,9)} (0,317)$$

$$H = 1\,608,83 \text{ kg}$$

$$V_l = \frac{gl}{2} + \frac{g'l}{6} + \frac{pl}{2} \alpha (\alpha^3 - 2\alpha^2 + 2)$$

$$V_l = \frac{151,9(6)}{2} + \frac{6,69(6)}{6} + \frac{532,1(6)}{2} (0,6976)$$

$$V_l = 1\,605,97 \text{ kg}$$

$$V_r = \frac{gl}{2} + \frac{g'l}{6} + \frac{pl}{2} \alpha^3 (2 - \alpha)$$

$$V_r = \frac{151,9(6)}{2} + \frac{6,69(6)}{6} + \frac{532,1(6)}{2} (0,1024)$$

$$V_r = 625,85 \text{ kg}$$

4.3.3.5. Cálculo en la fuerza normal “N” a la sección transversal del arco

Dado que “V_l” es mayor que “V_r”, se utilizara “V_l” para el cálculo de la fuerza normal en la sección transversal del arco, utilizando la siguiente ecuación:

$$N_l = V_l(\text{sen}\Phi) + H(\text{cos}\Phi)$$

$$N_l = 1\,605,97 (\text{sen}(16,7^\circ)) + 1\,608,83 (\text{cos}(16,7^\circ))$$

$$N_l = 2\,003 \text{ kg}$$

4.3.3.6. Cálculo del acero de refuerzo

Resumen de valores máximos calculados y datos a utilizar en el cálculo del acero de refuerzo:

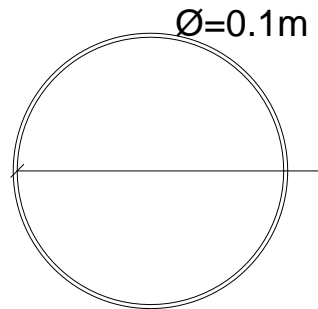
Tabla VII. Resumen de resultados de momentos y reacciones en el arco

Fuerza máxima horizontal en apoyos	3 442 kg
Fuerza máxima vertical en apoyos	2 082 kg
Momento máximo en la clave	103 kg.m
Momento máximo en los riñones (M_u)	332 kg.m
Reacción máxima horizontal en riñones	1 609 kg
Reacción máxima vertical en riñones	1 606 kg
Fuerza normal provocada por reacciones en los riñones (P_u)	2003 kg
Diámetro de arco (D)	10 cm
Distancia de cama inferior a fibra de compresión (d)	5 cm
Resistencia de compresión del grout (f'_c)	280 kg/cm ²

Fuente: elaboración propia, en base a los resultados del análisis estructural del arco.

Como se indicó en la sección 3.6 (Analogía de columna), se puede diseñar el arco como una columna, donde la fuerza normal trabaja a compresión (P_u) y con el momento máximo (M_u) se puede diseñar el refuerzo longitudinal.

Figura 34. **Sección del arco**



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

Según Código ACI 318-08 10.3.6.1 Para elementos no presforzados circulares, se debe cumplir la siguiente condición:

$$\varnothing P_n = 0.85\varnothing[0.85f'_c * (A_g - A_{st}) + f_y * A_{st}]$$

$f'_c=280$ kilogramos por centímetro cuadrado

$f_y= 2\ 800$ kilogramos por centímetro cuadrado

$A_g= 78,54$ centímetros cuadrados

$P_n= 203$ kg

El Código ACI 318-08 10.9.1, especifica que el área de refuerzo longitudinal A_{st} , no debe ser menor que $0,01A_g$

Si $A_g=78,54$ centímetros cuadrados, entonces A_{st} es $0,78$ centímetros cuadrados, para lo cual se propone una varilla No. 4 con área de acero de $1,27$ centímetros cuadrados, y de este modo la capacidad de resistir compresión de la sección del arco es de:

$$P_u = 0,85[0,85(280) * (78,54 - 1,27) + (2\ 800) * 1,27]$$

$$P_u = 18\ 654\ \text{Kg} \ll P_n = 2\ 003\ \text{kg}$$

Por lo tanto el área de acero propuesta es suficiente para resistir los esfuerzos a compresión en los arcos.

4.3.4. Diseño de cimiento

El cimiento debe resistir las fuerzas que la estructura transmite hacia el suelo, siendo éstas una fuerza horizontal de 3 442 kg y una fuerza vertical de 2082 kg, siendo la fuerza horizontal la crítica pues es la que provoca desplazamiento y tiende a separar los apoyos del arco, produciendo así deformación en la estructura la cual puede hacer que ésta colapse.

Para evitar lo antes mencionado es importante que los cimientos sean los encargados de resistir las reacciones horizontales y de ese modo anular el desplazamiento en la base de los arcos.

Según la ecuación 11.3 del Código ACI, el corte producido por una fuerza externa debe ser menor a:

$$V = 0,53\lambda\sqrt{f'_c} * bd$$

Donde λ es un factor de modificación del concreto y para un concreto o grout de peso normal $\lambda=1,00$.

A partir de la ecuación 11.3 del Código ACI podemos determinar el área que soportará el corte producido por las cargas de servicio.

$f'c = 280$ kilogramos por centímetro cuadrado

$V =$ fuerza horizontal de corte

$$3442 = 0,53\sqrt{280} * bd$$

$$bd = 388 \text{ cm}^2$$

Si utilizamos una sección de 35 centímetros x 35 centímetros tenemos un área de 1225 centímetros cuadrados por lo tanto será capaz de resistir el corte inducido por la estructura.

$$V = 0,53\sqrt{280} * 35 * 35 = 10864 \text{ kg}$$

$$10864 > 3449 \text{ kg}$$

Sin embargo el peso del bloque de concreto de 35 centímetros x 35 centímetros y 175 centímetros de largo no podrá soportar la reacción horizontal y tenderá a desplazarlo, esto demuestra al aplicar sumatoria de fuerzas de la siguiente manera:

$$\text{Vol} = 0,35\text{m} * 0,35\text{m} * 1,75\text{m} = 0,21 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso específico concreto} = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso}_{\text{bloque}} = 2400 * 0,21 = 514 \text{ kg}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$514 \text{ kg} - 3442 \text{ kg} \ll 0$$

Por lo tanto se demuestra que la reacción horizontal es mucho mayor que la fuerza inducida por la masa de concreto del cimiento y por esta razón diseñaran tensores uniendo las bases de cada arco con el fin de contrarrestar las fuerzas horizontales.

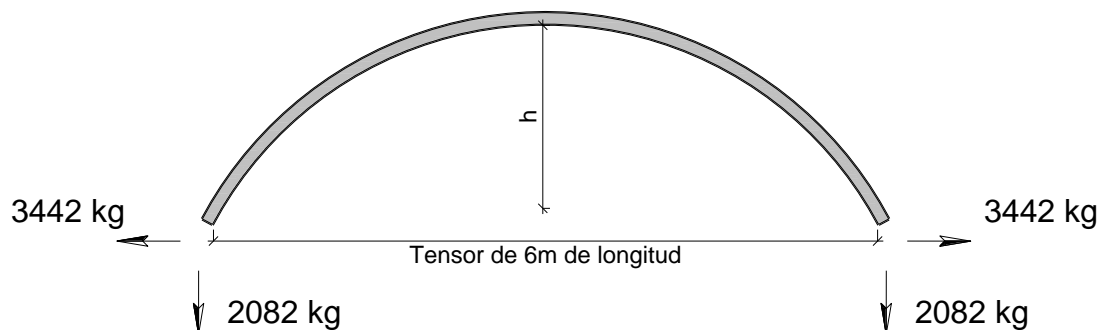
4.3.4.1. Diseño de tensor

Cuando un arco se encuentra soportando cargas, éstas son transmitidas directamente a los apoyos donde se genera una reacción con dos componentes, una vertical y una horizontal.

La componente vertical es resistida por los cimientos o apoyos del arco que luego serán transmitidos al suelo, mientras que la componente horizontal de la reacción, debe ser contrarrestada por medio de una estructura de soporte como estribos o muros de contención. El efecto producido por las reacciones horizontales es la separación entre apoyos del arco, provocando deformaciones y corrimientos en sus bases.

Por lo antes expuesto, se propone el diseño de tensores capaces de resistir los esfuerzos que resultan del análisis de las reacciones de la sección 4.3.3.1.

Figura 35. Reacciones en el arco



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

Suponiendo:

A_s = Área de acero

P = Fuerza actuante

σ = Esfuerzo = fluencia del acero = f_y

Calculando el área de acero necesaria para resistir la tracción debido a las reacciones horizontales:

$f_y = 40000 \text{ psi} = 2800 \text{ kilogramos por centímetro cuadrado}$

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

$$2800 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = \frac{3442 \text{ kg}}{A_s}$$

$$A_s = 1.28 \text{ cm}^2$$

Usar varillas No. 5 con área de 1.99 centímetros cuadrados como tensores en la parte inferior de cada arco, con el propósito de absorber los esfuerzos horizontales.

En el presente proyecto, los tensores permitieron simplificar el trabajo pues caso contrario, se deben diseñar estructuras de contención capaces de resistir los esfuerzos horizontales de las cargas, siendo muros de concreto ciclópeo la estructura recomendada para este fin.

5. COMPARACIÓN DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realiza la comparación del análisis teórico y el análisis de resultados después de realizar los ensayos respectivos al puente peatonal.

5.1. Generalidades

Después del análisis y diseño estructural del puente peatonal en arco a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC detallado en el capítulo 4, se procedió a construir la estructura y posteriormente se realizó el ensayo de carga respectivo, tal como se indica y detalla en el anexo del presente trabajo, por lo tanto se procede al análisis del diseño teórico y el comportamiento real del mismo ante la simulación de carga viva aplicada.

5.2. Cargas

Se realiza la comparación respectiva entre las cargas de diseño y las cargas reales que actúan sobre la estructura, siendo éstas; la carga viva que es la que actúa directamente sobre la estructura y la carga muerta la cual está constituida por el peso propio del puente peatonal.

5.2.1. Carga viva

La carga viva en el diseño de la estructura es como se indica en el artículo 3.6.1.6 de AASHTO con un valor equivalente a 418 kilogramos por metro cuadrado, y al evaluar el puente en el respectivo ensayo se le aplicó el

equivalente a un diez por ciento adicional a los 418 kilogramos por metro cuadrado, siendo la carga total de 459 kilogramos por metro cuadrado.

5.2.2. Carga muerta

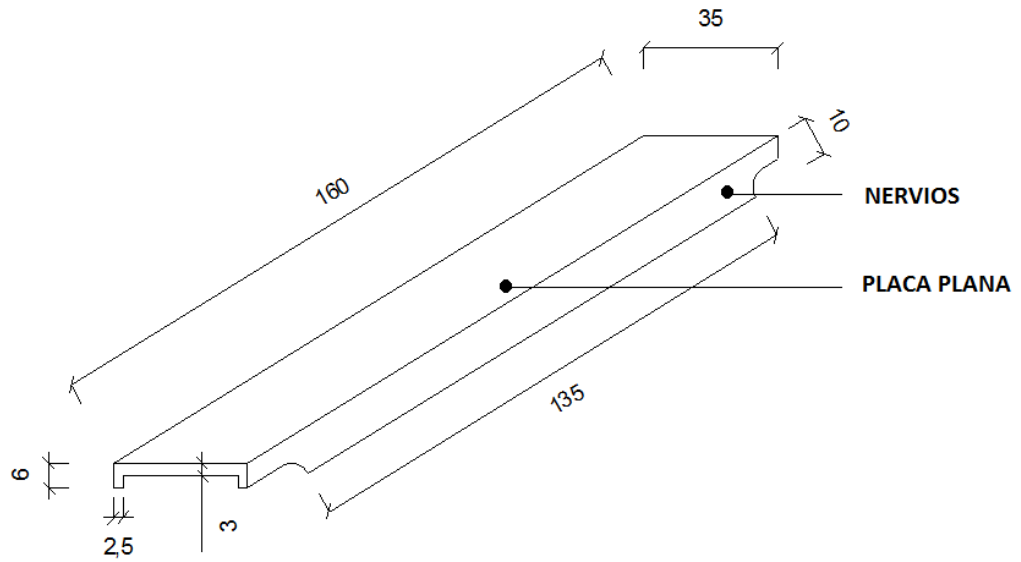
En el diseño se realizaron los cálculos respectivos para encontrar el peso de cada elemento estructural y con éste, la carga muerta usando un peso volumétrico de 2 400kilogramos por metro cúbicoen el grout o mortero de relleno dentro de los tubos y en los módulos de ferrocemento, sin embargo al evaluar el peso volumétrico real en obra, se obtuvo para el grout dentro de la tubería de PVC un valor de 1 127 kilogramos por metro cúbico y para los módulos de ferrocemento 1800 kilogramos por metro cúbico,haciendo del puente en general una estructura más liviana de lo antes contemplado.

5.3. Comparación en el diseño y resultados de los módulos de ferrocemento

Las losetas o módulos de ferrocemento, son los elementos estructurales que soportan las cargas directas, que provienen de los peatones o cargas de servicio. Estos elementos fueron diseñados para una capacidad 418 kilogramos por metro cuadrado distribuida en toda la superficie.

Los módulos de ferrocemento son elementos formados por una placa rectangular apoyada sobre dos nervios que permiten dar rigidez y estabilidad al elemento (ver figura 36). Como se observa en la sección 4.2 del presente trabajo, tanto la placa rectangular, como los nervios fueron diseñados para resistir la carga viva individualmente, por lo tanto cada módulo de ferrocemento tiene la capacidad de resistir el doble de la carga de diseño.

Figura 36. **Módulo de ferrocemento**



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

Figura 37. **Ensayo de módulo de ferrocemento**



Fuente: Laboratorio de Prefabricados, Sección de Estructuras, CII, USAC.

El ensayo de los módulos de ferrocemento consiste en colocar el elemento estructural sobre dos apoyos simples (ver figura 37) y aplicar carga progresiva utilizando un gato hidráulico de 10 toneladas y tomando nota del cambio respectivo en la deflexión al centro de la luz, tal como se indica con detalle en el Anexo del presente trabajo.

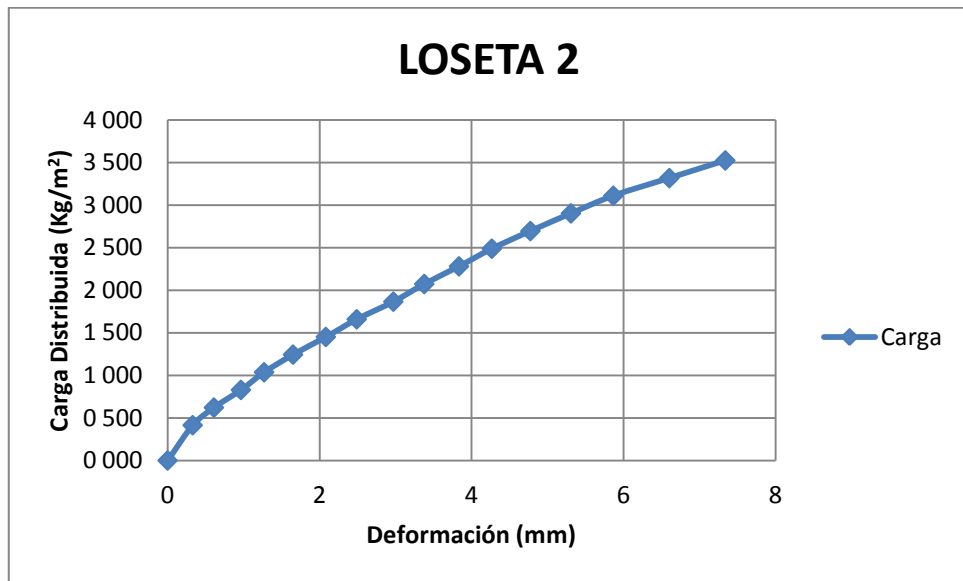
Del ensayo realizado a los módulos de ferrocemento, se obtuvieron los siguientes datos de la carga distribuida y su deflexión respectiva hasta llegar al colapso del elemento.

Tabla VIII. **Datos de carga versus deformación, obtenidos del ensayo del módulo de ferrocemento**

Carga Lb	Carga Distribuida (Kg/m²)	Deformación acumulada 2
0	0,00	0,00
200	414,64	0,33
300	621,96	0,60
400	829,28	0,96
500	1036,60	1,27
600	1243,92	1,65
700	1451,24	2,08
800	1658,56	2,48
900	1865,88	2,97
1000	2073,21	3,37
1100	2280,53	3,83
1200	2487,85	4,26
1300	2695,17	4,77
1400	2902,49	5,30
1500	3109,81	5,86
1600	3317,13	6,60
1700	3524,45	7,34

Fuente: elaboración propia, en base a datos de ensayo.

Figura 38. **Carga versus deformación en modulo de ferrocemento**



Fuente: elaboración propia, en base a resultados de ensayo.

En el ensayo de las losetas detallado en el informe como Anexo del presente trabajo se observa que al actuar el equivalente a una carga distribuida de 418 kilogramos por metro cuadrado, la deflexión máxima en el centro del claro es de 0,3 milímetros, muy por debajo de la deflexión teórica permisible de 2,4 milímetros como se indica en la sección 4.2.3.2.

Las primeras grietas fueron visibles al aplicarle una carga aproximada de 621 kilogramos por metro cuadrado, las cuales solo afectaron el recubrimiento, antes de llegar al refuerzo a tensión de los nervios, superando en un 50 por ciento la carga de diseño, esto se debe a la resistencia aportada por los nervios de la loseta.

Como se observa en el gráfico de la figura 38, es a partir de los 1 244 kilogramos por metro cuadrado que el elemento se encuentra en la zona

elastoplástica, y el acero a tensión empieza trabajar de forma progresiva hasta fluir.

El elemento falla al superar los 3 000 kilogramos por metro cuadrado, demostrando que el módulo de ferrocemento tiene mayor resistencia que la diseñada, comprobando la eficiencia de las propiedades mecánicas del ferrocemento como material de construcción.

Al momento de ceder el elemento, se observa en los nervios efectos cortantes, los cuales son inducidos por la flexión generada al aplicar carga sobre el módulo de ferrocemento, esto se debe a que se sobre pasó la carga de diseño y la capacidad cortante de los nervios siendo ésta:

$$V_c = 0,53\sqrt{f'_c} * bd$$

Donde:

- V_c = capacidad del elemento de resistir corte
- f'_c = resistencia a compresión del concreto
- b = base del elemento
- d = peralte efectivo del elemento.

$V >$ corte actuante debido a la carga de diseño

El corte actuante debido a la carga de diseño está en función de la carga distribuida a la cual está sometido un nervio (sección 4.2.3.1.)

$$\text{Corte actuante} = 149,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 1,35\text{m} = 202 \text{ kg}$$

$$V = 0,53\sqrt{280} * 2,5 * 8 = 212.84 \text{ kg}$$

La capacidad del nervio de resistir corte es mayor al corte actuante debido a la carga de diseño.

Del ensayo de las muestras de los módulos de ferrocemento con volumen conocido según la sección 4.2.1.1. y con su respectivo peso se obtuvo su peso específico:

Tabla IX. **Propiedades físicas de los módulos de ferrocemento**

	Peso (kg)	Volumen (m³)	Peso Específico (kg/m³)
Loseta 1	44,8	0,024	1866,67
Loseta 2	42,0	0,024	1750,00
Promedio	43,4	0,024	1808,33

Fuente: elaboración propia, en base a datos de ensayo.

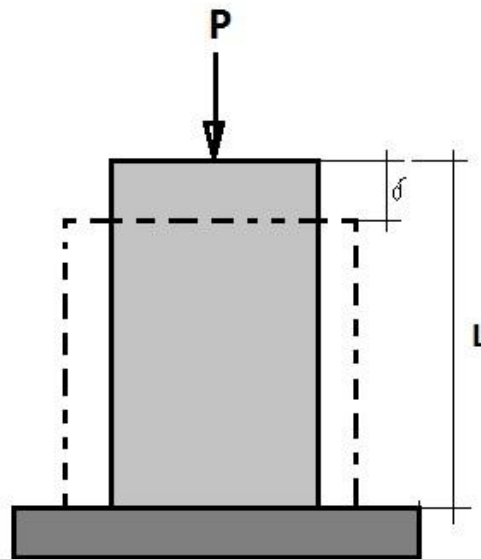
5.4. Análisis de resultados en arcos

Las cargas vivas actuantes en el puente peatonal, son transmitidas a las losetas o módulos de ferrocemento y éstas a su vez trabajan como diafragma transportando los esfuerzos hacia los arcos que finalmente disipan estos esfuerzos en sus apoyos.

Los arcos utilizados en este proyecto, son elementos estructurales de sección circular con diámetro de 4 pulgadas y capacidad de cubrir una luz de seis metros con una contraflecha en el arco superior de 1,80 metros y en el arco inferior de 0.90 metros. Esta sección circular está encofrada en tubería PVC de uso pluvial de 4 pulgadas de diámetro, y que permite dar al mortero de relleno (grout) mayor confinamiento, proveyendo a la vez una resistencia a compresión adicional a la resistencia del mortero y evitando el ensanchamiento de la

sección o deformación lateral causada por los esfuerzos resistidos por el elemento sometido a compresión (efecto de Poisson).

Figura 39. **Efecto de Poisson en elementos sometidos a compresión**

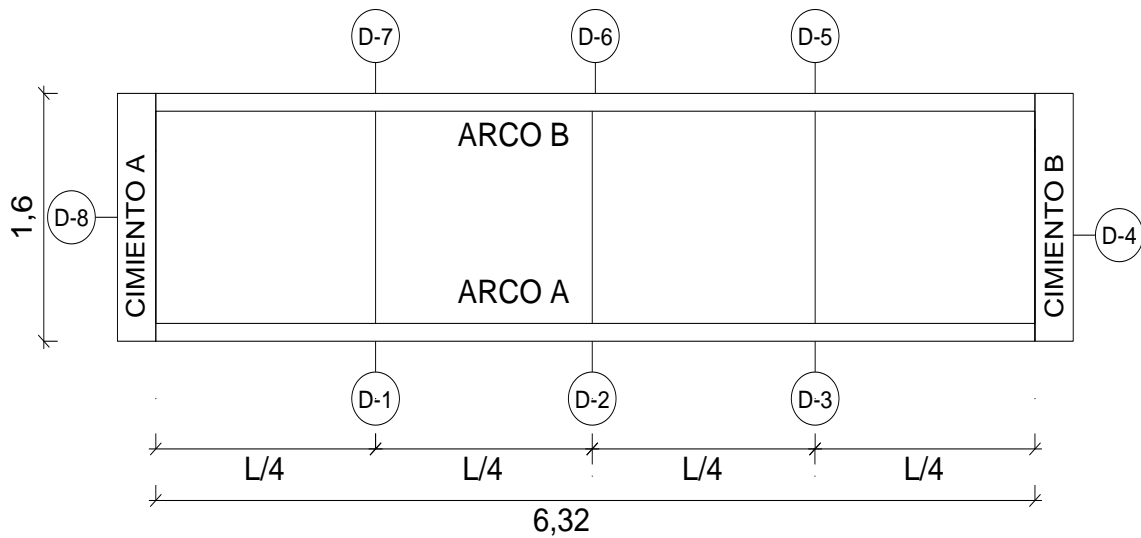


Fuente: elaboración propia, con programa Power Point.

En la sección 4.3 se indica con detalle el análisis y diseño estructural de los arcos cuando la estructura está en servicio, determinando las reacciones en los apoyos, momentos en la clave y riñones, reacción normal máxima, deflexión permisible en la clave y diseño de refuerzo en el arco.

En el ensayo a carga de la estructura se evaluó el comportamiento de los arcos ante la simulación de carga viva y tomando lectura de la deflexión con la ayuda de ocho deformómetros colocados estratégicamente en puntos de interés tanto en los arcos como los cimientos del puente peatonal.

Figura 40. Diagrama del puente en planta y posición de deformómetros



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad.

Se realizaron dos ensayos en la estructura. En el primer ensayo se estudia el comportamiento del puente ante la carga de diseño y en el segundo ensayo se aumenta esta carga en un 60 por ciento para estudiar el comportamiento de la estructura bajo solicitaciones especiales de carga.

El procedimiento del ensayo es como se indica en el informe adjunto en el Anexo del presente trabajo, el cual consiste en aumentar progresivamente carga distribuida sobre la superficie en porciones de aproximadamente un 15 por ciento de la carga de diseño, para la cual también se toma lectura del aumento de deflexión observado en los deformómetros.

Figura 41. **Ensayo de puente peatonal a carga de diseño**



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

Del primer ensayo los resultados fueron tabulados y graficados de la siguiente manera:

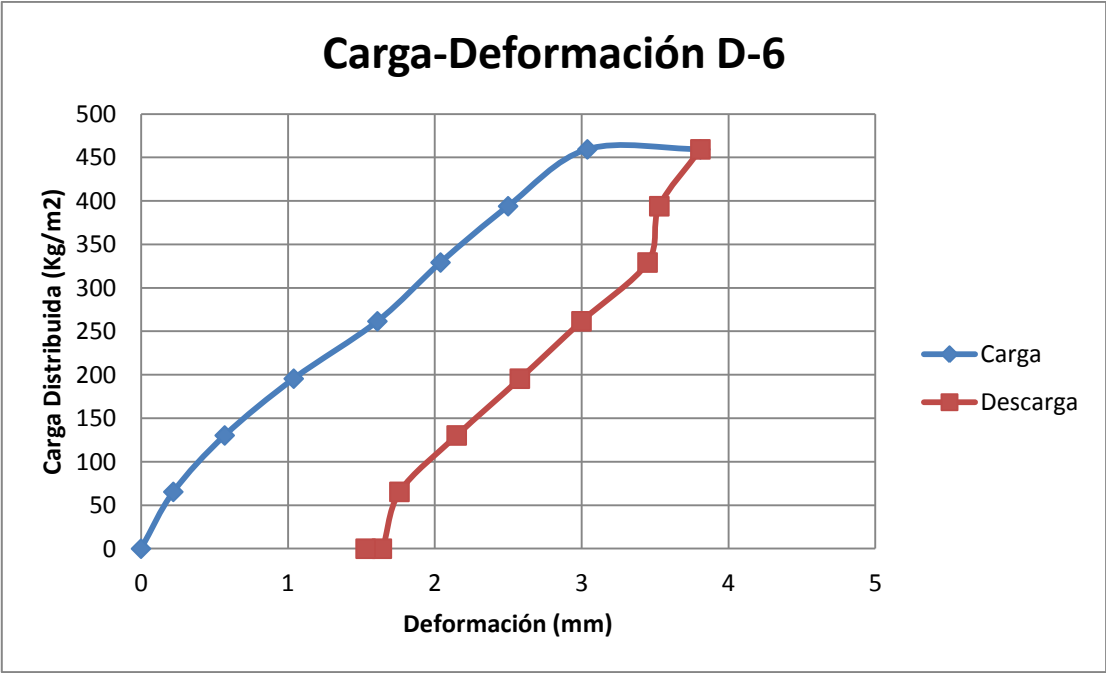
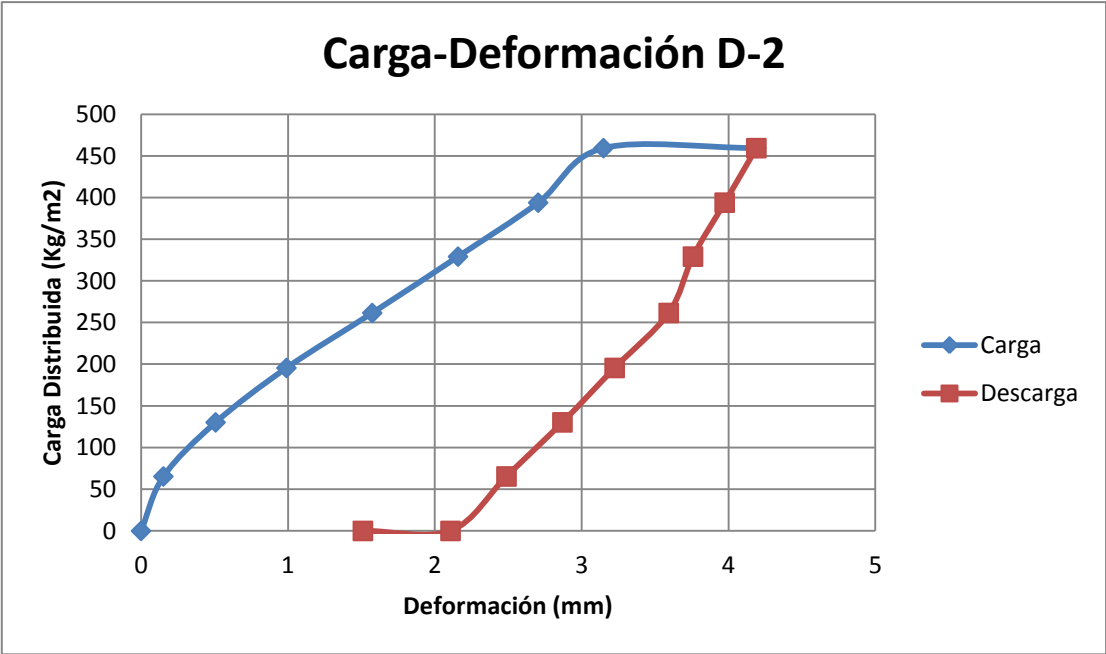
Tabla X. **Datos obtenidos del ensayo del puente peatonal ante la carga de diseño**

Carga/Descarga Kg	Carga Distribuida kg/m ²	Deformación Acumulada 1 (mm)	Deformación Acumulada 2 (mm)	Deformación Acumulada 3 (mm)	Deformación Acumulada 4 (mm)	Deformación Acumulada 5 (mm)	Deformación Acumulada 6 (mm)	Deformación Acumulada 7 (mm)	Deformación Acumulada 8 (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
525,00	65,38	0,11	0,15	0,10	0,02	0,22	0,22	0,00	0,09
1 046,30	130,30	1,24	0,50	0,35	0,02	0,47	0,57	0,00	0,23
1 570,70	195,60	1,39	0,99	0,55	0,05	0,78	1,04	0,00	0,41
2 100,80	261,62	1,59	1,57	0,88	0,12	1,14	1,61	1,02	0,71
2 644,00	329,27	1,84	2,15	1,32	0,13	1,49	2,04	1,20	0,81
3 163,90	394,01	2,08	2,70	1,72	0,19	1,83	2,50	1,37	0,81
3 689,40	459,45	2,30	3,14	2,13	0,24	2,26	3,04	1,58	0,82
3 689,40	459,45	2,67	4,19	2,66	1,55	2,84	3,81	1,62	0,83
3 163,90	394,01	2,57	3,97	2,48	1,55	2,64	3,53	1,60	0,82
2 644,00	329,27	2,48	3,75	2,31	1,55	2,44	3,45	1,63	0,82
2 100,80	261,62	2,36	3,59	2,10	1,54	2,26	3,00	1,63	0,82
1 570,70	195,60	2,24	3,22	1,80	1,52	1,83	2,58	1,63	0,82
1 046,30	130,30	2,10	2,87	1,54	1,48	1,55	2,15	1,63	0,82
525,00	65,38	1,96	2,48	1,24	1,44	1,20	1,76	1,15	0,82
0,00	0,00	1,78	2,10	0,93	1,26	0,91	1,64	1,14	0,82
0,00	0,00	1,44	1,51	0,53	0,22	0,51	1,53	1,15	0,29

Fuente: elaboración propia, en base a datos de ensayo.

Figura 42.

Gráficas del comportamiento de los arcos en el punto de la clave ante la carga de diseño



Fuente: elaboración propia, en base a resultados de ensayo.

Análisis:

El comportamiento general de ambas graficas es bastante similar, pues se mantiene la proporcionalidad, esto significa que cuando aumenta la carga, la deformación también aumenta constantemente, lo cual indica que en este punto ambos arcos trabajaron como sistema en conjunto teniendo el mismo comportamiento ante los esfuerzos solicitados.

En las gráficas la deformación máxima se observa que es de aproximadamente 4 milímetros y de este valor se recuperan 2,5 milímetros, obteniendo al final una deformación permanente de 1,5 milímetros después de 24 horas de descargar el sistema, por lo que se considera que ambos arcos mantuvieron el mismo comportamiento no solo en el momento de carga-descarga sino también al recuperarse cuando se retira toda la carga, y con esto se demuestra que la deformación máxima real en la clave es mucho menor que la deformación teórica, por lo tanto la estructura se comporta bajo las condiciones de diseño.

Para el análisis del segundo ensayo se debe de tomar en cuenta que las deformaciones nuevas, son adicionadas a las anteriores para poder determinar las deformaciones reales del sistema cuando ya ha sobrepasado la carga para la cual fue diseñado.

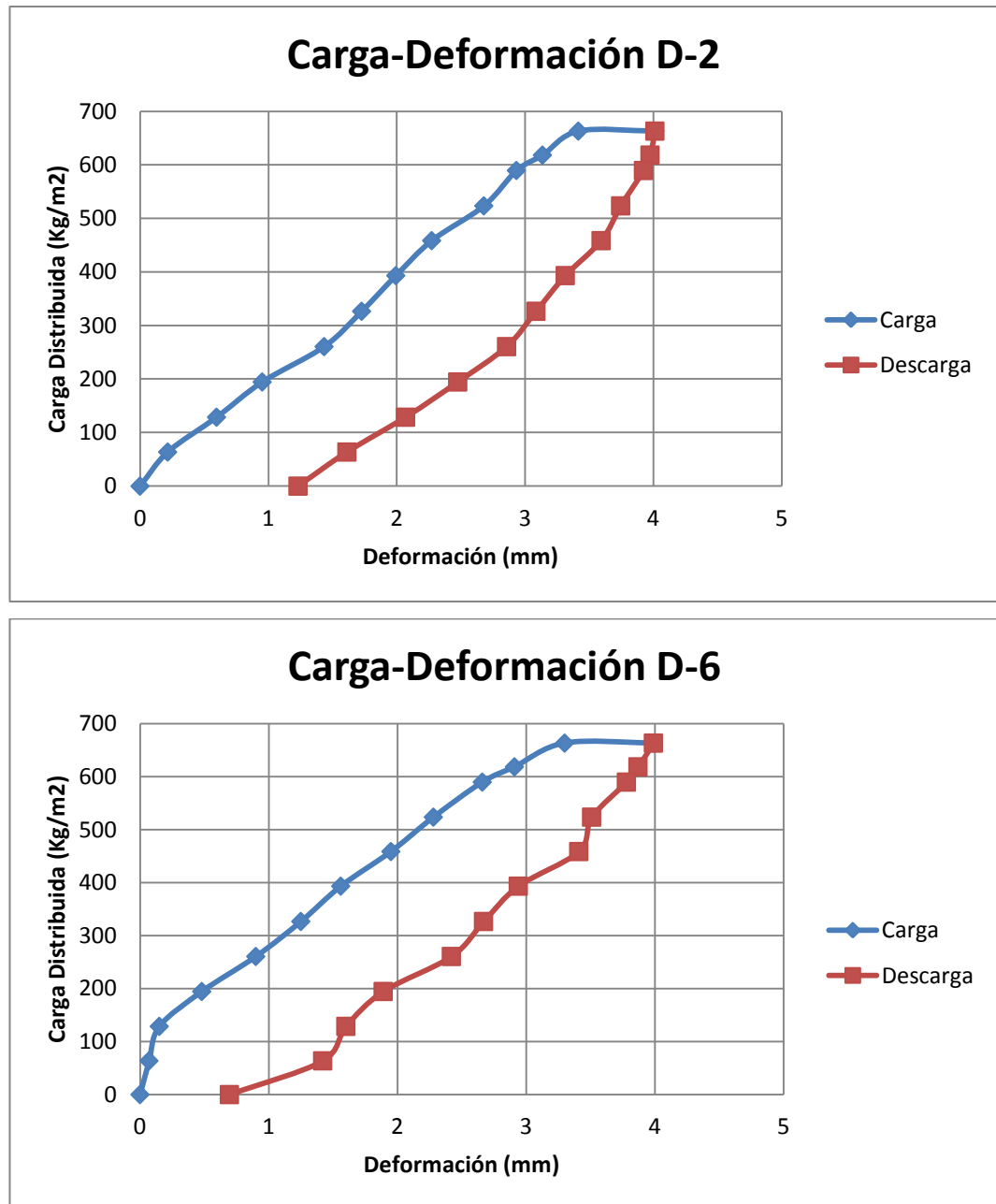
El segundo ensayo fue similar al primero, cargando la estructura en porciones de un 15 por ciento de la carga de diseño, tomando lectura en la variación de la deformación, con la diferencia que en éste se aumentó la carga en un 60 por ciento y del cual se obtuvieron los datos tabulados a continuación:

Tabla XI. Datos obtenidos del ensayo aplicando 60 por ciento de carga adicional a la carga de diseño

Carga Kg	Carga Distribuida	Deformación Acumulada 1	Deformación Acumulada 2	Deformación Acumulada 3	Deformación Acumulada 4	Deformación Acumulada 5	Deformación Acumulada 6	Deformación Acumulada 7	Deformación Acumulada 8
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
511,30	63,67	0,14	0,21	0,10	0,00	0,20	0,07	0,00	0,01
1 034,10	128,78	0,17	0,59	0,35	0,00	0,46	0,15	0,00	0,01
1 562,60	194,60	0,34	0,95	0,55	0,07	0,74	0,48	0,00	0,21
2 093,20	260,67	0,45	1,43	0,88	0,10	1,05	0,90	0,00	1,41
2 623,40	326,70	0,54	1,72	1,32	0,13	1,33	1,25	0,00	1,50
3 158,90	393,39	0,68	1,99	1,72	0,18	1,57	1,56	1,25	1,51
3 683,40	458,70	0,79	2,27	2,23	1,20	1,87	1,95	1,44	1,51
4 205,20	523,69	0,97	2,67	2,54	1,21	2,16	2,28	1,60	1,51
4 735,81	589,76	1,12	2,93	2,84	1,23	2,45	2,66	1,85	1,51
4 967,31	618,59	1,13	3,13	3,04	1,28	2,66	2,91	1,87	1,52
5 326,71	663,35	1,21	3,41	3,32	1,33	3,03	3,30	1,88	1,52
5 326,71	663,35	1,57	4,01	4,82	1,40	3,66	3,99	2,85	1,51
4 967,31	618,59	1,53	3,97	4,57	1,40	3,56	3,87	2,87	1,51
4 735,81	589,76	1,48	3,92	4,29	1,41	3,46	3,78	2,87	1,51
4 205,20	523,69	1,41	3,74	4,01	1,41	3,26	3,51	2,87	1,51
3 683,40	458,70	1,31	3,59	3,75	1,41	3,06	3,41	2,87	1,51
3 158,90	393,39	1,22	3,31	3,42	1,41	2,80	2,94	2,87	1,51
2 623,40	326,70	1,10	3,08	3,12	1,41	2,59	2,67	2,87	1,51
2 093,20	260,67	0,97	2,85	2,89	1,41	2,28	2,42	2,87	1,51
1 562,60	194,60	0,82	2,47	2,46	1,39	1,98	1,89	2,87	1,51
1 034,10	128,78	0,67	2,07	2,00	1,34	1,65	1,60	2,04	1,51
511,30	63,67	0,46	1,61	1,67	1,30	1,32	1,42	2,01	1,51
0,00	0,00	0,27	1,23	1,06	1,27	0,97	0,69	1,60	1,51

Fuente: elaboración propia, en base a datos de ensayo.

Figura 43. Gráficas del comportamiento en el punto de la clave de los arcos con un 60 por ciento adicional a la carga de diseño



Fuente: elaboración propia, en base a resultados de ensayo.

Este ensayo mantiene características muy similares al comportamiento del ensayo a la carga de diseño, como se ve en los gráficos de la figura 42, al aplicarle carga hasta sobrepasar en un 60 por ciento la carga de diseño, llegando a una deformación máxima de 4 milímetros y recuperándose 3 milímetros, con esto se concluye que en la clave de los arcos los esfuerzos fueron distribuidos uniformemente y soportados bajo iguales condiciones por ambos arcos y su deformación permanente tomando en cuenta la que ya tenía debido al primer ensayo es menor que los 16 milímetros permitidos según se indica en la sección 4.3.1.

Para ambas lecturas la proporcionalidad de las deformaciones provocadas por las cargas fueron constantes hasta los últimos datos obtenidos, haciendo trabajar la estructura solamente en su zona elastoplástica y sin presentar grietas considerables o deformaciones mayores.

Figura 44. **Ensayo de puente peatonal con el 60 por ciento de carga adicional a la carga de diseño**



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

5.5. Comportamiento de los tensores en los apoyos

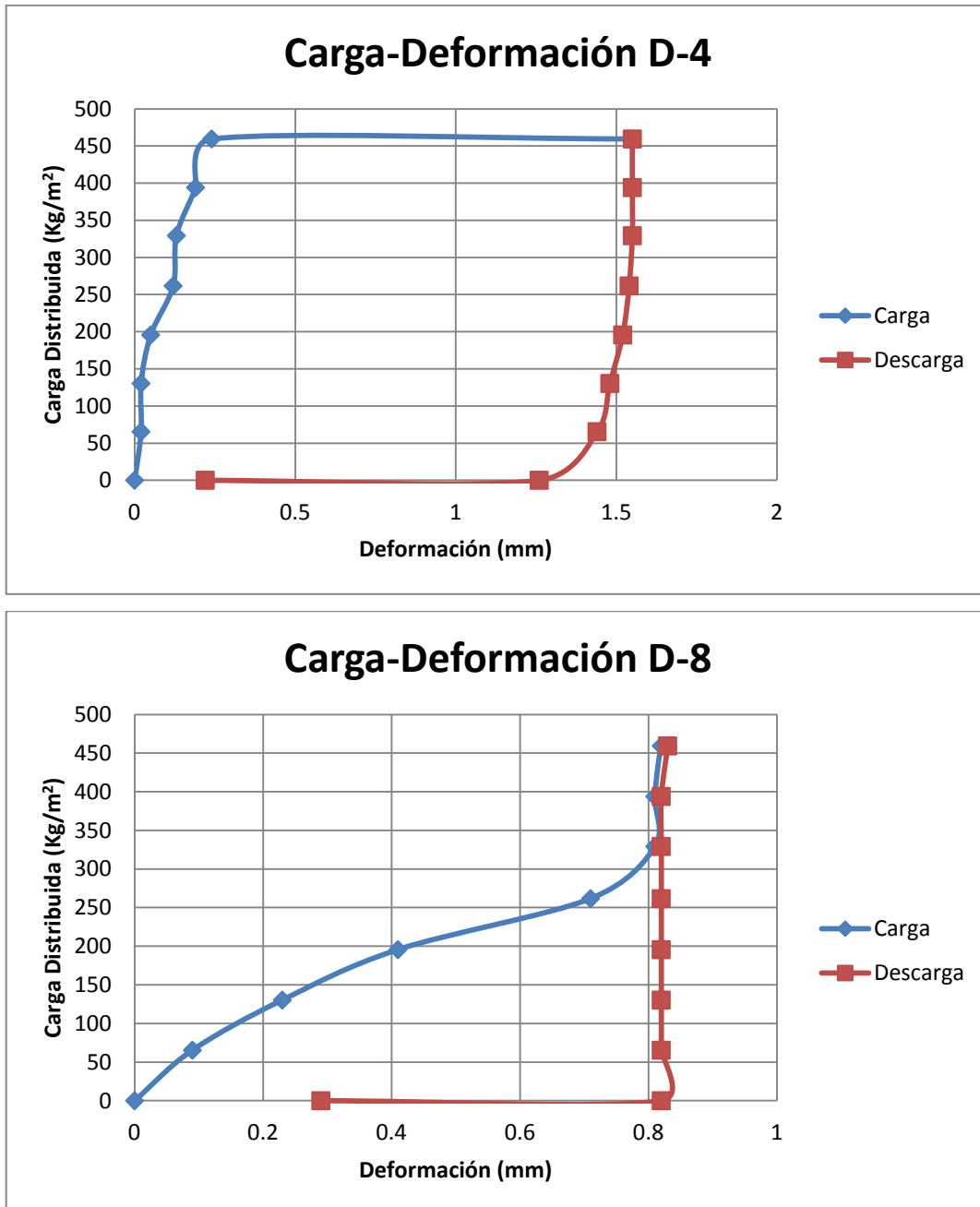
Cuando existe carga actuando sobre un arco, se genera en los apoyos una reacción con una componente vertical y una componente horizontal. Las reacciones verticales son resistidas por los cimientos y posteriormente transmitida hacia el suelo y las reacciones horizontales se contrarrestan por medio de estribos o muros de contención que evitan el desplazamiento de los apoyos del arco. También en algunos casos especiales como en techos en arco se usan tirantes como varillas de acero, cables o torones.

Los tensores colocados en la parte inferior de los arcos del puente peatonal y embebidos entre los cimientos, están formados por dos varillas No. 5 grado 40 y su función es resistir las tensiones horizontales en los apoyos provocadas por las cargas actuantes.

Las varillas de acero estructural se caracterizan por su capacidad de resistir esfuerzos de tracción, cuyas propiedades están en función del área y su grado de fluencia, permitiendo absorber esfuerzos sin que su deformación sea permanente. Por esta razón se coloca una varilla de acero conectando los dos arcos en sus apoyos los cuales ejercen esfuerzos de tracción los cuales deben ser evitados.

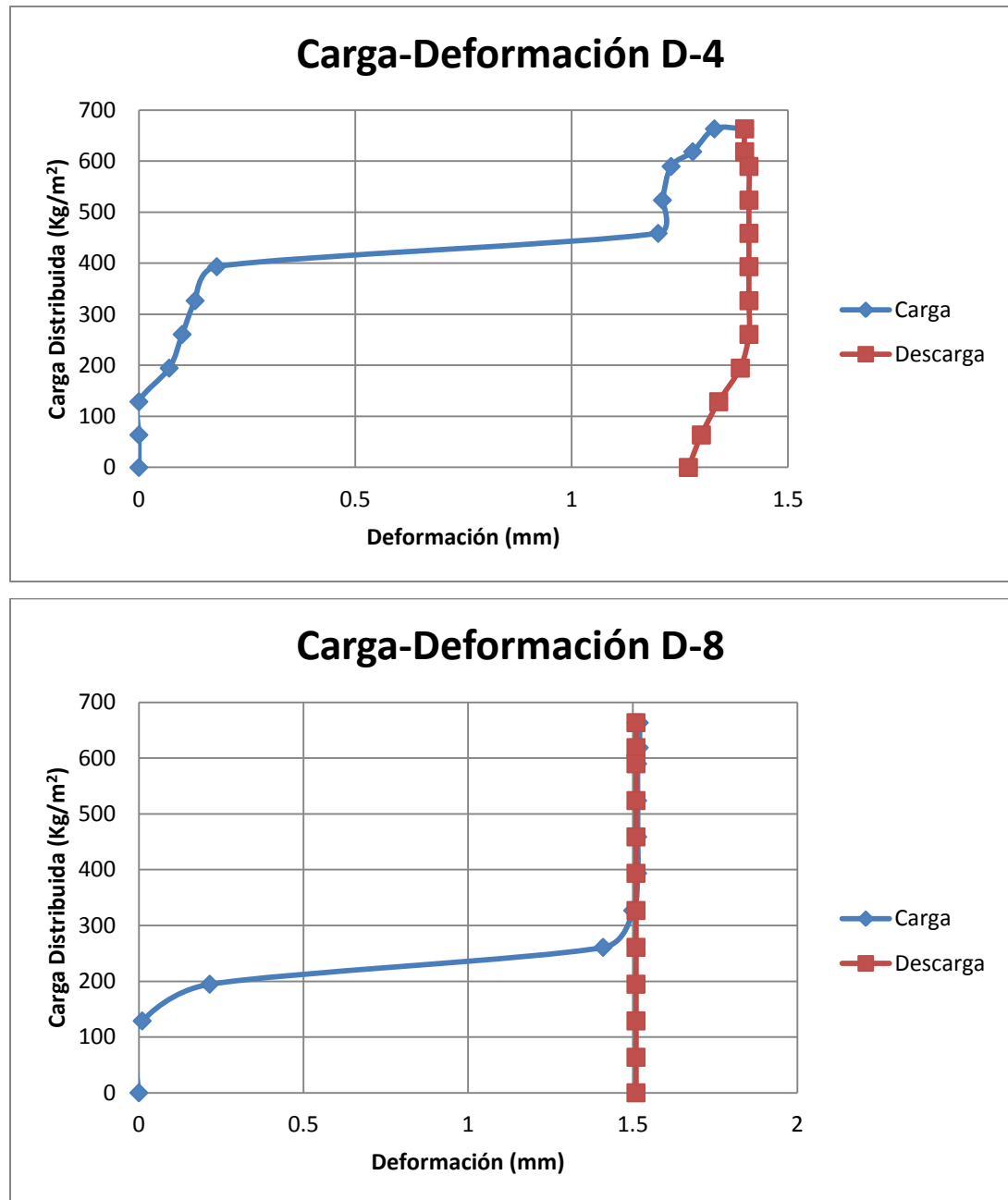
La reacción horizontal obtenida en la sección 4.3.3.1. es de 3 442 kg, la cual es absorbida por la resistencia a tracción de la varilla No. 5 diseñada en la sección 4.3.4.1. y según los datos obtenidos en los deformómetros D-4 y D-8 del ensayo de carga sobre el puente peatonal (ver tablas X y XI) , su comportamiento fue el siguiente:

Figura 45. Gráficas de deformómetros en apoyos ante la carga de diseño



Fuente: elaboración propia, en base a resultados de ensayo.

Figura 46. Gráficas de deformómetros en apoyos ante el 60 por ciento adicional a la carga de diseño



Fuente: elaboración propia, en base a resultados de ensayo.

Las graficas de la figura 45 corresponden a las lecturas tomadas en los deformómetros D-4 y D-8 colocados en los apoyos o cimientos del puente. La diferencia en el comportamiento de ambos cimientos, radica especialmente en que el cimiento B o apoyo del deformómetro D-4 fue construido nivelando el terreno, el cual necesitaba un relleno, pues el cimiento quedaba por encima de la superficie del terreno. Por otra parte el cimiento A del deformómetro D-8 fue enterrado y trabajado en un suelo firme.

Para el cimiento B la deformación máxima obtenida del deformómetro D-4 es de 1,5 milímetros, con una deformación remanente de 1,00 milímetros y una deformación permanente de 0,22 milímetros y para el cimiento A según los datos registrados en el deformómetro D-8, la deformación máxima es de 0,83 milímetros, esto es ante la carga de diseño.

Las gráficas de la figura 46 corresponden a las lecturas de deformómetros D-4 y D-8 mostrados en la tabla XI para el ensayo del puente peatonal con una carga aumentada un 60 por ciento a la carga de diseño, donde se observa para el deformómetro D-4 una deformación permanente de 1,23 milímetros después de la deformación del primer ensayo para hacer una deformación total de 1,45 milímetros.

En el deformómetro D-8 la deformación permanente es de 1,5 milímetros para el segundo ensayo, obteniendo en total una deformación de 2,33 milímetros en ambos ensayos.

Siendo los corrimientos en los apoyos de los arcos relativamente pequeños; 1,45 milímetros en el cimiento B y 2,33 milímetros en el cimiento, se concluye que efectivamente los tensores formados por varillas de acero absorbieron las tensiones horizontales.

5.6. Resistencia de la tubería PVC adicionada al mortero de relleno (grout)

El grout se define como un relleno estructural o un mortero especializado para el relleno de espacios vacíos. El grout o mortero de relleno tiene como característica principal la fluidez, alcanzando un revenimiento desde ocho hasta once pulgadas, lo cual permitió la adecuada colocación dentro de la tubería de PVC.

El objetivo principal de la aplicación de tubería PVC en el proyecto de un puente peatonal es aprovechar su forma cerrada para dar confinamiento al grout o mortero de relleno, limitando la expansión de su sección circular cuando esté bajo las solicitaciones de la carga y proveer resistencia a compresión adicional a la resistencia que posee el grout.

Para evaluar el aporte que de la tubería al grout cuando el arco está sometido a las cargas vivas de servicio, se realizó el ensayo respectivo de carga axial a dos testigos de grout y dos testigos de grout con tubo PVC, del cual se han obtenido los siguientes resultados:

Tabla XII. **Datos y resultados de ensayo de cilindro de grout 1**

CILINDRO DE GROUT 1					
	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Carga (Lb)	Carga (kg)	Peso (kg)
1	20,40	11,10	12 000	5 442,18	4,182
2	20,50	11,00			
3	20,50	11,20			
Promedio	20,47	11,10	12 000	5 442,18	4,18

Continuación de la tabla XII.

Área	(cm ²)	=	328,99
Volumen	(cm ³)	=	3651,80
Esfuerzo	(kg/cm ²)	=	16,54
Peso Vol	(kg/m ³)	=	1 145,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Datos y resultados de ensayo de cilindro de grout 2**

CILINDRO DE GROUT 2					
	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Carga (Lb)	Carga (kg)	Peso (kg)
1	20,70	11,30	11 000	4 988,66	4,23
2	20,90	11,10			
3	20,90	11,20			
Promedio	20,83	11,20	11 000	4 988,66	4,24

Área	(cm ²)	=	340,88
Volumen	(cm ³)	=	3 817,91
Esfuerzo	(kg/cm ²)	=	14,63
Peso Vol	(kg/m ³)	=	1 110,03

Fuente: elaboración propia, en base a datos de ensayo.

Del promedio de los datos obtenidos en el ensayo de los cilindros de mortero o grout se obtienen los siguientes valores:

Esfuerzo Último = 15.60 kilogramos por centímetro cuadrado.

Peso volumétrico = 1127.61 kilogramos por metro cúbico.

Tabla XIV. **Datos y resultados de ensayo de cilindro de grout y tubo 1**

CILINDRO DE GROUTY TUBO 1					
	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Carga (Lb)	Carga (kg)	Peso (kg)
1	20,5	11,50	22 000	9 977,32	4,45
2	20,50	11,50			
3	20,50	11,50			
Promedio	20,50	11,50	22 000	9 977,32	4,45

Área	(cm ²)	=	330,06
Volumen	(cm ³)	=	3795,73
Esfuerzo	(kg/cm ²)	=	30,23
Peso Vol	(kg/m ³)	=	1 172,90

Fuente: elaboración propia, en base a datos de ensayo.

Tabla XV. **Datos y resultados de ensayo de cilindro de grout y tubo 2**

CILINDRO DE GROUT Y TUBO 2					
	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Carga (Lb)	Carga (kg)	Peso (kg)
1	20,5	11,50	22 500	10 204,08	4,377
2	20,50	11,50			
3	20,50	11,50			
Promedio	20,50	11,50	22 500	10 204,08	4,38

Área	(cm ²)	=	330,06
Volumen	(cm ³)	=	3 795,73
Esfuerzo	(kg/cm ²)	=	30,92
Peso Vol	(kg/m ³)	=	1 153,14

Fuente: elaboración propia, en base a datos de ensayo.

Del promedio de los datos obtenidos en el ensayo de los cilindros de mortero o grout se obtienen los siguientes valores:

Esfuerzo Último = 30.57 kilogramos por centímetro cuadrado.

Peso volumétrico = 1163.02 kilogramos por metro cúbico.

Figura 47. **Ensayo a compresión de testigos**

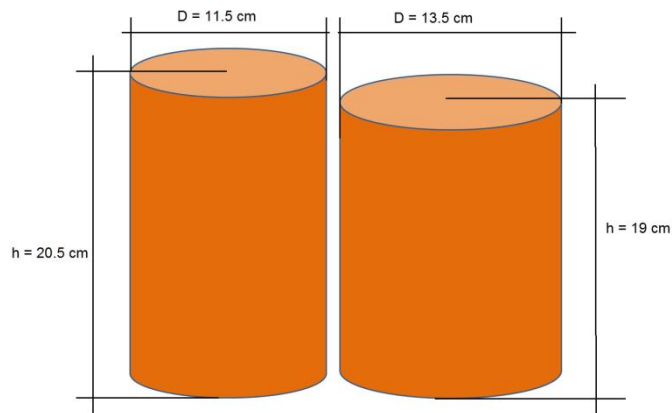


Fuente: Ensayo a compresión, Sección de Estructurasdel CII, USAC

El grout usado tiene un peso volumétrico de 1127 kilogramos por metro cúbico, por lo cual está en la categoría de morteros livianos y con este ensayo queda demostrado que la carga muerta de diseño es menor al peso real de la estructura para el cual se supuso un peso específico de 2400 kilogramos por metro cúbico.

El esfuerzo último soportado por los cilindros de mortero de relleno (grout) fue de 15.60 kilogramos por centímetro cuadrado y el esfuerzo último soportado por los cilindros de grout y tubo PVC fue de 30.5 kilogramos por centímetro cuadrado, logrando duplicar el máximo esfuerzo de los cilindros que no fueron reforzados con la tubería de PVC, haciendo notar también que al aplicar carga axial sobre los testigos confinados con tubería PVC, su sección se ensanchó debido al efecto de Poisson (ver figura 39), aumentando su diámetro un 17 por ciento y disminuyendo un 7,4 por ciento su altura.

Figura 48. **Cilindro deformado después de ensayo a carga axial**



Fuente: elaboración propia, con programa Power Point.

5.7. Comportamiento general de la estructura

El comportamiento general del puente peatonal en arco a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC, es aceptable pues se obtuvieron los resultados esperados de resistencia tanto en los arcos que forman el soporte principal de la estructura como en los cimientos y los tensores que resistieron las reacciones provocadas por las cargas de servicio.

En los módulos de ferrocemento se pudieron observar pequeñas grietas las cuales no representan daño considerable a la estructura pues solo afectaron el recubrimiento de los nervios y no pasaron el refuerzo a tensión del mismo, lo cual indica que dicho refuerzo no fluyó y como se analizó en la sección 5.2.3, la loseta o módulo de ferrocemento tiene capacidad de resistir más allá del doble de la carga para el cual fue diseñado.

La tubería PVC proveyó una resistencia adicional al grout, llegando en conjunto a duplicar la resistencia contemplada si hubiese trabajado solo el grout, con el análisis de resultados se comprueba que la tubería PVC tuvo una función estructural al resistir esfuerzos de compresión juntamente con el grout o mortero de relleno.

En los arcos no se presenta daño alguno, incluso después del segundo ensayo donde se aumentó la carga a un 60 por ciento a la carga de diseño, sus deformaciones fueron relativamente pequeñas al igual que en los cimientos no se presentó alguna grieta. Por lo antes mencionado se puede decir que el puente peatonal a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC mantuvo su integridad estructural en todo el proceso del ensayo.

CONCLUSIONES

1. Los módulos de ferrocemento al ser evaluados por medio de los ensayos experimentales, mostraron una resistencia a soportar carga tres veces mayor a los parámetros de diseño.
2. La utilización del grout, permite que el mortero fluido con alto valor de revenimiento ingrese por los orificios en el tubo PVC y pueda rellenar toda su área.
3. El comportamiento de los arcos de grout, ante las cargas aplicadas fue muy aceptable, pues su deformación real en la clave fue menor al diez por ciento de la deformación permitida en el análisis estructural.
4. La capacidad en los arcos de resistir cargas aumentó un cien por ciento adicional a causa de la aportación de resistencia a esfuerzos de compresión por parte de la tubería PVC.
5. Por medio de ensayos de carga axial a testigos de grout y testigos de grout más tubería PVC, se demostró que la capacidad de resistencia adicionada por la tubería, permitió duplicar la resistencia contemplada solo por el grout.
6. El comportamiento general del puente como sistema estructural, es aceptable pues aún después del ensayo con la carga de diseño aumentada en un sesenta por ciento, mantiene su integridad estructural.

RECOMENDACIONES

1. En el diseño de puentes de mayor luz con el sistema presentado, se debe aumentar la contraflecha para que el arco trabaje eficientemente.
2. En la aplicación de un puente peatonal a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC, se recomienda diseñar estribos como estructura de contención para evitar problemas con los tensores colocados para efectos de ensayo.
3. Aunque la capacidad de resistencia a compresión de la tubería PVC contribuye a la resistencia del grout, es importante dejar la inquietud sobre la utilización de otro material que pueda moldearse en forma de arco con facilidad.
4. El sistema de puente peatonal a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC, puede utilizarse para una luz máxima de diez metros.
5. Aplicar un forro de malla de gallinero cubierta por mortero a la tubería PVC para evitar cristalización a causa de la radiación solar.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria*
1. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. 170 p.
2. ARIZ, Crisanto. *Diseño para puentes de arco con losa prefabricada de hasta diez metros de longitud*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 151 p.
3. CELIGÜETA, Juan Tomás. *Curso de análisis estructural*. España: ENUSA, 1998. 652 p.
4. COMITÉ ACI 318 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-08) y Comentario (ACI 318SR-08)*. Estados Unidos: ACI, 2008. 519 p.
5. CRUZ PINEDA, Daniel Alfredo. *Diseño de puente de mediana longitud utilizando las normas de la asociación guatemalteca de ingeniería estructural y sísmica*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 92 p.
6. MEDINA, Jorge. *Arco. Sistemas estructurales*. Universidad de Los Andes Venezuela, Facultad de Arquitectura y Diseño, 2013. 18 p.

7. Polivinilo. [en línea]. <<http://www.aniq.org.mx/provinilo/PVC.asp>> [Consulta: agosto de 2013].
8. OVANDO FERNÁNDEZ, Erwin Estuardo. *Diseño y cálculo de una pasarela de metal*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 189 p.
9. RODRÍGUEZ SERQUÉN, *Puentes con AASHTO-LRFD 2007*, Lima Perú. 2012. 337 p.
10. RUIZ FAJARDO, Byron Estuardo. *Viviendas prefabricadas en ferrocemento*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 93 p.
11. VÁSQUEZ ALFARO, Luis Fernando. *Losas plegadas de ferrocemento*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 106 p.
12. WINTER, George; NILSON, ArthurH. *Proyecto de estructuras de hormigón*. Bogotá, Colombia: Reverté, 1977. 721 p. ISBN 8429120769.

ANEXOS

Informe de ensayo de carga a puente peatonal en arco a base de módulos de ferrocemento y tubería PVC, ensayo de flexocompresión de módulos de ferrocemento y ensayo de carga axial a cilindros de grout y cilindros de grout mas tubería PVC, documento certificado por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.



INTERESADO: Daniel Alexander Herrera Velásquez
FECHA: Junio 2013
ASUNTO: Diseño de Puente peatonal en Arco a Base de Módulos de Ferrocemento y Tubería PVC

ENSAYO DE CARGA DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC

El estudiante interesado, solicitó los servicios de la Sección de Estructuras del CII, para realizar los ensayos necesarios para evaluar la capacidad de carga del sistema de puente peatonal en arco, como de los elementos constitutivos del mismo.

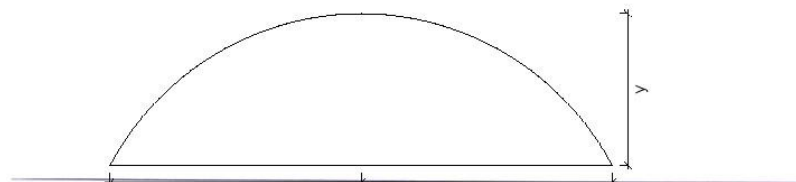
DE LA MUESTRA

Características Geométricas:

El Puente peatonal en arco a base módulos de ferrocemento y Tubería PVC está formado por dos arcos paralelos (ver figura 2), el arco inferior, es el que soportará directamente los módulos de ferrocemento por donde se han de transportar las personas, que se designan como cargas de servicio; la geometría de los arcos se desarrollan con la ecuación general de la parábola:

$$y = ax^2 + b$$

Figura 1: Geometría de arcos





Para arco superior con contra flecha 1.80m y 6 metros de luz

$$y = -0.2x^2 + 1.8$$

X	Y
-3	0
0	1.8
3	0

Para arco inferior con contra flecha 0.90 m y 6 metros de luz

$$y = -0.1x^2 + 0.9$$

X	Y
-3	0
0	0.9
3	0

Figura 2: Elevación

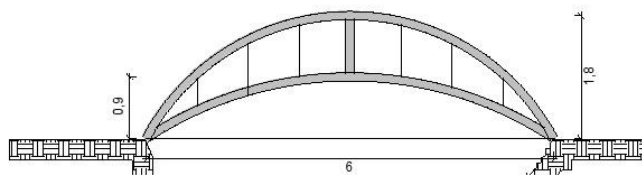




Figura 3: Planta

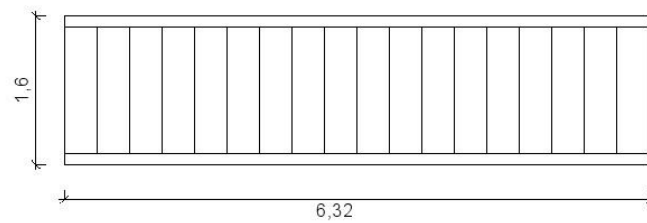
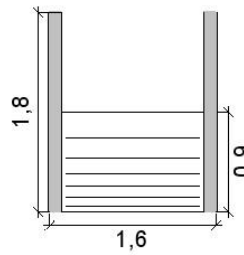


Figura 4: Vista frontal del puente





Fundamento Teórico

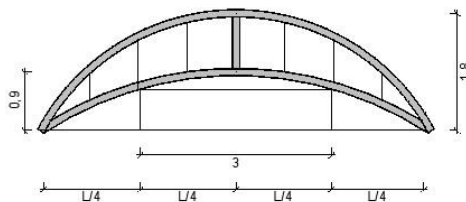
El objetivo del ensayo es estudiar el comportamiento de la estructura ante la carga de diseño y comprobar las deformaciones causadas por dicha carga aplicada, para lo cual se han tomado las siguientes consideraciones:

- Se utilizó la combinación de cargas propuestas en el apéndice C del Código ACI318-08

$$U=1.4C_m+1.7C_v$$

- La carga viva se tomó en base a lo especificado en la AASHTO 3.6.1.6
418 kg/m²
- La carga muerta está en base del peso de cada uno de los elementos de la estructura.
- La deformación permisible tomada en la proyección horizontal del recorrido del perímetro entre los dos cuartos centrales del arco

Figura 5: División de la luz en L/4



$$Def_{max} = \frac{l}{180}$$



PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Después de realizar el análisis y diseño estructural se procede a la construcción del puente peatonal a base de módulos de ferrocemento y tubería de pvc.

- **Doblado de tubos**

Los tubos de pvc de cuatro pulgadas de diámetro permiten dar forma a la estructura en arco, aprovechar su resistencia a compresión para ser adicionada al concreto y aprovechar la forma cerrada del tubo para ayudar al confinamiento del concreto que será colado dentro de los tubos.

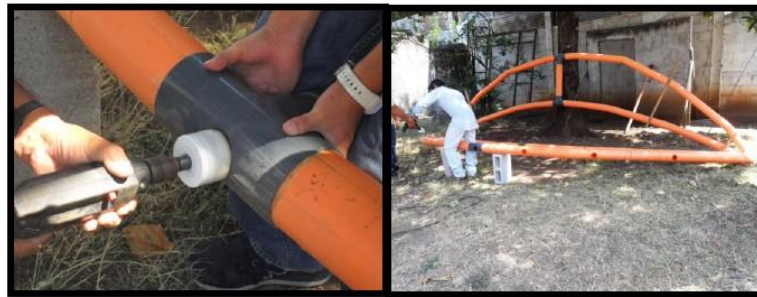
- Se llenó de arena el tubo para evitar que el vacío dentro de éste, provoque arrugas en los puntos de dobles al momento de calentarlo para darle la forma de la curvatura.
- Se construyó un tablero vertical con soportes de la forma de medio arco como guía de la trayectoria del mismo.
- Se colocó el tubo lleno de arena en el tablero y se aplicó calor con una pistola de aire caliente en los puntos de flexión teórica, para formar la curvatura.





- **Perforar el tubo**

Se procedió a perforar el tubo en forma de arco con brocas circulares de dos pulgadas de diámetro, para permitir el ingreso del concreto al momento de ser colado.



- **Cimientos**

Se realizó la armadura para hacer los cimientos de 40 cm x 40 cm de sección y una longitud de 1.75 metros y se fundió el concreto en las armaduras o cimbras.





- **Fundición de primera parte de los cimientos**

Se procedió a colocar el concreto a una altura aproximadamente a la mitad de la profundidad de los cimientos para anclar el arco y posteriormente fundirlo.

- **Amar y nivelar la estructura de pvc**

Previo a colocar el concreto dentro de la tubería de pvc, se armó la estructura, se niveló y se fijó con soportes adicionales temporales para mantener su posición.





- **Colocar tensores verticales**

Se colocaron doce tensores distribuidos sobre los arcos con la finalidad estructural de integrar el arco superior con el inferior y permitir que cuando el arco inferior requiera resistencia adicional, por medio de dichos tensores hará trabajar al arco superior.

Estos tensores con varillas de acero de diámetro 3/8" se le añadió en los extremos espárragos de acero galvanizado del mismo diámetro para poder ajustar la longitud de los tensores enroscando tuercas en dicho elemento.

- **Colocar tensores horizontales**

Los tensores horizontales son varillas de acero de 5/8" de diámetro cuya área fue calculada para resistir las fuerzas horizontales producidas en los cimientos por los extremos de los arcos, esto con la finalidad de simular la estructura que ha de soportar los esfuerzos de tensión horizontal.





- **Fundición del concreto**

Teniendo la estructura armada y nivelada se realizó la fundición de la segunda parte de los cimientos y luego se coló el concreto en los orificios previamente realizados en los tubos, comenzando en las partes bajas a las partes altas, colocando tapones hechos con pedazos del mismo tubo para evitar que se saliera el concreto por los orificios de abajo.

Características del concreto en tubos:

Resistencia	300 kg/cm ²
Agregado grueso:	1/8 "
Proporción	1:1.5:1.5
Volumen	0.24 m ³





- **Rigidizante al centro de la luz**

Se colocó al centro de la luz del puente un rigidizante que une los dos arcos inferiores para evitar los esfuerzos de torsión, este rigidizante es cualquier elemento estructural que permita dar rigidez y por lo mismo integridad estructural en esta parte del puente, en este caso se usó una varía de acero de diámetro de 1".





- **Rigidizante lateral**

La función de este elemento es evitar que por alguna situación se produzcan el volteo en el arco superior y para ello se reforzó la estructura con dos ganchos en ambos lados que van embebidos en el concreto dentro de los tubos de pvc.



Loseta prefabricada de ferrocemento (Modulo de ferrocemento)

El ferrocemento es un material liviano compuesto por mortero que se adhiere a una armadura la cual puede ser un enmallado y lograr así, resistencia a tensión y un buen comportamiento contra el agrietamiento. Siendo el ferrocemento una estructura delgada puede ser relativamente ligera, impermeable y resistente al impacto.



- **Armadura:**

Se realizó una armadura utilizando electromalla soldada grado 70 con un espaciamiento de 15 cm y área de acero de $0.884 \text{ cm}^2/\text{m}$

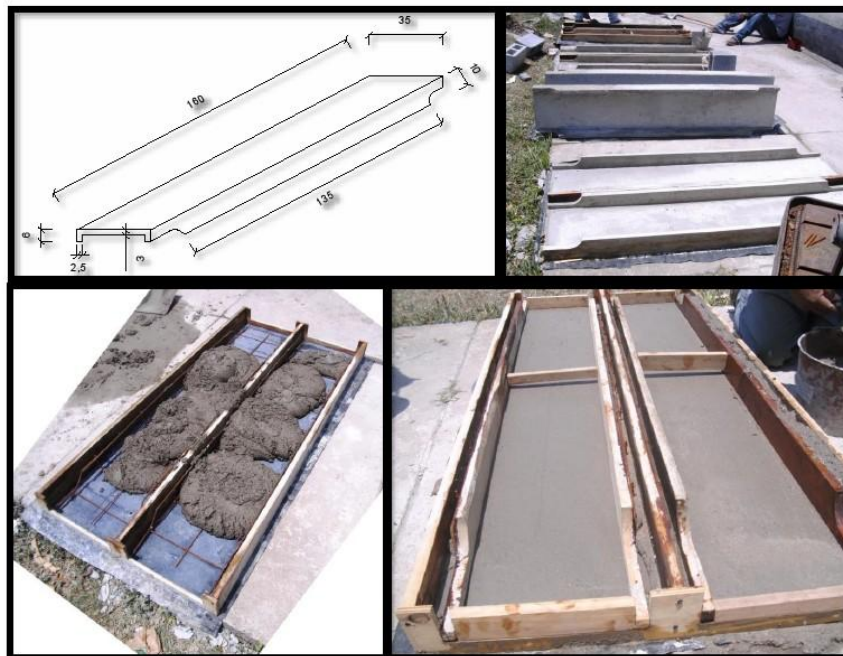


- **Mortero:**

El mortero es una mezcla de cemento y arena en proporciones 1:2 con una resistencia de 280 kg/cm^2

- **Cimbra**

Se diseñó y construyó un encofrado especial con la forma del módulo de ferrocemento.





- **Ensamblaje de módulos de ferrocemento en los arcos**

Habiendo llegado a la edad de 28 días la estructura de soporte (arcos) y los módulos de ferrocemento, se procedió a unificar el sistema colocando cada uno de los módulos sobre los arcos, quienes sirven como diafragma transportando las cargas soportadas hacia el cimiento y del cimiento finalmente al suelo.





ENSAYO DE PUENTE PEATONAL EN ARCO A BASE DE MÓDULOS DE FERROCEMENTO Y TUBERÍA PVC

Se realizó el ensayo de carga sobre el sistema de losetas con la finalidad de comprobar la resistencia de para la cual fue diseñada siendo esta:

Carga viva 418 kg/m^2

El ensayo consiste en simular carga viva aplicando cilindros de concreto de pesos conocidos sobre la losa de forma progresiva y tomando nota de su respectiva deformación con la ayuda de ocho deformómetros distribuidos en varios puntos de interés.

- **Procedimiento de ensayo**

Se preparó el área a cargar, dividiendo en sectores que nos permitirán distribuir la carga uniformemente sobre toda la superficie.





Se aplica carga distribuida en toda el área de la estructura en varias capas de aproximadamente el 15% de la carga de diseño, para lo cual se toma la lectura de cada uno de los deformómetros.

Este procedimiento se realiza hasta completar la carga de diseño, se verifican las posibles grietas, deformaciones y el comportamiento en general de la estructura.





Se deja la estructura con la carga aplicada durante 24 horas y se vuelve a verificar nuevas grietas y cambios de lectura en los deformómetros.



Se procede a descargar el puente de forma inversa a la se cargó en rangos del 15% de la carga de diseño y se toman lecturas de las deformaciones con el fin de determinar la deformación remanente y realizar los análisis correspondientes.



Ya descargado el puente, se esperan nuevamente 24 horas para volver a tomar lecturas y verificar el acomodo y deformación recuperada.



Ensayo Aplicando el 60% adicional ala carga de diseño

Con este ensayo se pretende comprobar la resistencia de la estructura con un sobre peso lo cual fue considerado al mayorar las cargas según lo especifica el Código ACI en el Apéndice C.

El procedimiento es similar al ensayo anterior aplicando carga y aumentándola gradualmente en un 15% hasta llegar a un 60% adicional a la carga de diseño, para lo cual es necesario tomar las lecturas en los diferentes deformómetros y poder así, comparar los resultados anteriores con estos nuevos resultados.



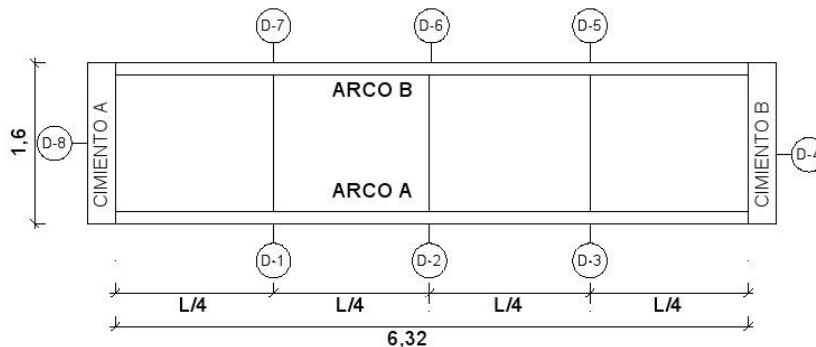


Después de aumentar la carga en un 60%, nuevamente se esperaron 24 horas antes de descargar en el orden inverso al de la carga hasta dejar completamente descargado el puente y así obtener la máxima deformación debido a las cargas de servicio y las cargas mayoradas.

Datos de Obtenidos del ensayo

Los datos que a continuación se muestran fueron obtenidos de las lecturas de los diferentes deformómetros los cuales fueron colocados en ciertos puntos críticos y de interés para poder conocer el comportamiento de la estructura ante las cargas aplicadas.

Los deformómetros fueron colocados tal como lo muestra la gráfica:



Para su mejor comprensión los datos fueron tabulados de tal manera que para cada carga acumulada, se pueda observar su respectiva deformación.



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

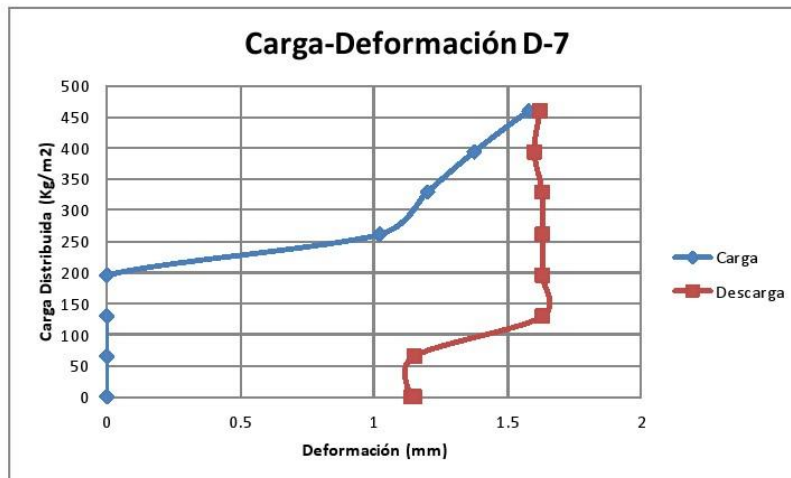
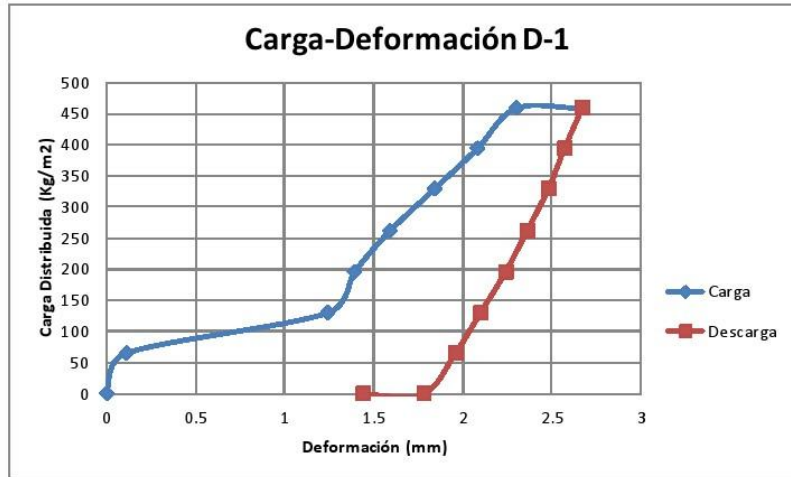
INFORME No. Puente junio 2013 O.T. 31521

Página 21 de 47

Carga/Des carga Kg	Carga Distribuida kg/m ²	Deformación Acumulada 1 mm	Deformación Acumulada 2 mm	Deformación Acumulada 3 mm	Deformación Acumulada 4 mm	Deformación Acumulada 5 mm	Deformación Acumulada 6 mm	Deformación Acumulada 7 mm	Deformación Acumulada 8 mm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
525	65.38	0.11	0.1524	0.1016	0.02	0.22	0.22	0	0.09
1046.3	130.30	1.24	0.508	0.3556	0.02	0.47	0.57	0	0.23
1570.7	195.60	1.39	0.9906	0.5588	0.05	0.78	1.04	0	0.41
2100.8	261.62	1.59	1.5748	0.889	0.12	1.14	1.61	1.02	0.71
2644	329.27	1.84	2.159	1.3208	0.13	1.49	2.04	1.2	0.81
3163.9	394.01	2.08	2.7051	1.7272	0.19	1.83	2.5	1.375	0.81
3689.4	459.45	2.3	3.1496	2.1336	0.24	2.26	3.04	1.58	0.82
3689.4	459.45	2.67	4.191	2.667	1.55	2.84	3.81	1.62	0.83
3163.9	394.01	2.57	3.9751	2.4892	1.55	2.64	3.53	1.6	0.82
2644	329.27	2.48	3.7592	2.3114	1.55	2.44	3.45	1.63	0.82
2100.8	261.62	2.36	3.5941	2.1082	1.54	2.26	3	1.63	0.82
1570.7	195.60	2.24	3.2258	1.8034	1.52	1.83	2.58	1.63	0.82
1046.3	130.30	2.1	2.8702	1.5494	1.48	1.55	2.15	1.63	0.82
525	65.38	1.96	2.4892	1.2446	1.44	1.2	1.76	1.15	0.82
0	0.00	1.78	2.1082	0.9398	1.26	0.91	1.64	1.14	0.82
0	0.00	1.44	1.5113	0.5334	0.22	0.51	1.53	1.15	0.29



ANÁLISIS DE GRAFICA DEFORMOMETROS EN EXTREMOS



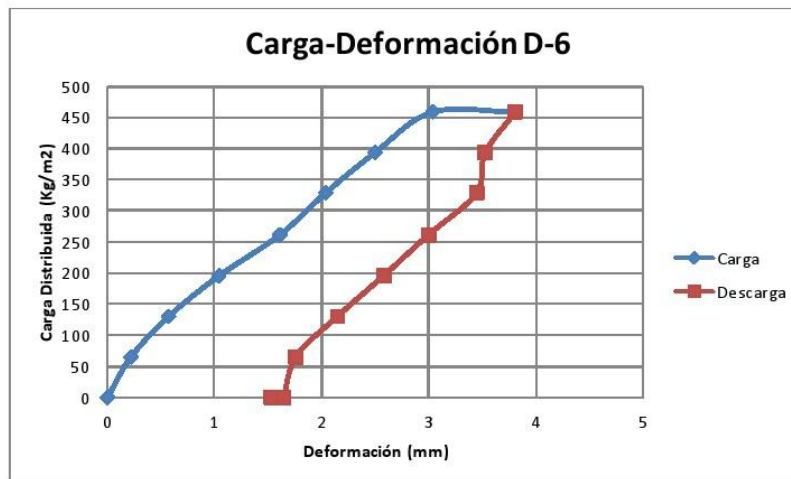


Análisis:

- La diferencia marcada en el comportamiento de ambos gráficos se debe principalmente a la irregularidad en el extremo estudiado de ambos arcos. En el arco A (deformómetro 1) la curvatura es mayor que en el arco B (deformómetro 7) siendo éste un plano inclinado y no un arco, para esta sección, lo cual produce cierto efecto de torsión antes de empezar a deformarse con las mismas características del arco A (deformómetro 1).
- La deformación permanente es muy similar para ambos arcos después de 24 horas soportando carga, siendo de aproximadamente 1.3 mm, esto es ante la sollicitación de la carga de diseño de 418 kg/m².
- Al momento de descargar el sistema, las lecturas en el deformómetro 7 muestran recuperación casi nula al principio, debido a que en las primeras descargas su recuperación fue debido al esfuerzo de torsión y no a esfuerzos axiales. Es hasta la sexta descarga cuando ya se han retirado el equivalente a 329 kg/m² cuando se observa una deformación aproximada de 0.5 mm como parte de la recuperación que tuvo el sistema en esa zona.



ANÁLISIS DE GRAFICA DEFORMÓMETROS EN EL CENTRO DEL CLARO



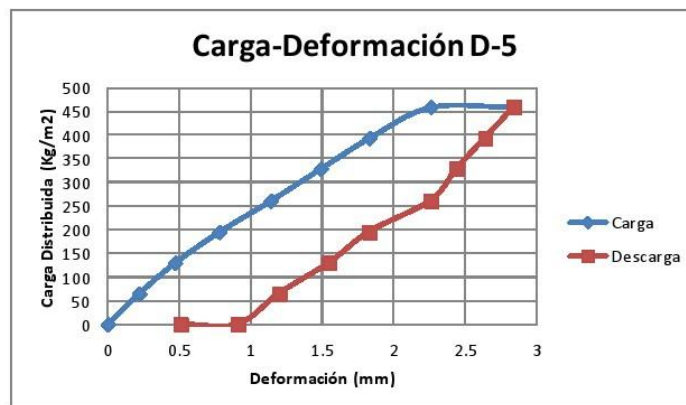


ANÁLISIS

- En general el comportamiento de ambas graficas se ve muy similar en la proporcionalidad, al aumentar la carga su deformación permanece constante, lo cual indica que en este punto ambos arcos trabajaron como sistema en conjunto teniendo el mismo comportamiento ante los esfuerzos solicitados.
- La deformación permanente después de 24 horas después descargar el sistema, para ambos arcos al centro de la luz es aproximadamente 1.50 mm, por lo que se considera que ambos mantuvieron el mismo comportamiento no solo en el momento de carga-descarga sino también al recuperarse cuando se le retiró toda la carga.
- Al mantenerse cargada la estructura por 24 horas la deformación en el en el arco B mostrada en el deformómetro 6, se acomodó de tal manera que su deformación en ese lapso de tiempo fue menor que la deformación en el arco A.



ANÁLISIS DE GRAFICA DE EXTREMOS

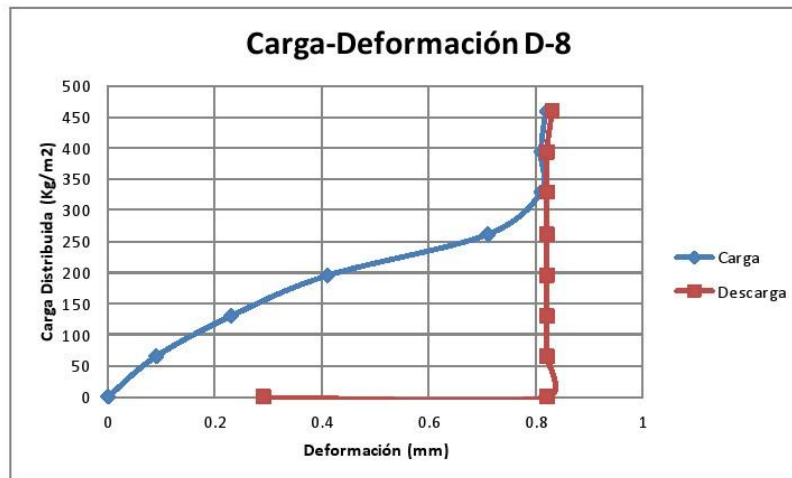
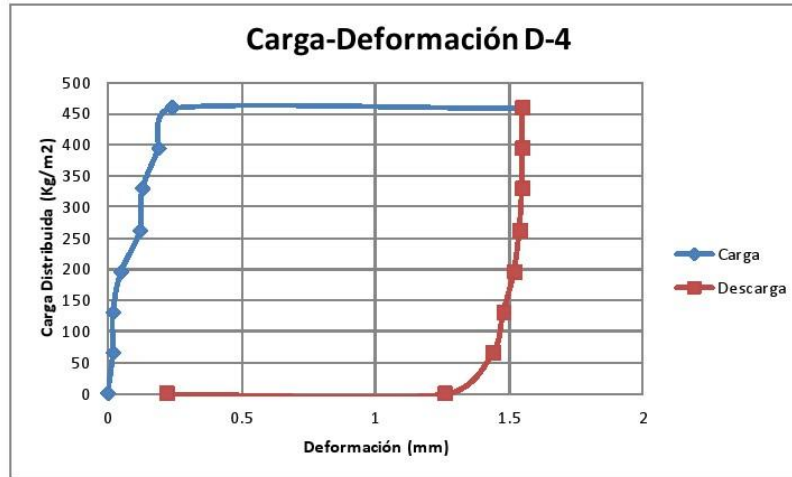


ANÁLISIS

- Para este caso los arcos A y B trabajaron al mismo tiempo y de la misma forma lo cual se puede contemplar en las graficas de los deformómetros 3 y 5 que tienen las mismas características alcanzando en ambos gráficos una deformación máxima de 2.7 mm, una deformación remanente de 0.5 mm y una deformación permanente de 0.5mm



ANÁLISIS DE GRAFICA DE DEFORMÓMETROS EN APOYOS





ANÁLISIS

- La diferencia en el comportamiento de las graficas de los apoyos representadas por las lecturas tomadas en los deformómetros 4 y 8, radica especialmente en que el cimiento B o apoyo del deformómetro 4 fue construido nivelando el terreno, el cual necesitaba un relleno, pues el cimiento quedaba por encima de la superficie del terreo. Por otra parte el cimiento A del deformómetro 8 fue enterrado y trabajado en un suelo firme.
- Para el cimiento B en el proceso de carga las deformaciones fueron minimas alcanzando un máximo de 0.24 mm de corrimiento pero al estar cargado el puente por 24 horas llegó a una deformación máxima de 1.5 mm, lo mismo sucedió al descargar la estructura la recuperación fue lenta, no fue hasta pasar 24 horas sin carga que se vio la recuperación en el corrimiento logrando alcanzar una deformación remanente de 1 mm y una deformación permanente de 0.22 mm.
- El cimiento A según los datos registrados en el deformómetro 8, el comportamiento al cargarse el sistema fue creciendo la deformación conforme crecía la carga aplicada lo que significa que entre más carga se aplicó más se fue corriendo el cimiento hasta aplicársele una carga de 261 kg/m², luego de esto dejó de deformarse y aun pasando 24 horas con la carga aplicada ya no se registró corrimiento en el cimiento.
- Al descargar la estructura se pudo observar que no presentó recuperación en su deformación, fue hasta las 24 horas sin carga que se pudo observar la recuperación y concluir así que en el cimiento B la deformación remanente fue de 0.5mm y la deformación permanente es de 0.3 mm.
- La lectura de los deformómetros en los apoyos es diferente a las demás graficas mostradas anteriormente, esto se debe a que en los apoyos solo se registra la componente horizontal de las fuerzas aplicas, esto sucede cuando el arco tiende a abrirse ante las cargas aplicadas.

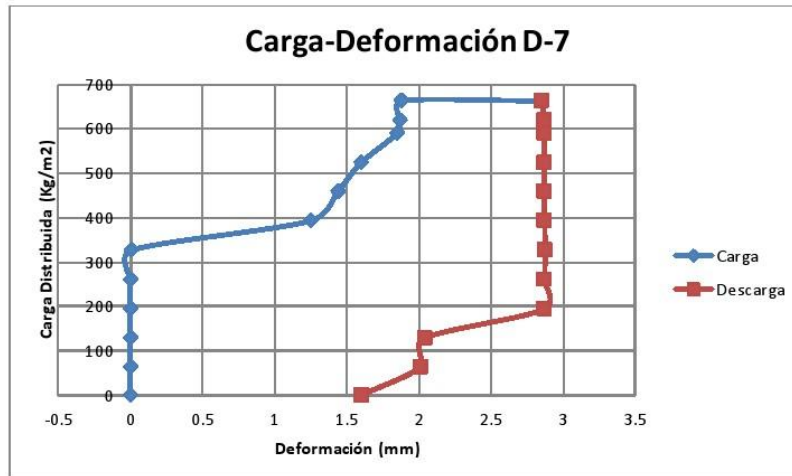


DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO APLICANDO 60% DE CARGA ADICIONAL A LA CARGA DE DISEÑO

Carga Kg	Carga Distribuida	Deformación Acumulada 1	Deformación Acumulada 2	Deformación Acumulada 3	Deformación Acumulada 4	Deformación Acumulada 5	Deformación Acumulada 6	Deformación Acumulada 7	Deformación Acumulada 8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
511.3	63.67	0.14	0.2159	0.1016	0	0.2	0.07	0	-0.01
1034.1	128.78	0.17	0.5969	0.3556	0	0.46	0.15	0	0.01
1562.6	194.60	0.34	0.9525	0.5588	0.07	0.74	0.48	0	0.215
2093.2	260.67	0.45	1.4351	0.889	0.1	1.05	0.9	0	1.41
2623.4	326.70	0.54	1.7272	1.3208	0.13	1.33	1.25	0.005	1.5
3158.9	393.39	0.68	1.9939	1.7272	0.18	1.57	1.56	1.25	1.515
3683.4	458.70	0.79	2.2733	2.2352	1.2	1.875	1.95	1.44	1.515
4205.2	523.69	0.97	2.6797	2.54	1.21	2.16	2.28	1.6	1.515
4735.81	589.76	1.12	2.9337	2.8448	1.23	2.45	2.66	1.85	1.515
4967.31	618.59	1.13	3.1369	3.048	1.28	2.66	2.91	1.87	1.52
5326.71	663.35	1.21	3.4163	3.3274	1.33	3.035	3.3	1.88	1.52
5326.71	663.35	1.57	4.0132	4.826	1.4	3.66	3.99	2.85	1.51
4967.31	618.59	1.53	3.9751	4.572	1.4	3.56	3.87	2.87	1.51
4735.81	589.76	1.48	3.9243	4.2926	1.41	3.46	3.78	2.87	1.51
4205.2	523.69	1.41	3.7465	4.0132	1.41	3.26	3.51	2.87	1.51
3683.4	458.70	1.31	3.5941	3.7592	1.41	3.06	3.41	2.87	1.51
3158.9	393.39	1.22	3.3147	3.429	1.41	2.8	2.94	2.87	1.51
2623.4	326.70	1.1	3.0861	3.1242	1.41	2.59	2.67	2.875	1.51
2093.2	260.67	0.97	2.8575	2.8956	1.41	2.28	2.42	2.87	1.51
1562.6	194.60	0.82	2.4765	2.4638	1.39	1.98	1.89	2.87	1.51
1034.1	128.78	0.67	2.0701	2.0066	1.34	1.65	1.6	2.04	1.51
511.3	63.67	0.46	1.6129	1.6764	1.3	1.32	1.42	2.01	1.51
0	0.00	0.27	1.2319	1.0668	1.27	0.97	0.695	1.6	1.51



ANÁLISIS DE GRAFICA DEFORMOMETROS EN EXTREMOS



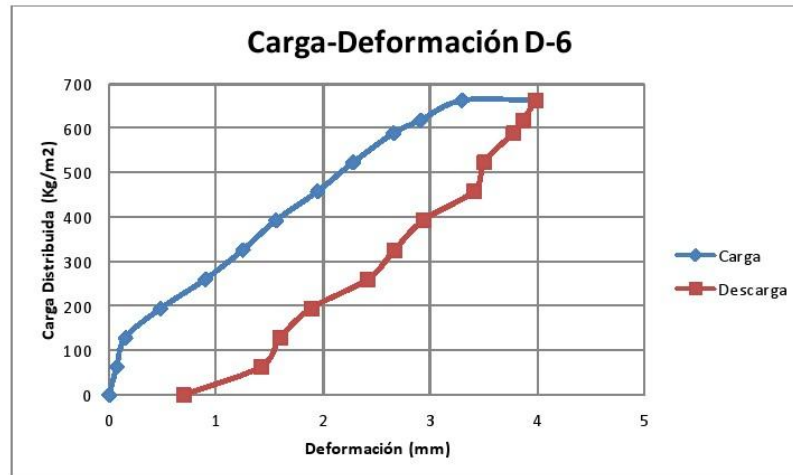


ANÁLISIS

- Se mantuvo el mismo comportamiento del ensayo anterior para el análisis de las cargas versus deformaciones en esta sección de los arcos, enfatizando que en el deformómetro 7 se observa que, debido a efectos de torsión, el sistema empieza a mostrar deformación hasta aplicarle 393 kg/m² de carga.
- La deformación permanente mostrada por el deformómetro 7 para el arco B es de 1.15 mm, y para el arco A es menor a 0.5 mm.
- Se puede observar en general que los arcos estuvieron trabajando en la zona elastoplástica, esto se concluye después de observar la gran cantidad de deformación remanente y poca deformación permanente
- El límite proporcional puede apreciarse cuando la carga distribuida llega a 458 kg/m².
- El límite elástico se encuentra al aplicarle 663 kg/m² de carga, para el deformómetro 7 pues es allí donde la deformación empieza a ser permanente.



ANÁLISIS DE GRAFICA DEFORMÓMETROS EN EL CENTRO DEL CLARO



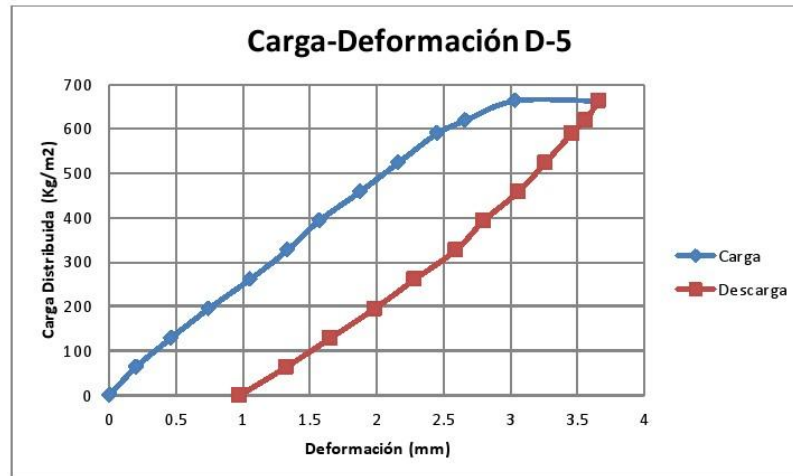
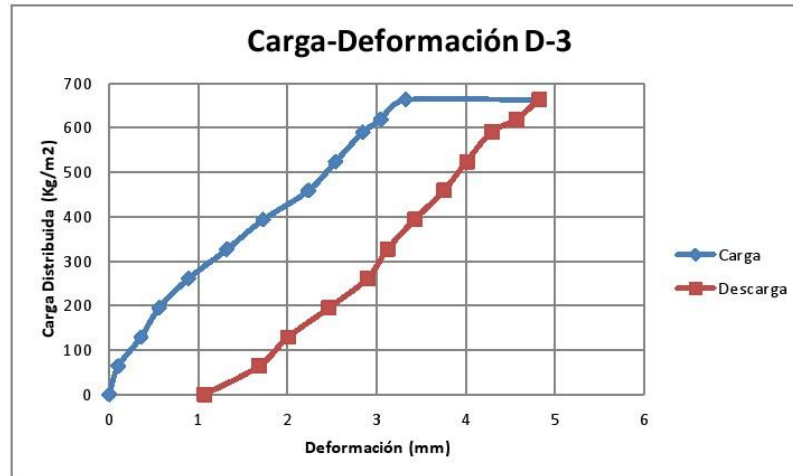


ANÁLISIS

- Así como en el ensayo a la carga de diseño, en este ensayo ambos gráficos mantienen características muy similares llegando a una deformación máxima de 4 mm y recuperándose casi 3 mm, con esto se concluye que en la clave de los arcos los esfuerzos fueron distribuidos uniformemente y soportados bajo iguales condiciones por ambos arcos.
- Para ambas lecturas la proporcionalidad de las deformaciones provocadas por las cargas fueron constantes hasta los últimos datos obtenidos haciendo trabajar la estructura solamente en su zona elasto-plástica.
- En el deformómetro 2 se observa que el límite de proporcionalidad esta justo al aplicar 458 kg/m².
- El límite Elástico se encuentra cuando la estructura soporta una carga de 618 kg/m².



ANÁLISIS DE GRAFICA DE DEFORMOMETROS EN EXTREMOS



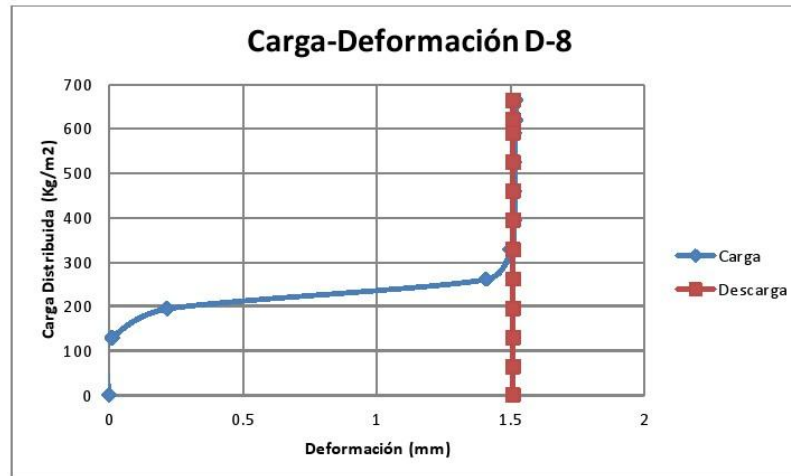
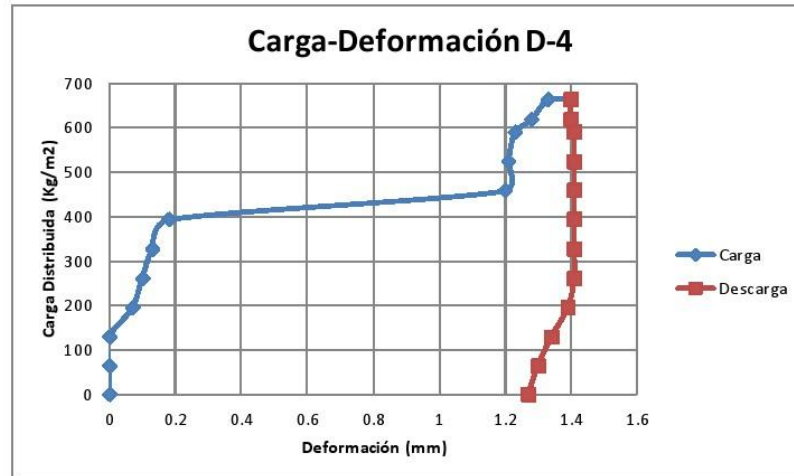


ANÁLISIS

- Se observa a ambos arcos trabajando bajo condiciones similares, manteniendo una proporcionalidad constante hasta mantener una carga constante por 24 horas a lo cual su respuesta es una deformación de aproximadamente 1 milímetro para el deformómetro 3 y 0.5 mm para el deformómetro 5.
- Al descargar la estructura, se observó una recuperación constante hasta obtener una deformación permanente en ambos arcos de 1 mm, sin que la estructura haya llegado a ceder.
- El comportamiento de los datos es proporcional hasta llegar los 458 kg/m^2 , observado en la grafica del deformómetro 3.
- El comportamiento es elastoplástico sin llegar a la zona plástica pues en tal caso la deformación sería permanente y no hubiera existido la deformación remanente mostrada en la grafica de aproximadamente 2.6 mm



ANÁLISIS DE GRAFICA DEFORMÓMETROS EN APOYOS





ANALISIS

- Siendo estas gráficas las representantes de los esfuerzos horizontales transmitidos a los cimientos, su comportamiento es distinto a las fuerzas axiales soportadas en un punto del arco.
- Para el cimiento B el deformómetro 4 mostró una lectura casi uniforme en su deformación hasta llegar a la componente horizontal respectiva para 195 kg/m^2 , siendo casi nula la deformación para luego tener una deformación mayor de casi de 2 mm, como se explicó en el análisis del ensayo anterior para esta grafica, ese movimiento brusco se debe a que este cimiento no estuvo en contacto directo a suelo firme por lo cual tendió a desplazarse.
- Con carga aplicada por 24 horas se observa una deformación máxima para ambos cimientos aproximadamente de 1.5 mm y siendo muy poca su deformación remanente, con lo cual se concluye que hubo una deformación permanente de 1.3 mm
- En el cimiento A fundido en suelo firme, al aplicarle la carga constante se obtuvo una deformación de 1.5 mm cuando llegaba a los 260 kg/m^2 y luego dejó de deformarse, esto es porque empezaron a trabajar en este instante los tensores horizontales que permitieron resistir las fuerzas en los cimientos, absorbiendo éstos, los esfuerzos inducidos en el plano horizontal.



CONCLUSIONES:

Estas son conclusiones para el comportamiento general de la estructura especialmente en el centro de la luz.

- El límite Elástico se encuentra cuando la estructura soporta una carga de 618 kg/m^2 .
- El límite proporcional se encuentra cuando la estructura soporta una carga de 458 kg/m^2 .
- La Resiliencia se encontró con el área bajo la curva hasta llegar al límite elástico, el área fue obtenida con la ecuación de grado 4 obtenida Microsoft Excel $y = -8.4201x^4 + 55.525x^3 - 110.24x^2 + 256.29x + 5.2535$, integrándola hasta el límite elástico, dando como resultado 721.14 kg/m^2 y el Módulo de Resiliencia se puede observar en la gráfica del deformómetro 6 que está en 129 kg/m^2 .
- Debido al confinamiento proporcionado por el tubo pvc, se observa que se obtuvo una deformación máxima de 4 mm pero la deformación permanente al entrar a la zona elastoplástica fue de 1 mm.
- El sistema estructural en conclusión mantuvo su integridad aun después de aplicarle un 60% adicional de la carga de diseño.
- En las losetas o módulos de ferrocemento no se observó daño considerable pero en los nervios de éstas, se apreciaron grietas haciéndose visible en mortero hasta antes del refuerzo a tensión sin que éste fluyera o presentara grandes deformaciones.
- Las deformaciones en el arco con la estructura cargada no pasaron de los 4 mm y después de retirar la carga la deformación permanente no sobrepasó los 1.5 mm.



ENSAYO A FLEXIÓN DE LOS MÓDULOS DE FERROCEMENTO

Cuando los módulos de ferrocemento llegaron a la edad de 28 días, en los cuales se sabe que el concreto llega a su mayor resistencia, se realizó el ensayo procediendo de la siguiente manera

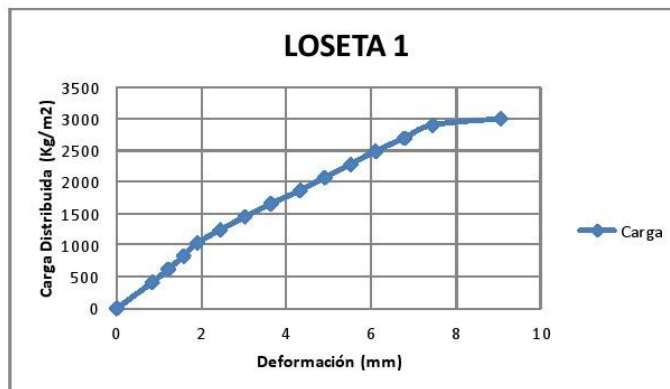
- Se colocó el módulo en unos apoyos con características similares a los arcos donde estarán sostenidos.
- Se dividen los módulos en cuatro partes iguales, tomando una longitud libre de 1.40m, luego se hizo una marca a cada $L/4$ en y en ellas aplicó la carga inducida por un gato hidráulico de 10 ton, la cual se distribuyó tal como lo muestran las imágenes.
- Se colocó un deformómetro en el centro del módulo.
- Se fue aumentando carga en intervalos de 100 lb, para los cuales se leyó su respectiva deformación.
- Los resultados obtenidos se tabularon y se graficaron para analizar el comportamiento del módulo de forma individual.





DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE MÓDULO DE FERROCEMENTO 1

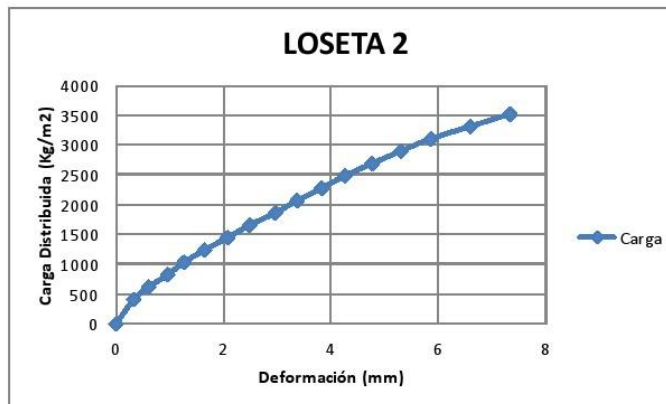
Carga Lb	Carga Distribuida Kg/m ²	Deformación Acumulada 1
0	0	0
200	414.6420473	0.8382
300	621.9630709	1.2192
400	829.2840946	1.5748
500	1036.605118	1.905
600	1243.926142	2.4384
700	1451.247166	3.0226
800	1658.568189	3.6322
900	1865.889213	4.318
1000	2073.210236	4.9022
1100	2280.53126	5.5118
1200	2487.852284	6.096
1300	2695.173307	6.7818
1400	2902.494331	7.4422
1450	3006.154843	9.0424





DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE MÓDULO DE FERROCEMENTO 2

Carga Lb	Carga Distribuida Kg/m ²	Deformación Acumulada 2
0	0	0
200	414.6420473	0.3302
300	621.9630709	0.6096
400	829.2840946	0.9652
500	1036.605118	1.27
600	1243.926142	1.651
700	1451.247166	2.0828
800	1658.568189	2.4892
900	1865.889213	2.9718
1000	2073.210236	3.3782
1100	2280.53126	3.8354
1200	2487.852284	4.2672
1300	2695.173307	4.7752
1400	2902.494331	5.3086
1500	3109.815355	5.8674
1600	3317.136378	6.604
1700	3524.457402	7.3406





ANÁLISIS

- Los módulos de ferrocemento fueron diseñados para soportar una carga distribuida de 418 kg/m^2 , con el fin de darle mejor estabilidad se agregaron dos nervios que permiten rigidizar el elemento estructural, los cuales fueron diseñados también para soportar 418 kg/m^2 de carga distribuida.
- En las gráficas mostradas, las lecturas del deformómetro llegó a 8 mm esto se debe a que los módulos de ferrocemento fueron ensayados hasta su carga última y colapso.
- La deflexión obtenida en el ensayo cuando el elemento llega a la carga de diseño de 418 kg/m^2 es de 0.3 mm siendo menor a la deflexión teórica obtenida al aplicarle esta carga, siendo ésta de 2.4 mm.
- Las primeras grietas fueron visibles al aplicarle una carga aproximada de 621 kg/m^2 , las cuales solo afectaron el recubrimiento, antes de llegar al refuerzo a tensión de los nervios.
- El límite proporcional se puede observar en la grafica al llegar a 1040 kg/m^2 , habiendo superado por mucho la carga para la cual fue diseñado.
- A partir de los 1244 kg/m^2 , el elemento se encuentra en la zona elastoplástica, y aquí es donde el acero a tensión empieza fluir de una forma progresiva tal como se ve en el gráfico.
- El elemento falló en uno de sus apoyos cuando la carga distribuida llego a 2900 kg/m^2 , luego de eso se dejó de tomar lectura del deformómetro para finalmente terminar con el ensayo a flexión destructivo.
- La Resiliencia es el área bajo la curva hasta el límite elástico llegando a 1000 kg/m^2 .
- El módulo de Elasticidad se define como la pendiente de la grafica de carga versus deformación en el rango elástico, siendo esta de 543 kg/m^2 .



ENSAYO A COMPRESIÓN DE TESTIGOS DE CONCRETO

Se pretende evaluar la resistencia a compresión del concreto fundido dentro de los tubos pvc, para ello se realizaron dos probetas de concreto y dos probetas de concreto que incluyeron también tubería pvc, con el fin de evaluar el comportamiento de los arcos y conocer el porcentaje de aportación de resistencia a compresión dada por la tubería de pvc, esto dado que la función principal de los arcos, es resistir esfuerzos a compresión.

Del ensayo se obtuvieron los siguientes datos:

CILINDRO DE CONCRETO 1					
	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Carga (Lb)	Carga (kg)	Peso (kg)
1	20.40	11.10	12000	5442.17687	4.182
2	20.50	11.00			
3	20.50	11.20			
Promedio	20.47	11.10	12000.00	5442.18	4.18

Área (cm ²)	=	328.99
Volumen (cm ³)	=	3651.80
Esfuerzo (kg/cm ²)	=	16.54
Peso Vol (kg/m ³)	=	1145.19

CILINDRO DE CONCRETO 2					
	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Carga (Lb)	Carga (kg)	Peso (kg)
1	20.70	11.30	11000	4988.66213	4.238
2	20.90	11.10			
3	20.90	11.20			
Promedio	20.83	11.20	11000.00	4988.66	4.24

Área (cm ²)	=	340.88
Volumen (cm ³)	=	3817.91
Esfuerzo (kg/cm ²)	=	14.63
Peso Vol (kg/m ³)	=	1110.03



Sacando un promedio de los resultados obtenidos de los ensayos de los testigos de concreto tenemos que:

Esfuerzo Último = 15.60 kg/cm²
Peso volumétrico = 1127.61 kg/m³

CILINDRO DE CONCRETO Y TUBO 1					
	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Carga (Lb)	Carga (kg)	Peso (kg)
1	20.5	11.50	22000	9977.32426	4.452
2	20.50	11.50			
3	20.50	11.50			
Promedio	20.50	11.50	22000.00	9977.32	4.45

Área (cm ²)	=	330.06
Volumen (cm ³)	=	3795.73
Esfuerzo (kg/cm ²)	=	30.23
Peso Vol (kg/m ³)	=	1172.90

CILINDRO DE CONCRETO Y TUBO 2					
	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Carga (Lb)	Carga (kg)	Peso (kg)
1	20.5	11.50	22500	10204.0816	4.377
2	20.50	11.50			
3	20.50	11.50			
Promedio	20.50	11.50	22500.00	10204.08	4.38

Área (cm ²)	=	330.06
Volumen (cm ³)	=	3795.73
Esfuerzo (kg/cm ²)	=	30.92
Peso Vol (kg/m ³)	=	1153.14

Sacando un promedio de los resultados obtenidos de los ensayos de los testigos de concreto y tubo pvc tenemos que:



Esfuerzo Último = 30.57 kg/cm²
Peso volumétrico = 1163.02 kg/m³





CONCLUSIONES

- El concreto usado tiene un peso volumétrico de 1127 kg/m^3 , por lo cual está en la categoría de concretos livianos.
- El esfuerzo último soportado por los cilindros de concreto fue de 15.60 kg/cm^2
- El esfuerzo último soportado por los cilindros de concreto y tubo pvc fue de 30.5 kg/cm^2 , logrando así casi duplicar el esfuerzo último de los cilindros de solo concreto.
- Esta resistencia adicional se debe a que el tubo pvc provee mayor confinamiento al concreto, obteniendo así mayores deformaciones sin que el elemento falle.



Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila
JEFE DE SECCIÓN
SECCIÓN DE ESTRUCTURAS



Ing. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA
CENTRO DE INVESTIGACIONES