



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

**COMPARACIÓN DE COSTOS Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EN PUENTES UTILIZANDO
VIGAS DE CONCRETO REFORZADO Y VIGAS DE CONCRETO POSTENSADO**

Crystal Esmeralda Muñoz Vásquez
Asesorado por el Ing. Alan Paúl Vásquez

Guatemala, septiembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE COSTOS Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EN PUENTES UTILIZANDO
VIGAS DE CONCRETO REFORZADO Y VIGAS DE CONCRETO POSTENSADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CRYSTAL ESMERALDA MUÑOZ VÁSQUEZ
ASESORADO POR EL ING. ALAN PAÚL VÁSQUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 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. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Luis Martinoly Godínez Orozco
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

COMPARACIÓN DE COSTOS Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EN PUENTES UTILIZANDO VIGAS DE CONCRETO REFORZADO Y VIGAS DE CONCRETO POSTENSADO

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



Crystal Esmeralda Muñoz Vásquez

Guatemala, 6 de mayo de 2013

Licenciado Manuel María Guillen Salazar
Coordinador del área de Planeamiento
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Licenciado Guillen:

Por medio de la presente hago constar que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante Crystal Esmeralda Muñoz Vásquez, titulado **“COMPARACIÓN DE COSTOS Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EN PUENTES UTILIZANDO VIGAS DE CONCRETO REFORZADO Y VIGAS DE CONCRETO POSTENSADO”**.

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo de graduación, considero que el mismo cumple con los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Civil, por lo que dejo constancia de mi aprobación para su autorización.

Atentamente,



Alan Paúl Vásquez
Ingeniero Civil
Colegiado No. 8,275

Ing. Alan Paúl Vásquez

Colegiado No. 8275



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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



Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil
21 de agosto 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 COMPARACIÓN DE COSTOS Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EN PUENTES UTILIZANDO VIGAS DE CONCRETO REFORZADO Y VIGAS DE CONCRETO POSTENSADO, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Crystal Esmeralda Muñoz Vásquez quien contó con la asesoría del Ing. Alan Paúl Vásquez.

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

Lic. Manuel María Guillén Salazar
Jefe del Departamento de Planeamiento

Manuel María Guillén Salazar
ECONOMISTA
Colegiado No. 4758



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
PLANEAMIENTO
USAC

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

/bbdeb.





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. Alan Paúl Vásquez y del Jefe del Departamento de Planeamiento, al trabajo de graduación del estudiante Crystal Esmeralda Muñoz Vásquez, titulado **COMPARACIÓN DE COSTOS Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EN PUENTES UTILIZANDO VIGAS DE CONCRETO REFORZADO Y VIGAS DE CONCRETO POSTENSADO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, agosto de 2013.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 608.2013

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: **COMPARACIÓN DE COSTOS Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EN PUENTES UTILIZANDO VIGAS DE CONCRETO REFORZADO Y VIGAS DE CONCRETO POSTENSADO**, presentado por la estudiante universitaria **Crystal Esmeralda Muñoz Vásquez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 2 de septiembre de 2013

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Mis padres

Angel Antonio Muñoz Muralles y
Juanita Muñoz.

Mis hermanos

Rogelio Jurado, Kythzia Jurado,
Fatima Jurado, Prisma Muñoz y
Antonio Angel Muñoz.

Mi familia en general

Mis amigos

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por enseñarme el camino de la sabiduría y la felicidad.
Mis padres	Por el cariño y apoyo moral que siempre me han dado y con el cual he logrado culminar mí esfuerzo.
Mis hermanos	Por ser mis modelos a seguir, y quienes siempre me motivaban para lograr mis objetivos.
Ing. Alan Paúl Vásquez	Por brindarme sus conocimientos y orientación.
Ricardo Cojulún Martínez	Por el apoyo mutuo en nuestra formación profesional.
Grupo Muratori	Por contribuir con la información necesaria para la elaboración de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. Puentes	1
1.1. Clasificación	1
1.1.1. Utilidad.....	1
1.1.2. Material	2
1.1.3. Localización	7
1.1.4. Tipo de estructura	10
1.2. Ubicación y elección de tipo de puente.....	15
1.3. Localización.....	16
1.4. Estudios preliminares	16
1.4.1. Estudio topográfico	17
1.4.2. Estudio hidrológico.....	18
1.4.3. Estudio geotécnico.....	21
1.4.4. Recopilación de información	22
1.5. Diseño final del puente	23
1.5.1. Memoria de cálculo.....	23
1.5.2. Especificaciones técnicas	23
1.5.3. Metodología de construcción	23
1.5.4. Cuadro de renglones de trabajo.....	24
1.5.5. Planos del puente	24

2.	GENERALIDADES DE VIGAS DE CONCRETO PARA PUENTES	27
2.1.	Funcionalidad.....	27
2.2.	Resistencia	27
2.3.	Seguridad estructural	27
2.4.	Fundamentos del diseño	28
2.5.	Códigos de diseño y especificaciones.....	28
2.6.	Vigas de concreto reforzado.....	29
2.6.1.	Descripción.....	29
2.6.1.1.	Flexión en vigas.....	29
2.6.1.2.	Comportamiento de vigas de concreto reforzado	31
2.6.1.3.	Suposiciones fundamentales para el comportamiento del concreto reforzado	32
2.6.1.4.	Diseño de vigas reforzadas a tensión ..	33
2.6.1.5.	Vigas rectangulares con refuerzo a tensión y compresión.....	34
2.6.1.6.	Refuerzo a corte	34
2.6.1.7.	Vigas T	35
2.6.2.	Metodología de construcción	35
2.6.2.1.	Estudios necesarios previos a las fundiciones	35
2.6.2.2.	Armado y fundición	37
2.6.3.	Ventajas y desventajas.....	39
2.7.	Vigas de concreto postensado	41
2.7.1.	Descripción.....	41
2.7.1.1.	Efectos del sistema postensado	42
2.7.1.2.	Equipo para el sistema postensado	42
2.7.1.3.	Acero para postensado.....	46

	2.7.1.4.	Concreto para postensado	47
	2.7.1.5.	Análisis elástico a flexión	48
	2.7.1.6.	Resistencia a flexión	48
	2.7.1.7.	Preesfuerzo parcial	49
	2.7.1.8.	Selección de la forma.....	50
	2.7.1.9.	Pérdidas del preesfuerzo	50
	2.7.1.10.	Refuerzo a corte.....	51
	2.7.2.	Metodología de construcción	51
	2.7.1.1.	Armado y fundición	51
	2.7.1.2.	Sistema de postensado.....	53
	2.7.3.	Ventajas y desventajas	74
3.		PUENTE DE 22 METROS CON VIGAS REFORZADAS O POSTENSADAS	79
	3.1.	Subestructura	79
	3.1.1.	Cimentación.....	79
	3.1.2.	Estribos.....	79
	3.1.3.	Pilas.....	79
	3.1.4.	Cortina y aletones	80
	3.1.5.	Vigas de apoyo	80
	3.2.	Superestructura	80
	3.2.1.	Apoyos.....	80
	3.2.2.	Vigas.....	81
	3.2.2.1.	Reforzadas.....	81
	3.2.2.2.	Postensadas	81
	3.2.3.	Diafragmas	81
	3.2.4.	Losa del puente	81
	3.2.5.	Aceras	82
	3.2.6.	Remate de guardarruedas	82

3.2.6.	Postes y barandales	82
3.3.	Cuantificación de materiales	82
3.3.1.	Materiales.....	83
3.3.1.1.	Cemento	83
3.3.1.2.	Agregados	83
3.3.1.3.	Dosificación y mezcla de concreto	84
3.3.1.4.	Control de calidad.....	84
3.3.1.5.	Aditivos.....	85
3.3.1.6.	Concreto de alta resistencia	85
3.3.1.7.	Acero de refuerzo para el concreto	85
3.3.1.8.	Acero para postensado.....	86
3.3.2.	Puente con vigas de concreto reforzado.....	86
3.3.3.	Puente con vigas de concreto postensado	89
3.4.	Renglones de trabajo y precios unitarios.....	92
3.4.1.	Mano de obra	92
3.4.2.	Transporte	93
3.4.3.	Formaleta	93
3.4.4.	Materiales.....	93
3.4.5.	Equipo	93
3.4.6.	Excavación	94
3.4.7.	Relleno	94
3.4.8.	Armadura.....	94
3.4.9.	Concreto.....	94
3.4.10.	Integración de renglones de trabajo para puente con vigas reforzadas	95
3.4.11.	Integración de renglones de trabajo para puente con vigas postensadas	103

4.	COMPARACIÓN ENTRE PUENTES.....	109
4.1.	Comparación de sistemas constructivos.....	109
4.2.	Comparación de costos	110
	CONCLUSIONES.....	113
	RECOMENDACIONES.....	115
	BIBLIOGRAFÍA.....	117
	ANEXOS	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Puente Vega de Godinez, San Juan, Sacatepéquez	2
2.	Puente Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa	3
3.	Puente Vado Ancho, Pajapita, San Marcos	4
4.	Puente Los Cubes, Palencia, Guatemala	5
5.	Puente Belice, ciudad de Guatemala	6
6.	Puente Olímpico, ciudad de Guatemala.....	7
7.	Viaducto ferroviario, Manzanillo, México.....	8
8.	Puente Tamazulapa, Asunción Mita, Jutiapa	9
9.	Puente Telemán, Panzós, Alta Verapaz	10
10.	Puente río Dulce, Livingston, Izabal	11
11.	Puente Los Alamos, ciudad de Guatemala	12
12.	Puente Cahaboncito, Panzós, Alta Verapaz	13
13.	Puente del Alamillo, Sevilla, España.....	14
14.	Central hidráulica	43
15.	Gato de postensado	44
16.	Inyectadora	45
17.	Anclajes	46
18.	Zona de riesgo.....	54
19.	Dimensiones mínimas de cajuelas.....	56

TABLAS

I.	Especificaciones de diámetro	47
II.	Dimensiones mínimas de cajuelas	56
III.	Diámetros de ductos corrugados	58
IV.	Longitud de anclajes.....	62
V.	Resistencia mínima del concreto	66
VI.	Planilla de materiales - subestructura	87
VII.	Planilla de materiales - superestructura.....	88
VIII.	Resumen de materiales.....	89
IX.	Planilla de materiales - superestructura.....	90
X.	Resumen de materiales.....	91
XI.	Planilla de materiales – acero de preesfuerzo	92
XII.	Excavación estructural para cimentación.....	95
XIII.	Relleno estructural para cimentación.....	96
XIV.	Concreto 3 000 psi	97
XV.	Acero estructural	98
XVI.	Neopreno para apoyos	99
XVII.	Tubo de HG para drenaje	100
XVIII.	Concreto 4 000 psi	101
XIX.	Acero de refuerzo	102
XX.	Planilla de cantidades y costos unitarios	103
XXI.	Concreto 4 000 psi	104
XXII.	Concreto 5 000 psi	105
XXIII.	Acero de refuerzo	106
XXIV.	Acero de preesfuerzo	107
XXV.	Planilla de cantidades y costos unitarios	108
XXVI.	Cuadro comparativo de costos	111

GLOSARIO

AASHTO	Manual de normas para el diseño de carreteras. (American Association of State Highway and Transportation Officials).
Acero de preesfuerzo	Elemento de acero de alta resistencia como alambre, barra, torón, o un paquete (tendón), utilizado para aplicar fuerzas de preesforzado al concreto.
ACI	Código de diseño de concreto estructural. (American Concrete Institute).
Aditivo	Material distinto del agua, de los agregados o cemento hidráulico, utilizado como componente del concreto, y que se añade a éste antes o durante su mezclado a fin de modificar sus propiedades.
Agregado	Material granular, como arena, grava, piedra triturada y escoria de hierro de alto horno, empleado con un medio cementante para formar concreto o mortero hidráulicos.

ASTM	Manual de normas para la aprobación de materiales. (AssociationforTestingMaterials).
Concreto	Mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos.
Ducto de postensado	Ducto (liso o corrugado) para colocar el acero preesforzado que se requiere para aplicar el postensado.
Esfuerzo	Fuerza por unidad de área.
Fraguado	Proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del concreto.
Flexión	Tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.
Luz	Longitud del vano.
Obra	Toda la construcción o partes identificables separadamente que se debe construir de acuerdo con los documentos del contrato.
Postensado	Método de preesforzado en el cual el acero de preesforzado se tensiona después de que el concreto ha endurecido.

Resistencia	Capacidad de soportar un esfuerzo de mayor o menor intensidad durante un tiempo prolongado.
Ruptura	Efecto que tiene un determinado material en consecuencia de una fuerza en aumento.
Tensión	Esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.
Zona de anclaje	En elemento postensados, la porción del elemento a través de la cual la fuerza de preesforzado concentrada se transfiere al concreto y es distribuida de una manera más uniforme en toda la sección.

RESUMEN

El objetivo del trabajo de graduación es realizar un análisis comparativo de costos y métodos constructivos entre dos diseños de un puente con luz de 22 metros ubicados en el mismo lugar; uno utilizando vigas de concreto reforzado y otro utilizando vigas de concreto postensado, a fin de dar una pauta para elegir el tipo de puente más económico y eficiente para la longitud propuesta.

Para iniciar se dan a conocer los conceptos básicos y necesarios relacionados a los puentes, así como la descripción de los dos tipos de vigas de concreto a comparar y sus sistemas constructivos utilizados para la fabricación.

Luego, se presenta el análisis de dos diseños de ambos puentes. Para dicho análisis se muestra una cuantificación de materiales de cada puente y los renglones de trabajo necesarios de acuerdo con las especificaciones generales de construcción de caminos y puentes de la República de Guatemala.

Con los datos obtenidos, se muestra la integración de precios de cada uno de estos renglones, donde se toma en cuenta los procesos constructivos, la mano de obra, los materiales y equipo necesario, así como factores que influyen en el costo de cada renglón.

Finalmente, se presenta la comparación de costos y metodologías constructivas de ambos sistemas para determinar cuál método es más eficiente y económico.

OBJETIVOS

General

Generar un documento comparando costos y métodos constructivos en puentes, utilizando vigas de concreto reforzado y de concreto postensado en puentes de 22 metros.

Específicos

1. Determinar las ventajas y desventajas de vigas de concreto postensado y vigas de concreto reforzado.
2. Suministrar información de costos y renglones de trabajo en la construcción de vigas de concreto postensado y vigas de concreto reforzado.
3. Generar un análisis comparativo de los procesos constructivos de ambos métodos; viga de concreto postensado y viga de concreto reforzado.

INTRODUCCIÓN

En la planificación y diseño de puentes, una vez definida su longitud y realizados los estudios previos necesarios, el problema fundamental que se plantea es decidir qué tipo de estructura y material se va a utilizar para su construcción, ya que esto determina el proceso constructivo, su costo y tiempo de ejecución. En la actualidad, se utilizan diversos sistemas constructivos para el diseño y construcción de puentes de concreto con luz de 20 metros, siendo los más comunes en el medio los de vigas de concreto reforzado y vigas de concreto postensado.

Cuando se planifica el diseño y construcción de un puente de concreto, surgen todo tipo de interrogantes referentes a los distintos tipos de sistemas constructivos que existen, las condiciones en que pueden ser utilizados estos sistemas, cuál es el más eficiente para la estructura que se desea edificar, las ventajas y desventajas que presentan, cuál es el más económico y cuál presenta mayores facilidades para su construcción, entre otras; es por ello que se requiere de un documento con los parámetros o guías que faciliten una toma de decisión entre ambos sistemas, determinar cuál es más eficiente y económico en nuestro medio.

El presente trabajo de graduación describe los dos tipos de vigas utilizadas, su metodología de construcción así como también el costo de ejecución. Esto nos servirá para realizar una comparación entre ambos sistemas y así determinar qué tipo viga es más conveniente utilizar para el diseño y construcción de puentes con luces de veinte metros o similares.

1. PUNTES

Un puente es una estructura destinada a salvar obstáculos naturales (ríos, valles, lagos o brazos de mar) y obstáculos artificiales (vías férreas o carreteras); con el fin de dar continuidad a una vía y poder transportar mercancías, permitir la circulación de la gente y hacer traslados de un sitio a otro.

1.1. Clasificación

Los puentes se clasifican de acuerdo a su utilidad, material de construcción, localización y tipo de estructura. A continuación se presenta la definición de las clasificaciones y ejemplos en el medio y en el ámbito internacional.

1.1.1. Utilidad

La clasificación de acuerdo a la utilidad se refiere a la utilización que se les dé o la función principal que cumplen los puentes, las cuales son los siguientes:

- Acueductos: cuando se emplean para la conducción del agua.
- Viaductos: si soportan el paso de carreteras y vías férreas.
- Pasarelas: están destinados exclusivamente a la circulación de personas.

1.1.2. Material

Las características de los puentes están ligadas a los materiales con los que se construyen: el material que se elige para construir un puente depende fundamentalmente del lugar, época y costo.

- Madera: los puentes de madera son rápidos de construir y de bajo costo pero tienen poca resistencia y no son duraderos, ya que son muy sensibles a los agentes atmosféricos, como la lluvia y el viento por lo que requieren un mantenimiento continuo y costoso. (Ver figura 1).

Figura 1. **Puente Vega de Godinez, San Juan, Sacatepéquez**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- Mampostería: los puentes de piedra son resistentes, compactos y duraderos pero su construcción tiene un costo alto. La mampostería resiste muy bien a los agentes climáticos, por lo que no requieren un mantenimiento continuo. (Ver figura 2).

Figura 2. **Puente Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa**



Fuente: CARDONA, Oswaldo. Puente Los Esclavos aún continúa en pie.
<http://www.prensalibre.com>. Consulta: abril de 2013.

- Metal: los puentes metálicos son muy versátiles, permiten diseños de grandes luces, se construyen con rapidez, pero son caros de construir y además están sometidos a la acción corrosiva, tanto de los agentes atmosféricos como de los gases y humos de las fábricas y ciudades, lo que supone un mantenimiento caro. (Ver figura 3).

Figura 3. **Puente Vado Ancho, Pajapita, San Marcos**



Fuente:GrupoMuratori S.A.

- Concreto: los puentes de concreto armado o preesforzado son de montaje rápido, ya que en muchas ocasiones se utilizan elementos prefabricados. Permiten superar luces mayores que los puentes de piedra, aunque menores que los puentes metálicos y son resistentes a los agentes atmosféricos, por lo cual los gastos de mantenimiento son escasos. (Ver figura 4).

Figura 4. Puente Los Cubes, Palencia, Guatemala



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- Mixto: son puentes que utilizan elementos de estructuras de acero y estructuras de concreto reforzado o preesforzado, estos elementos están conectados entre sí para que trabajen conjuntamente. (Ver figura 5).

Figura 5. **Puente Belice, ciudad de Guatemala**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

1.1.3. Localización

La clasificación de puentes según su localización se refiere a la ubicación de la calzada, ésta puede ser superior, intermedia e inferior. En el medio nacional pueden encontrarse varios ejemplos de éste tipo, en su mayoría de calzada intermedia.

- Calzada superior: cuando la estructura portante del tablero está ubicada íntegramente debajo de la calzada, por ejemplo, los puentes de arco o con armadura de arco. (Ver figura 6).

Figura 6. **Puente Olímpico, ciudad de Guatemala**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- Calzada intermedia: son los puentes que tienen la estructura por encima de calzada en algunos sectores y por debajo de ella en otros, como los puentes de vigas, simplemente apoyadas. (Ver figura 7).

Figura 7. **Viaducto ferroviario, Manzanillo, México**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- Calzada inferior: son los tableros cuya estructura portante está ubicada a los lados de la calzada sobresaliendo de su superficie o que esté ubicada por encima de la misma, por ejemplo, los puentes colgantes o atirantados. (Ver figura 8).

Figura 8. **Puente Tamazulapa, Asunción Mita, Jutiapa**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

1.1.4. Tipo de estructura

Para la tipología de los puentes, se definen cinco tipos principales, los cuales son: puentes de vigas, en ménsula, en arco, colgante y atirantado. Estos tipos de puentes se detallan a continuación mostrando ejemplos de cada uno.

- Puente de viga: están formados fundamentalmente por elementos horizontales que se apoyan en sus extremos sobre soportes o pilares. Son construidos a partir de acero y hormigón. (Ver figura 9).

Figura 9. **Puente Telemán, Panzós, Alta Verapaz**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- Puente en ménsula: esta clase de puentes dispone de una serie de vigas las cuales forman una ménsula. El término ménsula hace referencia a cualquier tipo de estructura en voladizo, la cual se apoya sobre uno de sus extremos a través de un empotramiento. (Ver figura 10).

Figura 10. **Puente río Dulce, Livingston, Izabal**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- Puente en arco: es un puente con una estructura con forma de arco, un semicírculo, entre los apoyos extremos de la luz. (Ver figura 11).

Figura 11. **Puente Los Alamos, ciudad de Guatemala**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- Puente colgante: son puentes que se sostienen a través de un arco de forma invertida, conformado por una serie de cableado de acero, y en los cuales el tablero se encuentra suspendido por medio de tirantes ubicados en forma vertical. (Ver figura 12).

Figura 12. **Puente Cahaboncito, Panzós, Alta Verapaz**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- Puente atirantado: es un puente cuyo tablero está suspendido de uno o varios pilones por medio de un sistema de cables. Los cables principales se disponen de pila a pila, sosteniendo el tablero mediante cables secundarios verticales ya que el puente trabaja a tensión y a compresión. (Ver figura 13).

Figura 13. **Puente del Alamillo, Sevilla, España**



Fuente: <http://objetivojerez.lavozdigital.es>. Consulta: abril de 2013.

1.2. Ubicación y elección de tipo de puente

La selección del tipo y sitio de un puente debe llevarse a cabo luego de haber realizado el análisis de diversos aspectos, los cuales a su vez poseen diversas ramificaciones, éstos son:

- Las necesidades estéticas:
 - Funcionalidad de la obra
 - Buenas proporciones con la superestructura y la subestructura

- La ubicación del puente donde se toma en consideración tanto en planta como en elevación lo siguiente:
 - Características geométricas de la vía (canales, ancho, etc.)
 - Geometría del eje vial
 - Condiciones geotécnicas
 - Menor costo inicial
 - Menor costo de conservación
 - Ubicaciones obligadas: vías ya construidas, reemplazo de estructuras existentes y estructuras para usos especiales

- El tipo de puente donde se toma en consideración:
 - El uso que se le dará al puente
 - Condiciones del terreno
 - Características del subsuelo
 - Consideraciones económicas

1.3. Localización

Para la localización de un puente se debe tomar en cuenta varios aspectos, tanto de las características del terreno como ambientales y de optimización del proceso.

- Sitio (ancho de la depresión, sección desagüe, necesidad de subdivisión)
- Características del subsuelo
- Propósito (provisional, carretera, ferrocarrilero, urbano, viaducto).
- Alineamiento
- Pendiente longitudinal
- Rasante
- Facilidades de construcción y mantenimiento
- Aspecto estético en relación con el medio ambiente
- Lineamiento respecto al cauce de la corriente y una sección de desagüe suficiente

1.4. Estudios preliminares

Los estudios preliminares son aquellos estudios que se realizan para obtener la información necesaria para diseñar y elaborar un proyecto. La deficiencia de estos estudios es la que generalmente lleva al colapso de las estructuras.

1.4.1. Estudio topográfico

El estudio topográfico trata de principios y métodos empleados para obtener la representación plana de una parte de la superficie terrestre con sus posiciones relativas y formas circunstanciales del suelo. Al crear un informe sobre los estudios topográficos llevados a cabo para la construcción de un puente, se debe cumplir los siguientes objetivos:

- Indicar el nombre del río o quebrada, camino correspondiente, tramos del camino en el cual se encuentra.
- Realizar los trabajos de campo que permitan elaborar los planos topográficos correspondientes.
- Proporcionar la definición precisa de la ubicación y las dimensiones de los elementos estructurales.
- Establecer puntos de referencia para el replanteo durante la construcción.
- Proporcionar información de base para los estudios de hidrología e hidráulica, geología, geotecnia, así como la ecología y sus efectos en el medio ambiente.

Los estudios topográficos deberán comprender como mínimo lo siguiente:

- Levantamiento topográfico general de la zona del proyecto documentado en planos.

- Definición de la topografía de la zona de ubicación del puente y sus accesos con planos indicando los accesos del puente, así como autopistas, caminos, vías férreas y otras posibles referencias. Deberán indicarse igualmente con claridad la vegetación existente.
- En el caso de puentes sobre cursos de agua deberá hacerse un levantamiento detallado del fondo. Será necesario indicar en planos la dirección del curso del agua y los límites aproximados de la zona inundable en las condiciones de aguas máximas y mínimas, así como los observados en eventos de carácter excepcional.
- Ubicación e indicación de cotas de puntos referenciales, puntos de inflexión y puntos de inicio y término de tramos curvos; ubicación y colocación de bancos de marca.
- Levantamiento catastral de las zonas aledañas del puente, cuando existan edificaciones u otras obras que interfieran con el puente o sus accesos o bien que requieran ser expropiadas.

1.4.2. Estudio hidrológico

La finalidad de este estudio es establecer las características hidrológicas de los regímenes de avenidas máximas y extraordinarias, así como los factores hidráulicos que conllevan a una real apreciación del comportamiento hidráulico del río, el cual permiten definir los requisitos mínimos del puente y su ubicación óptima en función de los niveles de seguridad o riesgos permitidos o aceptables para las características particulares de la estructura.

Los estudios de hidrología e hidráulica para el diseño de puentes deben permitir establecer lo siguiente:

- Ubicación óptima del cruce
- Caudal máximo de diseño hasta la ubicación del cruce
- Comportamiento hidráulico del río en el tramo que comprende el cruce
- Área de flujo a ser confinada por el puente
- Nivel máximo de aguas (NMA) en la ubicación del puente
- Nivel mínimo recomendable para el tablero del puente
- Profundidades de socavación general, por contracción y local
- Profundidad mínima recomendable para la ubicación de la cimentación según su tipo
- Obras de protección necesarias

Se debe considerar en el programa de este tipo de estudios la recolección de información, los trabajos de campo y los trabajos de gabinete, cuya cantidad y alcance será determinado con base a la magnitud del proyecto, en términos de su longitud y riesgo considerado.

Los estudios hidrológicos e hidráulicos deben comprender lo siguiente:

- Evaluación de estudios similares realizados en la zona de ubicación del puente; es conveniente utilizar los parámetros de diseño anteriores en el caso de un reemplazo de un puente colapsado.
- Visita de campo; reconocimiento del lugar tanto en la zona de cruce como de la cuenca global.

- Recolección y análisis de información hidrométrica y meteorológica existente.
- Caracterización hidrológica de la cuenca, considerada hasta el cruce del curso del agua con base a la determinación de las características de las respuestas de lluvia-escorrentía, y considerando aportes adicionales en la cuenca.
- Selección de los métodos de estimación del caudal máximo de diseño.
- Estimación de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno y según distintos métodos.
- Selección de secciones transversales representativas del cauce y la obtención del perfil longitudinal.
- Determinación de las características hidráulicas del flujo.
- Determinación de las profundidades de socavación general por contracción total y local.
- Recomendaciones de protección y/o consideraciones de diseño adicionales.

Los puentes ubicados en el cruce con un curso de agua, deben ser diseñados de modo que las alteraciones y obstáculos que estos representen ante este curso de agua, sean previstos y puedan ser admitidos en el desempeño de la estructura a lo largo de su vida útil o se tomen medidas preventivas.

1.4.3. Estudio geotécnico

Los objetivos de estos estudios son establecer las características geotécnicas, es decir, la estratigrafía, la identificación y las propiedades físicas y mecánicas de los suelos para el diseño de cimentaciones estables.

El estudio debe considerar exploraciones de campo y ensayos de laboratorio, cuya cantidad será determinada con base a la magnitud del proyecto en términos de su longitud y las condiciones del suelo. Los estudios deberán comprender la zona de ubicación del puente, estribos, pilares y accesos.

Los estudios geotécnicos deberán comprender lo siguiente:

- Ensayos de campo en suelos y/o rocas.
- Ensayos de laboratorio en muestras de suelo y/o roca extraídas en la zona.
- Descripción de las condiciones del suelo, estratigrafía e identificación de los estratos de suelo o base rocosa.
- Definición de tipos y profundidades de cimentaciones adecuadas, así como parámetros geotécnicos preliminares para el diseño del puente al nivel de anteproyecto.
- Presentación de los resultados y recomendaciones sobre especificaciones constructivas y obras de protección.

1.4.4. Recopilación de información

La recopilación de información es un informe donde deben ser detallados todos los datos de información general del puente, éste debe incluir las siguientes referencias:

- Número del puente
- Nombre del puente
- Clasificación de la ruta
- Kilómetro
- Localización
- Administración
- Latitud y longitud
- Fecha de diseño y construcción
- Inventario básico del puente:
 - Información básica
 - Dimensiones
 - Antecedentes de inspección
 - Antecedentes de rehabilitación
 - Ubicación
 - Vista panorámica
 - Observaciones
- Detalle de superestructura
- Detalle de subestructura

1.5. Diseño final del puente

Cuando finaliza la etapa de diseño y planificación, debe dejarse constancia del procedimiento que se ha realizado, para lo cual se emplean ciertos documentos y otros que tengan plasmado lo que se ha llevado a cabo hasta el momento previo a la ejecución.

1.5.1. Memoria de cálculo

Una memoria de cálculo es el procedimiento de los cálculos que se realizan en el desarrollo de una obra o proyecto de forma detallada. La memoria de cálculo sirve para verificar, entender y acatar los criterios de construcción que se utilizaron para diseñar la obra.

1.5.2. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas son los documentos que indican normas, procedimientos y exigencias las cuales deben ser empleadas y aplicadas en obras de construcción, en la fabricación de equipos y elaboración de estudios.

1.5.3. Metodología de construcción

La metodología de construcción es un sistema de métodos y normas o procedimientos específicos empleados para la ejecución de una obra de construcción o solo de un elemento estructural.

1.5.4. Cuadro de renglones de trabajo

El cuadro de renglones se refiere a la tabla donde se resume los volúmenes de trabajo. En el caso de los puentes incluye los trabajos preliminares y la ejecución de la estructura.

1.5.5. Planos del puente

Para detallar las características de un puente y garantizar su correcta ejecución deben emplearse los planos necesarios especificando los pormenores de la estructura. En forma general, se mencionan los siguientes:

- Plano índice: ésta es la hoja inicial del juego de planos del proyecto, en este plano se indica el nombre del proyecto, el listado de nombres de los planos con su número de hoja y la descripción de la nomenclatura a utilizarse en el juego de planos.
- Plano de planta y elevación: en ésta hoja se muestra la ubicación del puente en planta y elevación, indicando cotas de cimentación y cotas de rasante. También contiene las especificaciones técnicas del proyecto, así como también la ubicación y descripción de las pruebas de suelos.
- Planos de estribos: éstos pueden abarcar varias hojas, en ellos se describen las dimensiones y el armado a utilizarse para la construcción de los estribos; incluye, zapatas, columnas, cortinas, topes sísmicos, vigas de apoyo y aletones.

- Planos de pila: si el proyecto requiriera dos o más luces, se tendrá que indicar en el plano las dimensiones y armado correspondiente a la pila o pilas del puente.
- Plano de vigas principales: ésta hoja indica el tipo de viga a utilizarse, describe la sección y armado de éstas. También se mostrará una sección transversal de la superestructura, indicando la separación entre vigas y la continuidad con la losa. Además incluye el detalle de los diafragmas del puente.
- Plano de losa: es la hoja que indica el espesor, longitud y armado de la losa del puente. También se indicará el armado y sección de las aceras y detalles de drenaje.
- Plano de apoyos y juntas: en este plano se indica el detalle de los apoyos a utilizar en las vigas y las junta entre losas o cortinas.
- Plano de postes y barandales: hoja que contiene el detalle de los postes y barandal, indicando como se anclan a la acera.
- Plano de remates: este plano indica los remates de aceras y barandal, así como detalles de cunetas.
- Plano de obras de protección: es el plano que indica las obras de protección a construir, como muros de gaviones, muros armados, zampeados, etc.
- Plano de topografía: es la hoja en donde se muestra la topografía original antes de comenzar la construcción.

2. GENERALIDADES DE VIGAS DE CONCRETO PARA PUENTES

2.1. Funcionalidad

Una viga se considera funcional cuando cumple sus propósitos en condiciones de servicio y es segura contra el colapso. Se requiere para la funcionalidad de la estructura que las deflexiones sean pequeñas, evitar las fisuras o, en su defecto, se mantengan en límites tolerables, que las vibraciones se minimicen.

2.2. Resistencia

La resistencia de una viga depende de las propiedades de los materiales que la componen y de un adecuado proceso constructivo. No es posible conocer con exactitud la resistencia de una viga, por lo que deben considerarse variables aleatorias, como por ejemplo las cargas máximas de ocupación y de factores ambientales y sísmicos.

2.3. Seguridad estructural

Debido a que no se puede conocer las cargas y los efectos internos que tendrán en las vigas, debe garantizarse la seguridad de la misma con una resistencia de diseño superior a las cargas supuestas y mayoradas que actúan sobre ella. Además, deben considerarse las consecuencias de una falla estructural y la naturaleza de las mismas, por ejemplo si estas ocurren en forma

súbita o gradualmente. La selección del margen de seguridad depende de las disposiciones del código de diseño que elija el diseñador.

2.4. Fundamentos del diseño

El aspecto más importante de todo elemento estructural debe ser su capacidad para resistir las cargas previsibles que puedan actuar sobre él sin que se presente una falla. Por lo tanto es lógico dimensionar las vigas basándose en cargas considerablemente mayores que las cargas que se espera que actúen sobre el mismo durante el servicio. A esto se le conoce como diseño a la resistencia.

También es posible dimensionar las vigas de modo que los esfuerzos en el concreto y en el acero resultante de las cargas normales actuantes, estén dentro de los límites especificados. Estos límites son solo fracciones de los esfuerzos de falla de los materiales y se conoce como esfuerzos admisibles.

Si las vigas son dimensionadas en base a las cargas de servicio se logra el margen de seguridad requerido suponiendo esfuerzos admisibles resultantes de las cargas de servicio que sean fracciones pequeñas de la resistencia compresión del concreto y del esfuerzo de fluencia del acero. Esta metodología se llama diseño para cargas de servicio.

2.5. Códigos de diseño y especificaciones

Para llevar a cabo el diseño de vigas de concreto generalmente es necesario a pegarse a los requisitos de análisis estructural, de dimensionamiento, de calidad de materiales, etc., que se encuentran dentro de un código de diseño de construcción. Sin embargo, ningún código de diseño

puede sustituir un criterio sólido en el diseño de vigas de concreto, ya que en la práctica el profesional se encuentra con circunstancias especiales donde el ingeniero debe confiar en un firme entendimiento de los principios básicos aplicables al concreto reforzado y preesforzado.

2.6. Vigas de concreto reforzado

Las vigas son elementos estructurales cuya función es transportar las cargas a los elementos verticales de la estructura. Ocasionalmente se construyen de concreto reforzado debido a su alta resistencia y su costo relativamente bajo en comparación con otros materiales, como por ejemplo, los perfiles de acero.

2.6.1. Descripción

Las vigas de concreto reforzado deben soportar la acción de momentos flectores y cargas axiales de corte, lo cual provoca que estén sujetas a cargas de compresión, que son absorbidas por el concreto, y fuerzas de tensión, que son contrarrestadas por las varillas de acero corrugado.

2.6.1.1. Flexión en vigas

Las premisas fundamentales relativas a la flexión y al cortante por flexión se basan en las distintas hipótesis de resistencia de materiales bajo esfuerzos inducidos. Éstas premisas son las siguientes:

- Las deformaciones unitarias en la viga, por encima y por debajo del eje neutro son proporcionales a la distancia medida a partir de este mismo eje.

- El esfuerzo de flexión en cualquier región depende de la deformación unitaria en dicha región, así como del diagrama esfuerzo-deformación unitaria del material.
- La distribución de los esfuerzos cortantes a lo largo del peralte de la sección depende de la forma de la sección transversal y del diagrama esfuerzo-deformación unitaria. Los esfuerzos cortantes son máximos sobre el eje neutro e iguales a cero en las fibras exteriores.
- La acción combinada de esfuerzos cortantes, en dirección horizontal y vertical, y los esfuerzos flectores originan esfuerzos inclinados de tensión y de compresión en cualquier región de la viga, de estos la mayor forma un ángulo de noventa grados.
- Los esfuerzos inclinados de tensión y compresión forman un ángulo de cuarenta y cinco grados respecto a la horizontal en cualquier punto del plano neutro; esto debido a que los esfuerzo cortantes y verticales son iguales entre si y los esfuerzos de flexión son iguales a cero en cualquier punto de este plano.

La viga se comporta elásticamente cuando los esfuerzos en las fibras exteriores son menores que el límite de proporcionalidad, en este caso:

- El eje neutro pasa a través del centro de gravedad de la sección transversal.
- La magnitud de los esfuerzos flectores perpendiculares a la sección aumenta directamente con la distancia al eje neutro y es máxima en las fibras extremas.

- El esfuerzo cortante en cualquier punto de la sección es directamente proporcional al cortante total en la sección y el momento estático con respecto al eje neutro, y es inversamente proporcional al momento de inercia de la sección transversal respecto al eje neutro, y al ancho de la viga.
- La magnitud del esfuerzo de corte a través de una sección transversal vertical en una viga rectangular varía según la forma de las ordenadas de una parábola, donde la magnitud es cero en las fibras exteriores máxima en el eje neutro.

2.6.1.2. Comportamiento de vigas de concreto reforzado

En una viga de concreto reforzada, el acero resiste la tensión provocada por los momentos flectores; y el concreto, por lo general, tiene la capacidad de resistir únicamente la compresión correspondiente. Esto se garantiza con las corrugas de las varillas de refuerzo que impide en el deslizamiento entre los materiales.

Cuando se aplica una carga en una viga de concreto reforzado y se incrementa gradualmente desde cero hasta la magnitud que ocasiona la falla, se distinguen distintas fases en su comportamiento. Mientras la carga se mantenga baja, el máximo esfuerzo de tensión en el concreto es menor que el módulo de ruptura, el concreto podrá resistir los esfuerzos de compresión y de tensión en ambos lados del eje neutro. Cuando se aumenta la carga se alcanza la resistencia de a la tensión del concreto y aparecen las primeras grietas provocadas por la tensión. Estas grietas ascienden con rapidez hacia el plano neutro, que también asciende con agrietamiento progresivo.

Finalmente se alcanza la capacidad de carga de la viga y aparece la falla, que puede presentarse de dos maneras dependiendo de la realización efectiva del punto de fluencia del refuerzo: cuando se emplea una cantidad de acero moderada, este alcanza su punto de fluencia y aparecen grietas de tensión en el concreto que se ensanchan de manera visible y se propagan hacia arriba. Luego las deformaciones unitarias en la zona de compresión del concreto se incrementan hasta que se origina una falla por compresión secundaria. Cuando se emplean grandes cantidades de acero o acero de alta resistencia en cantidades normales, la resistencia de compresión de concreto se agota antes que fluya el acero, por lo que el concreto falla por aplastamiento.

2.6.1.3. Suposiciones fundamentales para el comportamiento del concreto reforzado

Para predecir el comportamiento del concreto reforzado existen cinco suposiciones fundamentales que permiten expresar la mecánica de los elementos mediante cálculos. Estas son:

- Los momentos flectores, cortantes, y esfuerzos normales en una sección cualquiera del elemento están en equilibrio con los efectos de las cargas externas en dicha sección.
- La deformación unitaria de una varilla de refuerzo embebida es la misma que la del concreto circundante, a tensión o a compresión. En otras palabras, la adherencia entre los materiales es perfecta y no ocurre deslizamiento.
- Las secciones transversales planas permanecen planas aun cuando el elemento está siendo cargado.

- El concreto en una región del elemento que esté sometida a tensión estará, por lo general, fisurado; esto debido a que la resistencia a tensión del concreto es solo una mínima fracción de su resistencia a la compresión.
- Las relaciones esfuerzo-deformación reales y las propiedades de resistencia del concreto y del acero constituyen la teoría del diseño estructural.

2.6.1.4. Diseño de vigas reforzadas a tensión

El diseño de vigas de concreto reforzado está basado en el principio de resistir sobrecargas supuestas. La resistencia nominal de un elemento se obtiene con base en el conocimiento aproximado del comportamiento del elemento y del material. A esta resistencia se le aplica un coeficiente de reducción para obtener la resistencia de diseño. La resistencia requerida se calcula aplicando un coeficiente, mayorando las cargas de servicio esperadas.

Como primer paso en el diseño de vigas de concreto reforzado se realiza una distribución equivalente de esfuerzos, la cual identifica los esfuerzos a los que se encuentran sometidas las regiones de la sección medidas a partir de su eje neutro. Luego, se calcula la cuantía balanceada de acero con base en las condiciones de una falla balanceada entre el acero y el concreto. También se obtiene una cuantía máxima y mínima de acero, con el fin de conocer los rangos aceptables del refuerzo.

Con el momento flector de diseño, provocado por las cargas de servicio mayoradas, se calcula el área de refuerzo para dicho momento y se verifica que satisfaga las cuantías de refuerzo calculadas anteriormente. Todo refuerzo debe ser colocado de modo que obtenga un recubrimiento de concreto que lo aisle y lo proteja de las condiciones ambientales.

2.6.1.5. Vigas rectangulares con refuerzo a tensión y compresión

En caso que el concreto no tenga la capacidad de resistir la compresión ocasionada por el momento actuante, se añade refuerzo en la zona de compresión; lo cual se conoce como una viga doblemente reforzada, es decir una viga con refuerzo a tensión y a compresión. En algunos casos se coloca refuerzo en la zona de compresión ya que reduce las deflexiones a largo plazo o como soporte para los estribos de confinamiento.

2.6.1.6. Refuerzo a corte

El corte en vigas es producto de la flexión a la que está sometida el elemento, se presenta en forma de grietas que se extienden diagonalmente a lo largo de la viga. Estas se contrarrestan con la colocación de estribos de confinamiento y/o eslabones. Los códigos de diseño de estructuras de concreto distinguen zonas críticas de esfuerzos de corte, por ejemplo, el código ACI 318-08 establece un confinamiento más riguroso a una distancia de dos veces el peralte de la viga, medido a partir del rostro del elemento vertical en que se apoya la viga; el resto de estribos a una distancia de confinamiento máxima, generalmente la mitad del peralte efectivo, o la distancia que requiera el corte actuante, si ésta resultara ser menor.

2.6.1.7. Vigas T

Debido a que los tableros de concreto reforzado en su mayoría son monolíticos, el vaciado de concreto se realiza desde la parte inferior de la viga de mayor altura hasta la parte superior de la losa. Esto da como resultado una viga con una sección en forma de T. La parte superior de la losa actúa como la parte superior de la viga y resiste la compresión longitudinal, a esta parte se le conoce como el ala de la viga; la parte de la viga que queda por debajo de la losa se denomina alma.

2.6.2. Metodología de construcción

El proceso constructivo de vigas de concreto reforzado debe garantizar un producto que resista los esfuerzos de trabajo, para ello es necesario utilizar materiales de calidad y ejecutar la mezcla y el armado de modo que no se altere negativamente las características de los materiales.

2.6.2.1. Estudios necesarios previos a las fundiciones

Es el conjunto de estudios básicos para obtener la información necesaria para realizar la fundición de los elementos estructurales. Los estudios que sean necesarios llevar a cabo dependen de la magnitud y complejidad de la obra.

- Definir un banco de materiales del cual se extraerán los agregados del concreto. Se debe realizar las pruebas necesarias para verificar que cumplan con las especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras.

- Ya con los agregados definidos es necesario realizar un diseño teórico de mezcla basado en la resistencia del concreto que se va utilizar. Es recomendable ampliar el rango de resistencia de concreto a los 28 días, por ejemplo, si se diseña un concreto de 5000 libras sobre pulgada cuadrada, buscar que a los 28 días tenga una resistencia de 5500 libras sobre pulgada cuadrada. En el caso de utilizar concreto de 5000 libras sobre pulgada cuadrada se recomienda utilizar un cemento tipo portland de alta resistencia inicial con adición de puzolana natural.
- Realizar una prueba de bacheo cuando se tenga el diseño teórico y los materiales.
- Añadir aditivos reductores de agua, que mejoran la trabajabilidad del concreto y aumenta su resistencia.
- Luego de haber realizado la prueba de bacheo, se deben realizar los siguientes ensayos al concreto:
 - Temperatura del concreto (ASTM C 1064)
 - Revenimiento del concreto (ASTM C 143)
 - Peso unitario del concreto (ASTM C 138)
 - Contenido de aire del concreto, por el método volumétrico o de presión (ASTM C 231 o ASTM C 173)
 - Elaboración y curado de cilindros de concreto (ASTM C 31)
 - Ensayos a compresión de las muestras a 7, 14 y 28 días

Si las muestras de concreto logran los resultados esperados, se tomarán como base para las fundiciones del puente.

Si se va a contratar los servicios de una empresa de concreto premezclado se debe solicitar al proveedor un certificado de calidad de sus productos y un listado de resultados ensayos a compresión de concreto suministrado en otros proyectos en los meses recientes.

Solicitar un certificado de calidad para el acero de refuerzo verificando que este es grado 60 legítimo. Para ensayar las varillas se hacen probetas de 1 metro de largo para enviarlas al laboratorio y determinar si cumple su $f'y$.

Tomar como base las Especificaciones Generales de Construcción de Puentes y Carreteras y/o el código ACI para la aceptación o rechazo de materiales.

2.6.2.2. Armado y fundición

El armado y fundición de vigas de concreto reforzado pueden trabajarse en dos formas distintas igualmente validas para conveniencia de la unidad ejecutora:

- Vigas prefabricadas en campamento

El primer paso de este procedimiento consiste en fundir una plantilla de limpieza que servirá como el piso de la viga. Luego se realiza el armado según las indicaciones del diseño. Terminado el armado, se funde con concreto de alta resistencia.

A la viga fundida se le deben suministrar ganchos, los cuales servirán para que sea sujeta por una grúa. La ubicación de estos ganchos debe ser

determinada por un especialista, ya que una instalación incorrecta puede inducir esfuerzos no deseados en la viga.

Se debe trazar donde quedarán las vigas principales sobre las vigas de apoyo antes de su colocación. También, tendrá que haberse verificado previamente que el neopreno cumpla con lo establecido en el diseño y las Especificaciones Generales de Construcción de Puentes y Carreteras; para ello se solicitará un certificado de calidad al proveedor.

- Vigas reforzadas *in situ*, sobre obra falsa

Es el método más utilizado en el país. Inicialmente debe diseñarse la obra falsa que soportará la viga. La obra falsa consta de torres de soporte y una estructura a lo largo del puente.

Una vez definida la ubicación de las torres, se realizan fundiciones de concreto ciclópeo para nivelar el terreno y que las cargas sean transmitidas al suelo. A menos que se incluyan como un renglón especial, estas fundiciones no se pagan porque no son estructurales. Este montaje debe trabajarse en tiempo de estiaje para evitar que el agua socave la cimentación. La mayoría de los accidentes en puentes se han dado por la socavación de obra falsa.

Ya colocadas las torres se procede a la colocación de la estructura, que es un tipo de puente Bailey. Ésta puede armarse de varias formas, se puede lanzar, colocar pieza por pieza o colocar todas las piezas a la vez.

El nivel de la estructura estará más o menos treinta centímetros por debajo del nivel de la viga de apoyo terminada. Se debe tomar en cuenta que el neopreno ira colocado sobre la viga de apoyo al momento de nivelar el piso de

la viga principal con el peralte de la viga de apoyo. A esta colocación de piso se le debe dar una contraflecha al centro debido a que la fundición tiende a provocar asentamiento en la estructura. El piso de la viga no se coloca directamente sobre la estructura si no sobre balules y tendales de madera a lo largo del puente.

Luego se realiza el armado y fundición de la viga utilizando concreto de alta resistencia. Finalmente, dar el tiempo de fraguado requerido.

2.6.3. Ventajas y desventajas

Para aplicar satisfactoriamente el concreto reforzado en una construcción, la unidad ejecutora debe tomar en cuenta los puntos fuertes y los puntos débiles del material.

- Ventajas
 - Se trata de un sistema con aceptación universal, por la disponibilidad de los materiales que lo componen.
 - Tiene la adaptabilidad necesaria para conseguir diversas formas arquitectónicas.
 - Tiene la característica de conseguir ductilidad.
 - Posee alto grado de durabilidad.
 - Posee alta resistencia al fuego.

- Tiene la factibilidad de lograr diafragmas de rigidez horizontal.
- Posee gran capacidad resistente a los esfuerzos de compresión, flexión, corte y tracción.
- Requiere de muy poco mantenimiento.
- Es resistente al efecto de agua.
- No requiere mano de obra calificada.
- Por su gran peso propio, la influencia de las cargas móviles es menor.
- Desventajas
 - Los elementos tienen excesivo peso y volumen.
 - Poca resistencia a la tracción, la cual causa agrietamientos.
 - Implica un tiempo de espera significativo debido a que deben realizarse las operaciones de encofrado, habilitación, vaciado, esperar hasta que el concreto alcance la resistencia requerida y desencofrado.
 - Es menos eficiente que el acero para cubrir grandes luces, esto debido a que la relación compresión-peso del acero es mucho mayor que la del concreto reforzado.

- Debe tomarse el peso propio del elemento como un parámetro fundamental en el diseño, ya que se requieren secciones de mayor tamaño.
- Conlleva a un control permanente, pues su calidad se ve afectada por las operaciones de mezcla, colocación, curado.
- Genera gran variedad de deflexiones con el paso del tiempo, especialmente si el elemento se encuentra bajo la acción de cargas sostenidas; en este caso la deformación se incrementa constantemente con el tiempo.

2.7. Vigas de concreto postensado

Las vigas de concreto postensado son básicamente vigas de concreto reforzado en las que se emplean materiales con características especiales y se aplican esfuerzos de tensión al elemento antes de someterlo a las cargas de trabajo, con el fin de mejorar su comportamiento estructural.

2.7.1. Descripción

Los elementos del concreto postensado son aquellos en los que se inducen esfuerzos intensos de una magnitud y distribución de modo que contrarresten hasta cierto grado los esfuerzos provocados por cargas externas. El postensado aplica una compresión previa a las cargas de servicio al elemento, lo cual reduce los esfuerzos de tensión. Esto minimiza o elimina en su totalidad el agrietamiento que origina las cargas de servicio.

2.7.1.1. Efectos del sistema del postensado

En general, el postensado reduce o elimina los esfuerzos de tensión debido a que la resistencia a la tensión de concreto es casi nula y poco confiable. La teoría distingue al menos tres puntos de vista para observar los efectos del postensado: como un método para introducir esfuerzos equivalentes en un elemento de concreto reforzado con el fin de contrarrestar las cargas aplicadas hasta cierto punto; como un tipo especial de concreto reforzado en el que se emplea acero de alta resistencia previamente reforzado con concreto que generalmente también es de alta resistencia; y como un método de control de esfuerzos en el concreto, que precomprime el concreto para disminuir o suprimir la tensión que ocasiona las cargas aplicadas.

2.7.1.2. Equipos para el sistema de postensado

El equipo empleado en el proceso de tensado de concreto es variado y complejo y básicamente tiene la función de anclar los cables de tensado al elemento y aplicar fuerzas de tensión periódicamente.

- Bomba hidráulica

Éstas pueden proporcionar una presión máxima de aceite de 700 kilogramos sobre centímetro cuadrado. Disponen de manómetros para controlar con exactitud las fuerzas de tensado y clavado. Todos los manómetros deben ser regulados regularmente utilizando manómetros patrón certificados oficialmente. Las válvulas de regulación internas permiten limitar las presiones máximas en las cámaras de tensado, retorno del pistón principal y clavado. La bomba incluye sus mangueras hidráulicas de conexión, las cuales están

garantizadas para resistir presiones de aceite de hasta 800 bares. (Ver figura 14).

Figura 14. **Central hidráulica**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- **Gato de tensado**

En su equipamiento incluye el marco de apoyo y la placa de clavado, los cuales sirven para su posicionamiento. Su funcionamiento es totalmente automático, posee dos dispositivos hidráulicos internos independientes entre sí: el dispositivo de tensado y el dispositivo de clavado de cuñas. El dispositivo de tensado consiste en su cilindro hidráulico hueco de doble efecto que admite presiones interiores de hasta 700 bares. Además, contiene un mecanismo de

sujeción de los cordones llamado arrastre. El dispositivo de clavado de cuñas es también un cilindro hidráulico hueco de doble efecto, el cual permite el empuje de la placa de clavado contra las cuñas de anclaje.

Cada modelo de gato puede adaptarse a varios tipos de anclaje cambiando su arrastre, placa de clavado y marco de apoyo. (Ver figura 15).

Figura 15. **Gato de postensado**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- **Inyectadora**

Tiene la funcionalidad de mezclar e inyectar mortero en una misma pieza general, con dispositivo y mandos fácilmente maniobrables en tablero o a distancia. Para ello, consta de dos tanques independientes, uno para batir la mezcla y otro para la inyección. En el interior de ambos tanques existen palas

que mezclan el mortero y lo mantiene en movimiento durante la inyección. (Ver figura 16).

Figura 16. **Inyectora**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

- **Anclajes**

Son dispositivos capaces de retener efectivamente los cables transmitiendo su carga a la estructura. Existe anclajes activos y anclajes pasivos; los anclajes activos permiten la introducción de una fuerza de tensado en el tendón mediante gatos hidráulicos; y los anclaje pasivos son los que

bloquean automáticamente los cordones al ser introducidos dentro de la placa de anclaje. (Ver figura 17).

Figura 17. **Anclajes**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

2.7.1.3. Acero para postensado

El acero que debe utilizarse en elementos postensados funciona únicamente cuando es de alta resistencia. Esto fue comprobado en los primeros ensayos de postensado de concreto cuando las varillas perdían rápidamente el postensado conseguido debido al flujo plástico de concreto y la retracción del fraguado. La mayoría de las veces se utilizan torones de siete hilos, alambrones individuales y varillas de acero aleado como acero de postensado.

Tabla I. Especificaciones de diámetro

Diámetro Estándar	Grado (ksi)	Peso (lbs/1000 ft)	Resistencia Mínima (lbs)	Pie Lineal por Torón	Área Nominal (plg ²)
Baja Relajación Brillante					
3/8"	270	289	23 000	22 000	0,085
7/16"	270	391	31 000	16 000	0,115
1/2"	270	512	41 300	12 000	0,153
9/16"	270	637	51 700	10 000	0,192
0,600"	270	744	58 600	8 500	0,217
0,618"	270	796	62 270	8 000	0,230
Baja Relajación Galvanizado					
3/8"	240	299	21 200	12 000	0,085
1/2"	240	517	41 300	12 000	0,153
0,600"	240	750	54 500	7 700	0,217
Baja Relajación de Extrusión					
1/2"	270	577	41 300	5 720	0,153
0,600"	270	806	58 600	4 100	0,217

Fuente: Grupo Muratori S.A.

2.7.1.4. Concreto para postensado

Generalmente, en estructuras de concreto postensado se utiliza concreto de resistencia a la compresión considerablemente mayor que el que se utiliza en estructuras de concreto reforzado común. Esto se fundamenta en varias razones: en primer lugar, porque el concreto de alta resistencia posee un módulo de elasticidad superior. Esto reduce la deformación elástica inicial que tiene lugar al aplicar el postensado; además, soluciona los problemas ocasionados por los grandes esfuerzos de contacto en los extremos de las vigas, donde el postensado se transfiere desde los tendones hasta los dispositivos de anclaje, que se apoyan sobre el concreto.

Asimismo, el concreto de alta resistencia permite el despliegue de esfuerzos de adherencia superiores, los cuales son comunes en la construcción del postensado; finalmente, cuando la construcción postensada es prefabricada con el concreto trabajado de forma controlada y cuidadosa, se facilita la consecución de resistencias altas.

2.7.1.5. Análisis elástico a flexión

Para elementos de concreto postensado los elementos se dimensionan de modo que los esfuerzos en el concreto y en el acero se mantengan dentro de los rangos permitidos bajo las cargas reales de servicio, dichos rangos son una fracción de las capacidades reales de los materiales. Esta metodología está basada en que el objetivo del concreto postensado es mejorar el comportamiento de los elementos ante la aplicación de las cargas de servicio. Un enfoque útil es visualizar las fuerzas del postensado como un sistema de fuerzas externas aplicadas sobre un elemento de concreto, el cual debe permanecer en equilibrio bajo la acción de estas fuerzas.

Se debe tomar en cuenta los componentes de la fuerza de postensado y la inconstancia de su magnitud, además, de los puntos límite de la sección transversal del elemento.

2.7.1.6. Resistencia a la flexión

En una viga postensada el aumento del momento flector es resistido por un incremento proporcional en la distancia entre las resultantes de las fuerzas a tensión y compresión, con la resultante de compresión que asciende a medida que se incrementa la carga. La magnitud de las fuerzas internas permanece casi invariable generalmente hasta un poco más allá de las cargas de servicio. Todo esto varía drásticamente cuando se presenta el agrietamiento a tensión

por la flexión inducida en la viga postensada; cuando se fisura el concreto aumenta súbitamente el esfuerzo en el acero, esto debido a que la tensión que resistía el concreto que transfiere al acero.

Luego del agrietamiento, la viga de concreto postensado se comporta igual que una viga de concreto reforzado común. Por tanto, los métodos utilizados para calcular la resistencia en las vigas de concreto reforzado pueden aplicarse para una viga postensada con algunas modificaciones: la diferencia entre las curvas esfuerzo-deformación unitaria de las varillas comunes de refuerzo y las de acero de postensado; y la deformación ya presente en el acero postensado antes de cargar la viga.

2.7.1.7. Preesfuerzo parcial

El preesfuerzo total puede dar lugar al surgimiento de algunos problemas, por ejemplo, en vigas totalmente preesforzadas en las que rara vez se aplique la carga viva total, pueden darse contraflechas que aumentan con el tiempo por la fuerza de preesfuerzo excéntrica ante el flujo plástico del concreto. Además, estas vigas pueden presentar una tendencia a un acortamiento longitudinal severo ocasionando grandes fuerzas de restricción.

Actualmente se identifican varias ventajas del preesfuerzo parcial, entre estas: permite cierto nivel de esfuerzos de tensión por flexión y un nivel limitado de agrietamiento con la carga de servicio total, la cual probablemente ocurrirá con una frecuencia muy baja. Con el preesfuerzo parcial se evita la contraflecha excesiva y el acortamiento axial perjudicial. Cuando se presente la carga total de servicio se formarán grietas, las cuales se cerrarán totalmente cuando se retire la carga viva. La cantidad de acero de preesfuerzo se reduce en vigas parcialmente preesforzadas aunque debe mantenerse un margen de seguridad

y deberá colocarse un refuerzo adicional a tensión en forma de varillas de refuerzo comunes no preesforzadas, esto para alcanzar la resistencia necesaria a flexión.

2.7.1.8. Selección de la forma

Seleccionar las proporciones y dimensiones de la sección transversal para producir una viga con características casi ideales para determinar la situación es una de las características especiales del diseño en concreto postensado. Algunas de las secciones se producen individualmente para algún caso en especial y otras se han estandarizado y se fabrican en masa. El diseñador puede elegir la sección que mejor le convenga incluso si está es asimétrica.

2.7.1.9. Pérdidas del preesfuerzo

La fuerza de preesfuerzo inicial empieza a perderse inmediatamente después de la transferencia, debido al acortamiento elástico del concreto, el desplazamiento de los anclajes y las pérdidas por fricción a lo largo de los tendones.

Con el paso de los meses la retracción de fraguado el flujo plástico del concreto y la relajación del acero, que ha sido sometido a altos esfuerzos, provocan una reducción a un mayor de la fuerza de preesfuerzo. Las pérdidas del preesfuerzo únicamente pueden estimarse y pueden suponerse con base a expresiones empíricas o, si se requieren mayor precisión, pueden estimarse por separado tomando en cuenta la geometría del elemento, comportamiento de los materiales y métodos de construcción. Puede obtenerse un valor de las pérdidas más preciso si se toma en cuenta la interdependencia de las pérdidas

dependientes del tiempo, sumando las pérdidas en una secuencia de intervalos discretos de tiempo.

2.7.1.10. Refuerzo a corte

El diseño a cortante en vigas postensadas se basa en que el cortante que resiste el concreto mas el cortante del refuerzo del alma dan lugar a una magnitud superior al cortante generado por las cargas mayoradas.

En el cálculo del cortante por cargas mayoradas se supone que la sección critica se localiza a un distancia igual al peralte de la viga dividido dos. El cortante que resiste el concreto después de la aparición del agrietamiento se supone igual al cortante ocasionado por la primera grieta diagonal. El cortante resistente del acero se calcula igual que en las vigas de concreto reforzado ordinarias, es decir, directamente proporcionales al área de la varilla de confinamiento, la resistencia nominal del acero, el peralte efectivo; e inversamente proporcionales al espaciamiento de los estribos.

2.7.2. Metodología de construcción

Los estudios previos necesarios utilizados en las vigas de concreto reforzado aplican también para las vigas de concreto postensado, los cuales fueron mencionados en la sección 2.6.2.1.

2.7.2.1. Armado y fundición

El armado y fundición de vigas de concreto postensado se lleva acabo empleando los mismos dos métodos mencionados en la sección de vigas de

concreto reforzado, pero con algunos pasos adicionales; además puede aplicarse un tercer método conocido como vigas prefabricadas por partes.

- Vigas prefabricadas en campamento

El procedimiento es el mismo que en vigas de concreto reforzado hasta el momento en que se termina el armado. A partir de este punto se coloca cable y ducto de preesfuerzo, se enconfra la viga y se funde con concreto de alta resistencia. El procedimiento de postensado será descrito en la sección 2.7.2.2., Sistema de postensado.

Terminado este paso, se sigue el mismo procedimiento que en vigas de concreto reforzado a partir de la colocación de ganchos. Tener en cuenta solicitar el certificado de calidad del acero de preesfuerzo.

- Vigas postensadas *in situ*, sobre obra falsa

Nuevamente se repite el procedimiento de vigas de concreto reforzado hasta la colocación de piso de la viga y el armado, habiendo completado estos pasos, se coloca el cable y el ducto y se funde con concreto de alta resistencia.

Luego de completado el tiempo de fraguado se lleva a cabo el trabajo de postensado.

- Vigas prefabricadas por partes

Este método consiste en fundir la viga principal en dos o tres partes. El largo depende de la luz de la viga y que sea viable transportar la viga en una plataforma.

En el campo se deben armar torres donde se apoyaran las vigas, las cuales fueron diseñadas para soportar la carga.

Ya montada las vigas, se unen las partes con la armadura. Luego se introducen los cables de preesfuerzo para después fundirlos con concreto de alta resistencia y aditivos que unan concreto nuevo y concreto viejo.

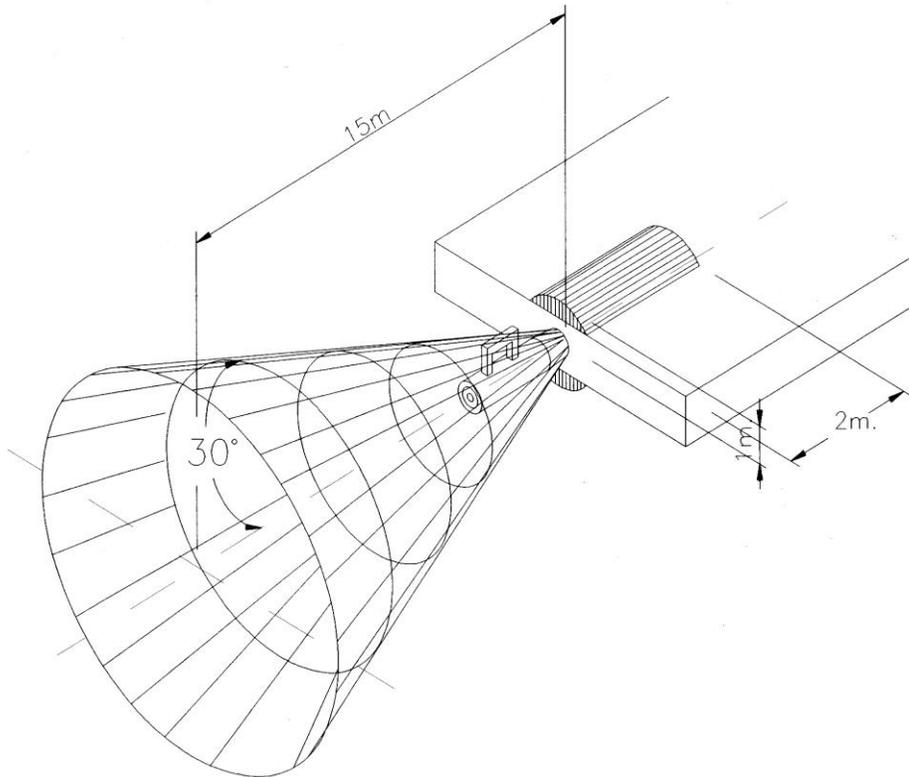
Después de fundir la viga, esta se tensa verificando que se cumpla con la resistencia mínima para tensado que se especificará en la sección 2.7.2.2. Sistema de postensado.

2.7.2.2. Sistema de postensado

Los trabajos de postensado requieren de personal profesional experto en la dirección de estas operaciones. Tres procedimientos requieren especial precaución: el enfilado de cables, el tensado de manojos de cables y la inyección de lechada dentro los cables.

Durante cualquier operación de tensado queda absolutamente prohibido a las zonas denominadas como zonas de riesgo. (Ver figura 18).

Figura 18. **Zona de riesgo**



Fuente: Grupo Muratori S.A.

El riesgo durante un operación de tensado surge de algunas situaciones accidentales que teóricamente pudieran originarse, por ejemplo: rotura repentina de alambres o cables completos; colapso repentino de concreto en la zona de tensado; deslizamiento de cables durante el tensado; ruptura repentina de mangueras, enchufes rápidos o conexiones hidráulicas con presiones de aceite altas.

- Colocación de campanas

Habiendo verificado que se cuenta con todo el material de montaje y que el número y tipo de campanas es el requerido, se procede a la instalación.

Generalmente se dispone de cajuelas adheridas al encofrado exterior, las cuales permiten fijar las campanas en el ángulo requerido por el cable y, que al ser posteriormente rellenos, cubren y protegen el anclaje; esto debido a que el eje de la trompeta debe de coincidir con el del tendón y éste no tiene porque ser perpendicular a las paredes de la formaleta exterior de la estructura a postensar. Con la asistencia de un especialista, se debe comprobar que se han identificado claramente las posiciones donde se instalaran las campanas, y que en el centro geométrico de dichas posiciones se ubican orificios que permiten cómodamente el paso del cable.

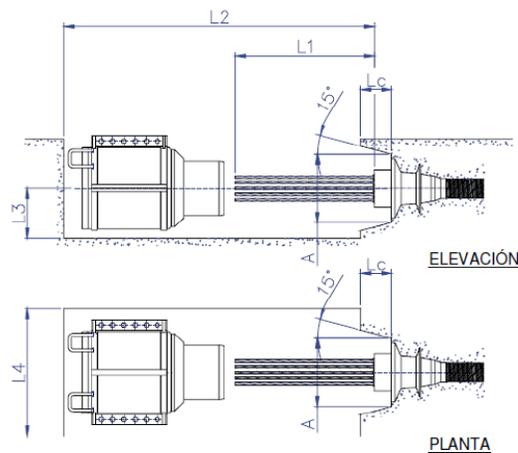
Es necesario comparar las dimensiones de las cajuelas para comprobar que permiten la introducción del gato de tensado y sus movimientos durante las operaciones de tensado. Para ello se debe proveer las dimensiones mínimas de los cajetines que se requieren para el sistema postensado. Dichas dimensiones mínimas se adjuntan en la tabla II y se muestra en la figura 19.

Tabla II. Dimensiones mínimas de cajuelas

Cable	Cantidad de cables	L1	L2	L3	L4	A	LC
		mm	mm	mm	mm	mm	mm
0,6" (15 mm)	4	800	1 750	188	410	220	120
	5	800	1 650	200	450	220	120
	7	800	1 650	200	450	244	131
	9	850	1 700	240	580	270	130
	12	850	1 700	240	580	304	142
	15	900	1 750	280	660	332	148
	19	900	1 750	280	660	364	164
	24	1 000	2 000	380	760	406	165
	27	1 000	2 000	380	800	445	175
	31	1 000	2 000	380	800	445	185
0,5" (13 mm)	37	1 000	2 100	430	860	494	198
	43	1 000	2 060	430	1 000	510	210
	4	800	1 750	188	410	220	115
	5	800	1 750	188	410	220	115
	7	800	1 750	188	410	220	115
	9	800	1 650	200	450	344	120
	12	850	1 700	240	580	270	125
	15	850	1 700	240	580	304	130
	19	900	1 750	280	660	332	140
	22	900	1 750	280	660	364	145
27	1 000	2 000	380	760	445	155	
31	1 000	2 000	380	760	445	160	
35	1 000	2 000	380	760	445	165	

Fuente: Grupo Muratori S.A.

Figura 19. Dimensiones mínimas de cajuelas



Fuente: Grupo Muratori S.A.

Luego se seleccionan los tornillos de fijación de las campanas al encofrado, de modo que su métrica sea la máxima que admiten los agujeros de las campanas, su longitud les permita atravesar el encofrado, y colocar sin problemas las arandelas y tuercas necesarias.

Posteriormente, se identificaran los puntos del encofrado que se deben taladrar para permitir el paso de los tornillos de fijación, utilizando una plantilla u otro método de precisión similar.

Realizado los pasos anteriores, se procede la colocación de las campanas en su posición sujetándolas al encofrado con los tornillos de fijación o alambre de amarre. Para este paso se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Para evitar que existan aberturas que permitan el paso de concreto o lechada, al interior de la campana, la superficie plana de la misma deberá ir apoyada uniformemente contra el encofrado. Si se detectaran aberturas es recomendable asegurarlas con masilla o *masking tape*.
- Situar en el nivel más alto el agujero de inyección de las campanas.

De considerarse oportuno, pueden sustituirse los tornillos de fijación por clavos que, situados en los puntos adecuados, aseguren la posición y estabilidad de la campana durante todas las fases constructivas previas a la fundición.

- Colocación de ducto y poliducto para inyección

Inicialmente se debe comprobar que el tipo de ducto a instalar coincide con lo previsto en el proyecto. Los diámetros interiores de ducto corrugado que se utilizan normalmente se encuentran en la tabla III.

Tabla III. **Diámetros de ductos corrugados**

Cordón	Vaina del tendón		
	Tipo de tendón	Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)
Cable 13 mm (0.5")	4	51	56
	7		
	9	62	67
	12	72	77
	15		
	19	85	90
	22	90	95
	27	100	105
	31	110	115
	35		
Cable 15 mm (0,6")	4	51	56
	5		
	7	62	67
	9	72	77
	12	85	90
	15	90	95
	19	100	105
	24	110	115
	27	120	125
	31		
	37	130	137

Fuente: Grupo Muratori S.A.

Se tomará en cuenta las siguientes consideraciones:

- Verificar que las cantidades de ducto y de coplas coinciden con las cantidades previstas.
- Planificar el sistema de corte de ducto para ajustar las longitudes de montaje necesarias, optimizando el número de cortes y desperdiciando el mínimo de sobrantes. El ducto se suministra normalmente en tubos de 5 a 6 metros con coplas roscadas de 20 centímetros en sus extremos.
- Facilitar la instalación del ducto trazando lecturas a lo largo del piso de la viga, colocar las lecturas de cada uno de los ductos adhesivos que no se borren con la lluvia.
- Colocar los ductos siguiendo las cotas previstas en el proyecto. Las cotas se fijan siguiendo estos pasos:
 - Instalar pines horizontales de apoyo ubicados en las cotas especificadas para el ducto, sin tomar en cuenta el radio del mismo. La distancia entre pines de apoyo será de 1 metro aproximadamente.
 - Asegurar la inmovilidad de los pines de apoyo durante el montaje y fundición de la estructura.

El diámetro recomendado para los pines de apoyo depende de la luz libre y del tipo de cable a sostener, pero se recomienda un mínimo de $\frac{1}{2}$ pulgada para cables de hasta 12/0,6 de pulgada y de $\frac{3}{4}$ pulgada para cables superiores.

Posicionados los pines de apoyo, se colocan los ductos en posición, apoyándose en ellos y conectando uno a uno distintos tubos que se necesiten. Para conectar dos tubos de ducto, se enrosca totalmente la copla en uno de ellos, se enfrentan cara a cara los tubos de ducto a unir y, luego, se va desenroscando la copla en el que estaba, enroscándose simultáneamente en otro tubo de ducto. El resultado final debe ser media copla enroscada en cada uno de los ductos. Asegurar la conexión con la copla encintando con *masking tape* sus zonas extremas.

El ducto penetrara dentro de la campana al menos 60 milímetros en los extremos del cable, generalmente el ducto continúa atravesando la campana y el encofrado, asomando al exterior aproximadamente 150 milímetros. En este momento, los ductos reposan sobre los pines de apoyo sin estar fijos a los mismos y sin haber sellado las conexiones ducto-campana.

Seguidamente se fijan los ductos con alambre de amarre en los pines de apoyo para evitar que estos se desplacen a enfilarse con cable y fundir la estructura. Se deben fijar firmemente, pero sin provocar deformaciones en el ducto.

Es importante comprobar que no existan quiebres en el trazo del ducto. De lo contrario, comprobar la acotación existente y, si es la prevista, comunicar el caso a la Dirección de Obra antes de continuar el montaje.

Las tolerancias en posición del ducto serán las siguientes:

- En sentido lateral

Si b es la dimensión lateral de la pieza a la altura de la armadura y en la sección considerada:

Desviación lateral máxima:

Para $b < 20$ cm	7 mm
Para 20 cm $< b < 60$ cm	13 mm
Para $b > 69$ cm	25 mm

- En sentido vertical

Si h es el canto total en la sección considerada:

Desviación vertical máxima:

Para $h < 20$ cm	7 mm
Para 20 cm $< h < 60$ cm	10 mm
Para $h > 69$ cm	25 mm

Las máximas ondulaciones localizadas permitidas serán inferiores a 1 centímetro en una longitud de 1 metro.

Una vez ubicados los ductos, se asegura la inmovilidad de la conexión campana-ducto utilizando *masking tape*. En este momento se verifica que las campanas tengan su armadura de refuerzo, la cual consiste en un zuncho de varilla número 3 de 15 centímetros de diámetro y el paso debe ser de 8 centímetros. También debe corroborar que el eje del ducto y el eje de la

campana son el mismo en el punto de conexión de ambas y que coinciden tras la campana en una longitud L , según el tipo de anclaje de acuerdo a la tabla IV.

Tabla IV. **Longitud de anclajes**

Tipo de anclaje		L (mm)
0,5"	0,6"	
4, 5, 7 y 9	4, 5 y 7	600
12, 15, y 19	9, 12 y 15	900
22, 27, 31, y 35	19 y 24	1 200
	27, 31 y 37	1 500

Fuente: Grupo Muratori S.A.

Finalmente, se coloca el poliducto para inyección. Con esto se da por concluida la instalación general de los elementos que irán embebidos en el concreto y se puede realizar la inspección general de montaje.

- Enfilado de cables, montaje de empalmes y de anclajes pasivos

Cuando el ducto está colocado, se enfilan por completo todos los manojos de cable, asegurando que la longitud donde eran instalados los olivos en el extremo del anclaje pasivo, sea suficiente para este propósito.

Los manojos de cable deben extenderse en una superficie libre de polvo, para que el cable no entre en contacto con el suelo se colocaran cargadores de madera a cada cierta distancia. En el extremo del manajo que ingresara inicialmente en el ducto se coloca una protección de waipe y *masking tape* para evitar que las puntas golpeen el ducto y lo rompan.

Después, se aplica aceite soluble, preferiblemente con una bomba agrícola, para lubricar el cable.

Los manojos deben enfilarse a mano, ubicando al menos una persona cada dos metros a lo largo del manajo y todo el manajo será cargado por todo el personal al introducirlo en el ducto.

- Montaje de anclaje muertos

El anclaje muerto consiste en separar los cables del manajo en el extremo que se va a instalar, introduciendo una platina, tuercas y un amarre de confinamiento para evitar que la tuerca se salga. Dicho anclaje quedara embebido en el concreto.

Para empezar, se igualan las longitudes del manajo tomando en cuenta la longitud mínima requerida para el montaje previsto y que se mantengan las longitudes totales del tendón establecidas en el proyecto. Este tipo de anclaje puede fabricarse antes o después del enfilado, teniendo en cuenta que si es antes, se debe ubicar bien donde se realizara el tensado.

Para instalar los anclajes muertos, se coloca la platina, la cual consiste en un plano de 6 x 8 pulgadas y un espesor de 1/8 pulgada, con doce perforaciones distribuidas de un diámetro de 5/8 pulgada.

Luego, se desentorcha cada uno de los hilos de los cables introduciendo una tuerca de 1/2 pulgada a una longitud de 40 centímetros del extremo del cable; al terminar de colocar esta tuerca, nuevamente se entorchan los hilos hasta alcanzar el extremo final, dejando la tuerca introducida en el hilo medio del cable. Se hace un amarre de confinamiento a 5 centímetros en el extremo

final de los cables, después se desentorchan los hilos y se hace un dobléz a 90 grados del eje del cable.

Una vez finalizado en anclaje muerto, se verifica que el centro de los cables esté en la lectura indicada en los planos. También se ubican zunchos con una separación de 8 centímetros desde el final del ducto hasta la platina.

- Instalación de manguera para inyectado

La función de la manguera consiste en que, fundida la viga, se inyecta lechada de cemento en uno de los extremos, saliendo está por la manguera instalada en el otro extremo.

La manguera es de poliducto con un diámetro de $\frac{3}{4}$ pulgada. Se introduce por lo menos 20 centímetros dentro del ducto y deberá salir al menos una longitud de 60 centímetros sobre el nivel de losa terminada. Finalmente se llena con waípe en el extremo del ducto formando un tapón, el cual se sellará encintando con *masking tape*.

- Colocación de placas activas y cuñas

El montaje de las placas y las cuñas se realizara después que los cables de postensado hayan sido enfilados, después del a fundición y antes del tensado para evitar problemas con el tensado ocasionados por oxidaciones en los conos de las placas o en la cuñas. Las placas y cuñas se montarán como máximo tres días antes del tensado.

En primer lugar, debe comprobarse que las superficies vistas de las campanas estén limpias de lechada y otros elementos extraños, permitiendo

que las placas de anclaje y el marco de apoyo del gato de tensado se apoyen perfectamente.

Luego se comprueba que el cono interior de la campanas este limpio de lechada y otros cuerpos extraños.

Posteriormente, se retira el ducto sobrante en el interior del cono de la campana.

Luego se corta con la sierra radial todos los manojos de cada anclaje, de modo que queden de un mismo largo, pero verificando que dicha longitud es igual o superior a la minina exigida por el gato de tensado que se va a utilizar.

Después, se introduce la placa de anclaje insertando los cables de los agujeros de la misma. Al insertar los cables se debe comprobar que no existen cruces visibles. Existen diversos métodos de inserción, el especialista encargado deberá decidir el método al emplear según su experiencia.

Cuando los cables estén insertados en la placa de anclaje, ésta se empuja hasta que haga contacto con la campana.

Debe verificarse que el gato esté centrado y ajustado en el marco de apoyo.

A continuación, se colocan las cuñas; para ello se introducirán en los extremos de los cables y luego, con ayuda de un tubo, se empujan hasta que se inserten en el agujero cónico correspondiente de la placa de anclaje. Acto seguido, dando un par de golpes secos con el tubos, se obtendrá un ligero clavado manual de las cuñas.

- Tensado de cables

La resistencia mínima del concreto requerida al momento del tensado, depende de la fuerza de tensado y de las condiciones de contorno del anclaje. Los valores aproximados de resistencia mínima en función de la fuerza de tensado de cable se encuentran especificados en la tabla V.

Tabla V. **Resistencia mínima del concreto**

Fuerza de tensado (%Fu)	Resistencia mínima del concreto (N/mm²)
85	30,5
82	28,7
75	27,0
70	24,6

Fuente: Grupo Muratori S.A.

Para procurar un fácil acceso a las zonas de anclaje, se debe extraer la madera de encofrado que se utilizó para dar forma al cajetín del anclaje después del endurecimiento del concreto.

Determinar el orden y la magnitud de las fuerzas de tensado recaerá en el proyectista. En caso contrario, será la empresa constructora la que se tome este deber. El cálculo de las fuerzas de tensado deben incluir las pérdidas de presión internas del equipo de tensado y considerar la calibración de los manómetros.

Concluido el enfilar de cables, deben cortarse los extremos que sobresalen del anclaje para igualar su tamaño pero conservar su longitud

mínima de agarre. Para realizar este corte se permite únicamente utilizar máquinas de corte con discos abrasivos. Después de haber cortado los cables, se deben limar las puntas e instalar placas de anclaje con sus respectivas cuñas.

Seguidamente, se comprueba que el gato, el arrastre, la placa de clavado, y el marco de apoyo son los indicados para el cable a tensar.

Deben instalarse mangueras que conecten el gato con la bomba hidráulica conectando los enchufes rápidos. Es importante comprobar que los enchufes rápidos estén debidamente apretados y que las mangueras se coloquen en el orden con la bomba hidráulica.

Se pone en funcionamiento la bomba hidráulica y se comprueba que el equipo de tensado funciona adecuadamente, moviendo el pistón de gato en ambos sentidos y controlando el movimiento de clavado del cilindro de clavado. La presión operativa de estos movimientos no debe superar los 150 bares en las cámaras del cilindro principal. Después de comprobar el clavado puede alcanzarse la máxima presión de clavado, la cual habrá sido fijada previamente con las válvulas de regulación de la bomba hidráulica.

Habiendo realizado estos pasos, puede darse inicio a la operación de tensado. Los anclajes deben tensarse en el orden que especifica el proyecto.

Para tensar un cable, debe empezarse por colocar el marco de apoyo alrededor de la placa de anclaje. Luego debe insertarse la placa de clavado a través de los cables de anclaje. Se recomienda utilizar tubos huecos que actúan como elementos de guía. Cuando todos los cables han atravesado la

placa de clavado, se desplaza la placa de clavado hasta que contacte con las cuñas para asegurar que no se cruzan los cables.

Posteriormente, se ubica la placa de clavado cerca del extremo exterior del manojó de cables. Así la placa de clavado facilita el enhebrado de los cables en el arrastre del gato.

Generalmente se requiere un ligero zarandeo manual de la placa de clavado que ayuda a los cables a encontrar sus respectivos agujeros de inserción en el arrastre.

Cuando los cables hayan atravesado la parte frontal del arrastre, se mueve el gato hacia delante con movimientos leves hasta contactar con el marco de apoyo.

Antes de comenzar a tensar se verifica que el marco de apoyo y la trompeta de anclaje están en completo contacto, como el marco de apoyo y la nariz del gato.

La fuerza de tensado se introduce en escalones consecutivos de carga por lo general se aplican intervalos de 100 bares.

Se debe registrar la longitud del pistón sobresaliente del cuerpo principal del gato y la presión que se ha alcanzado en el manómetro de la bomba hidráulica al final de cada escalón de carga. Estas mediciones permiten calcular la curva de presión-alargamiento. Las mediciones inician al final del primer escalón de carga.

Este escalonamiento se repite hasta alcanzar la fuerza final especificada o hasta que se agote la carrera del gato. Es recomendable mantener un control de la carrera disponible para detener el tensado aproximadamente 20 milímetros antes de agotar la carrera del gato.

Si fuera posible tensar directamente el cable hasta su fuerza final sin terminar la carrera del gato, se dice que el tensado se realiza en una sola etapa; en caso contrario, se realizan varias etapas.

Cuando se alcanza la fuerza de tensado, se detiene la operación y se inicia con el clavado de cuñas. Para ello, se actúa con los mandos de la central hidráulica, activando el cilindro de clavado. El cilindro de clavado se desplaza arrastrando la placa de clavado, la cual a su vez empuja las cuñas de anclaje hasta empotrarlas en sus conos en la placa de anclaje. La presión de clavado debe alcanzar un valor máximo fijado previamente mediante una válvula reguladora instalada en la bomba hidráulica.

Luego de clavar las cuñas, se despresurizan las cámaras de clavado y tensado y se retornan simultáneamente los pistones de clavado y tensado, operando las válvulas de control de la bomba hidráulica. Cuando los pistones hayan retornado totalmente, se puede extraer el gato del anclaje recién tensado y llevarlo al siguiente anclaje por tensar.

Cuando se tensa un manojo de cables en varias etapas, debe prestarse especial atención a concatenar la última toma de datos de una etapa con la primera toma de datos de la siguiente.

Cuando un manajo ha sido tensado de un extremo, se realiza una tensión en el otro extremo. A esto se le conoce como retensado, y todos los manajos deben retensarse salvo indicación expresa en el proyecto.

Generalmente el retensado es más simple que el tensado, esto se debe a que los alargamientos del retensado suelen ser mucho menores que los del tensado, por ello no es necesario retensar escalonadamente.

Para iniciar el procedimiento, se introduce la fuerza de retensado en forma lenta y escalonada, pero sin medir los alargamientos del pistón.

Después de alcanzar la fuerza final de retensado, se procede el calvado de las cuñas. Tras el clavado, el gato se descarga y se retira del anclaje.

Las operaciones de tensado y retensado requieren ciertas activadas de control, por ejemplo, el responsable del equipo debe anotar la fecha, datos de identificación del manajo sobre el cual se va actuar, alargamiento teórico esperado, y datos a cada 100 bares de presión.

Es aconsejable verificar que los alargamientos obtenidos por cada incremento de 100 bares de presión, corresponden con los alargamientos teóricos. Si se diferenciaran en más de un 15 por ciento, se recomienda detener temporalmente el tensado e investigar la causa de dichas diferencias. La diferencia media entre alargamientos teóricos y reales para familias de cables similares, no debe exceder el 5 por ciento. Si estas dos condiciones se cumplen, se aceptan los alargamientos sin más comprobaciones. Si alguna no se cumple se estudia más detalladamente la situación. Normalmente se recalculan los alargamientos teóricos con parámetros más reales.

Si llegaran a romperse cables o alambres, debe tenerse el tensado e informar el ingeniero responsable. Por lo general si las roturas representan menos de un 2 por ciento de la sección del cable puede continuarse tensando hasta alcanzar la fuerza teórica del tensado; de lo contrario el Director de Obra debe determinar si se reemplazan el cable, siempre que la fuerza de tensado final sea debidamente reducida.

Las roturas y cualquier otra información relevante deben indicarse en el parte de tensado. Dicho parte deberá transmitirse al departamento técnico de la empresa constructora, el cual emitirá un informe oficial de tensado al Director de Obra. El Director de Obra decidirá sobre la aceptación definitiva de las operaciones de tensado realizadas.

Esta estrictamente prohibido cortar los cables de anclaje antes que se confirme la aprobación de tensado por parte del Director de Obra.

- Corte de cables, colocación de mangueras de inyección y fundición de cajuelas.

Esta operación debe realizarse únicamente tras recibir la confirmación de la Dirección de Obra.

Habiendo aprobado el tensado, se cortan los cables utilizando pulidora y sierra radial. Queda prohibida la operación de cortes con acetileno.

Los cables deben cortarse de modo que queden entre 3 centímetros y 4 centímetros de cable por encima de la cuñas. Luego de esto, se instalan las mangueras de poliducto de $\frac{3}{4}$ pulgada acoplándolos a los orificios especificados en las campanas.

Los tubos no deben doblarse y se dejan varillas en su interior, de manera análoga.

Posteriormente, se coloca la armadura de refuerzo necesario prevista para las cajuelas, junto con la formaleta de tapa.

Finalmente, se vierte el mortero de relleno en las cajuelas.

- Inyección de lechada de cemento

Este procedimiento da inicio cuando el mortero de sellado de las cajuelas ha alcanzado una resistencia mínima de 250 kilogramos sobre centímetro cuadrado.

Seguidamente, se introduce aire comprimido en una de las mangueras verificando que salga por cada una de las otras en el otro extremo, para comprobar que están libres de obstrucción.

Se conecta el interior del ducto con el exterior de la estructura utilizando poliducto de $\frac{3}{4}$ pulgada, el cual tendrá la longitud necesaria para permitir su cerrado mediante un dobléz tras observarse la salida de lechada. Debe haber libre circulación de la lechada desde la salida del poliducto hasta el extremo donde se encuentra el anclaje activo. Hay que asegurar que no existan pérdidas de lechada durante la inyección.

Si hay presencia de aceite soluble en el cable, éste debe lavarse con agua; para ello se introduce agua por una de las mangueras y se deja circular a través del ducto hasta que salga sin restos de aceite. Es conveniente realizar un

soplado para asegurar que no han quedado grandes bolsas de agua dentro del ducto después del lavado.

Habiendo completado los pasos anteriores, se realiza el procedimiento de inyección. Éste debe realizarse a partir de los puntos más bajos del trazado hasta los más altos. La llegada de la lechada a los puntos más altos se comprueba cuando ésta sale a través de los poliductos colocados. Normalmente la presión de inyección debe mantenerse por debajo de los 6 bares.

Antes de cerrar el poliducto debe permitirse el flujo de lechada durante cinco segundos para asegurar la completa extracción del aire en el interior de los ductos. El cierre se realiza doblando el tubo de inyección y asegurando el dobles con alambre de amarre.

Si se desean conocer las características de una lechada previamente a la ejecución de la obra se realizan los siguientes ensayos: ensayo de exudación, ensayo de variación de volumen, ensayo de fluidez y ensayo de resistencia.

El batido de la lechada se realiza en una máquina especial que bate e inyecta la mezcla. En uno de los dos tanques de la máquina se vierte el agua, el cemento y el aditivo, en ese orden. Luego las palas agitadoras del tanque baten la mezcla durante tres o cuatro minutos. Abriendo la compuerta situada en la parte inferior de la batidora, se vierte la mezcla en el tanque de inyección. Las palas del tanque de inyección mantienen la mezcla en continua agitación y el tamiz del tanque retiene cualquier grumo que pueda haberse formado.

Pueden introducirse hasta un máximo de dos sacos de cemento de 42,5 kilogramos para fabricar lechada.

El control de calidad de la lechada se basa en los siguientes puntos: control de los materiales y dosificación de empleados; control de la salida de lechada por todas las purgas; seguridad que todos los tendones han sido inyectados.

Los resultados del control de la inyección irán plasmados en un cuadro de control, el cual se remitirá a la Dirección de Obras.

2.7.3. Ventajas y desventajas

Para aplicar satisfactoriamente el concreto postensado en una construcción, la unidad ejecutora debe tomar en cuenta los puntos fuertes y los puntos débiles del material.

- Ventajas
 - Reduce el peralte, ya que aumenta la capacidad resistente del elemento y, además, reduce las deformaciones.
 - Conlleva a un uso más eficiente de los materiales, por lo que permite reducir el peso total de la estructura.
 - Disminuye la fisuración del concreto, aumentando su vida útil.
 - Acorta significativamente los plazos de ejecución de la obra gris gracias a rápidos y eficientes programas de construcción. El sistema de moldaje se puede retirar inmediatamente concluido el tensado.

- Se ahorra en concreto, acero, mano de obra y moldaje, ya que el sistema disminuye en forma considerable cada uno de estos aspectos.
- Permite unir en forma sencilla y eficiente losas, vigas, muros y columnas, lo cual elimina problemas de juntas entre dichos elementos.
- Es una buena solución estructural con bajos requerimientos de mantenimiento.
- El elemento adquiere mayor firmeza, durabilidad y resistencia al fuego.
- Aumenta el peralte efectivo de la viga.
- Se aprovecha mejor la alta resistencia a compresión del concreto.
- Permite abordar grandes luces con elementos más esbeltos.
- Comprime el concreto antes de su puesta en servicio.
- Permite una reducción de las secciones hasta en un 30 por ciento.
- Reduce el acero de refuerzo a cantidades mínimas.
- Aligera la estructura.
- Reduce el peso de la estructura.

- Disminuye los efectos de sismo.
- Desventajas
 - Requiere de una ejecución cuidadosa.
 - Es vital la calidad de ejecución.
 - Mayor tendencia a la corrosión del acero.
 - Requiere de concreto de alta resistencia de gran calidad.
 - Requiere de acero de alta resistencia.
 - Se necesita equipo complejo para tensar y dispositivos de anclaje.
 - Debe basarse en una planeación cuidadosa del proceso constructivo, sobre todo en etapas de montaje.
 - La construcción requiere supervisión perfecta en todas sus etapas.
 - Requiere de mayor control durante su fabricación y vida útil en obra.
 - Requiere mano de obra calificada.
 - Requiere la implementación de medidas de seguridad especiales.

- Significa una mayor dificultad de diseño, ya que debe considerar:
 - Esfuerzos de trabajo
 - Esfuerzos de transporte
 - Esfuerzos al transmitir la tensión del cable al hormigón, lo cual genera contraflecha.

3. PUENTE DE 22 METROS CON VIGAS REFORZADAS O POSTENSADAS

3.1. Subestructura

La subestructura está conformada por: estribos (apoyos extremos), pilares, (apoyos centrales), que soportan directamente la superestructura; y cimientos, que transmiten los esfuerzos al terreno.

3.1.1. Cimentación

Los cimientos o apoyos de estribos y pilas encargados de transmitir al terreno todos los esfuerzos. Están formados por las rocas, terreno o pilotes que soportan el peso de estribos y pilas.

3.1.2. Estribos

Son las estructuras que funcionan como los apoyos extremos del puente y que sirven para resistir los empujes de tierra, además de soportar la carga de la superestructura. Son esencialmente muros de contención.

3.1.3. Pilas

Son las columnas o apoyos intermedios de los puentes de dos o más tramos. Deben soportar la carga permanentemente y sobrecargas sin asientos, ser insensibles a la acción de los agentes naturales (viento y riadas).

3.1.4. Cortinas y aletones

Las cortinas sirven para retención de agua y almacenamientos, represa el agua hasta una elevación suficiente que permita derivar el gasto por la bocatoma y se diseña para que la corriente convierta sobre ella, ya sea parcial o totalmente su longitud.

Los aletones son elementos del estribo que contiene lateralmente el terraplén, evitando que sus taludes invadan el obstáculo inferior que el puente salva.

3.1.5. Vigas de apoyo

Son los elementos estructurales cuya función primordial, es proporcionar estabilidad a la viga y generalmente, se encuentran en los extremos de la viga principal o cerca de ellos.

3.2. Superestructura

La superestructura está conformada por: vigas, armaduras, cables, bóvedas, arcos, quienes transmiten las cargas del tablero a los apoyos; y el tablero que soporta directamente las cargas.

3.2.1. Apoyos

Se ubican entre la superestructura y la subestructura del puente con el objetivo de absorber los esfuerzos producidos por movimientos de dilatación-contracción, efecto de frenado y carga de viento, evitando que estos esfuerzos se transmitan a la estructura.

3.2.2. Vigas

Son los elementos de mayor relevancia portante en la superestructura de los puentes viga. Transmiten las cargas del tablero a los apoyos y funcionan a flexión, lo cual induce esfuerzos de tracción y compresión en el elemento.

3.2.2.1. Reforzadas

Son vigas de concreto reforzadas con varillas o mallas de acero de tal modo que ambos se complementan y actúan de manera conjunta para resistir esfuerzos combinados.

3.2.2.2. Postensadas

Son vigas de concreto que, una vez han endurecido, son sometidas a tensión mediante unos cables embutidos en sus vainas. Esto permite un comportamiento más eficiente de los materiales utilizados.

3.2.3. Diafragmas

Son vigas que se colocan transversalmente y que sirven como riostras en apoyos, extremos de vigas T y puntos intermedios. Su objetivo es mantener la geometría de la sección y resistir fuerzas laterales. La ubicación de los diafragmas obedece las disposiciones del AASHTO.

3.2.4. Losa del puente

Es un tablero o piso que soporta directamente las cargas dinámicas (tráfico) y por medio de las armaduras transmite sus tensiones a estribos y

pilas, que a su vez, las hacen llegar a los cimientos, donde se disipan en la roca o en el terreno circundante.

3.2.5. Aceras

La acera, también conocida como banqueta, es una franja longitudinal de la carretera, elevada o no, situada a los lados de la calzada del puente con el fin de transitar con seguridad a los peatones.

3.2.6. Remate de guardarruedas

El remate de guardarruedas o cordón, es una barrera baja que protege a los peatones conteniendo las ruedas de los vehículos. El cordón debería estar asociado con una amplia banqueta cuando no haya otra barrera que separe la calzada de la acera.

3.2.7. Postes y barandales

Se colocan a lo largo del borde de las estructuras del puente cuando éste tiene pasos peatonales, o en puentes peatonales, para proteger a los usuarios. También puede ser diseñadas para resistir el choque de vehículos, aunque en carreteras con velocidades iguales o superiores a 80 kilómetros por hora es preferible instalar barreras.

3.3. Cuantificación de materiales

El proceso de cuantificación de materiales consiste en calcular las cantidades de material necesario para llevar a cabo la obra, tomando en cuenta desperdicios y la posible reutilización de materiales. Es un procedimiento que

debe realizarse de forma consciente, ya que una mala estimación puede ocasionar un paro en la obra por falta de materiales o un costo innecesario por exceso de materia.

3.3.1. Materiales

Comprender las características de los materiales que componen las estructuras bajo análisis es fundamental para el diseño en forma segura, económica y funcional. A continuación se presenta una breve descripción de los materiales utilizados en puentes con vigas reforzadas y vigas postensadas.

3.3.1.1. Cemento

Es el material que posee las propiedades adhesivas y cohesivas para unir agregados inertes y formar una masa sólida de alta resistencia y durabilidad. Para la fabricación del concreto estructural se utiliza exclusivamente el cemento hidráulico, el cual debe hidratarse para que el polvo de cemento alcance el fraguado y endurezca. El más común de los cementos hidráulicos es el cemento Portland que es despachado, generalmente, en sacos de 42,5 kilogramos de peso.

3.3.1.2. Agregados

Estos ocupan aproximadamente entre el 70 y 75 por ciento del volumen de la masa endurecida de concreto estructural. Los agregados naturales se clasifican en finos y gruesos. Un agregado fino es todo el material que pasa el tamiz Número 4, es decir, un tamiz con cuatro aberturas por pulgada lineal. El resto se clasifica como agregado grueso, cuyo tamaño máximo se controla

según la facilidad con que este ingrese en los espacios de las varillas de refuerzo y las formaletas.

3.3.1.3. Dosificación y mezcla de concreto

La mezcla de concreto se dosifica bajo tres principios: obtener una resistencia adecuada, una buena trabajabilidad y bajo costo. La trabajabilidad y la resistencia están dadas por la relación agua-cemento; mientras más agua se le agrega a la mezcla, mayor será la trabajabilidad y disminuirá su resistencia, y vice-versa. Además, el menor costo se obtiene utilizando la mínima cantidad de cemento. Para tener una idea clara de las proporciones que deben utilizarse es necesario definir el peso de agua, arena y pedrín por saco de cemento. La dosificación y consistencia de una mezcla de concreto se determina con las especificaciones dispuestas en los códigos o reglamentos de construcción.

3.3.1.4. Control de calidad

La calidad del acero estructural debe ser garantizada por el proveedor, quien debe practicar controles sistemáticos de calidad especificados generalmente por las normas ASTM. La calidad de los componentes de la mezcla de concreto también está especificado en las normas ASTM, y también por los factores mencionados en la dosificación y mezclado del concreto. Es necesario un control continuo que asegure que los materiales suministrados coincidan con las especificaciones de diseño para garantizar la seguridad de la estructura.

3.3.1.5. Aditivos

Estos se utilizan para modificar el comportamiento del concreto, por ejemplo, para acelerar o retardar el fraguado, aumentar la trabajabilidad, aumentar la resistencia, disminuir la permeabilidad, mejorar la durabilidad. Los aditivos químicos deben cumplir con los requisitos de las normas ASTM.

3.3.1.6. Concreto de alta resistencia

Este término se refiere a concretos con resistencia a la compresión en un rango de 6 000 a 12 000 libras sobre pulgada cuadrada o más. Estos se fabrican utilizando los componentes clásicos cuidadosamente seleccionados, algunos aditivos y empleando un control de calidad muy cuidadoso durante la producción. En el caso de los puentes, ayuda a reducir las secciones transversales, lo cual disminuye la carga muerta y permite mayores luces. El requisito esencial del concreto de alta resistencia es una baja relación agua-cemento.

3.3.1.7. Acero de refuerzo para el concreto

El acero es el material más costoso, por lo que se intenta usar el mínimo posible que logre la mejor combinación con el concreto para resistir los esfuerzos de tensión y compresión. La resistencia útil de los aceros comunes, es decir, la resistencia a la fluencia es aproximadamente quince veces la resistencia a la compresión concreto estructural común y más de cien veces su resistencia a la tensión. En vigas de concreto reforzado el acero de refuerzo longitudinal colocado cerca de la cara a tensión resiste las fuerzas de tensión y el acero adicional resiste los esfuerzos de tensión inclinados causados por las fuerzas cortantes. La adherencia adecuada garantiza que el acero y el concreto

se deformen en forma conjunta, esta adherencia se produce por la fuerte adhesión química entre ambos materiales, la rugosidad natural de la superficie de las varillas laminada en caliente y por los resaltes superficiales de las mismas.

3.3.1.8. Acero para postensado

Se presentan en tres formas diferentes: alambrones de sección circular, torones y varillas de acero aleado. Los alambrones se entrelazan en grupos de hasta casi cincuenta alambrones individuales para producir los tendones del postensado con la resistencia requerida. Los torones se fabrican utilizando seis alambrones enrollados alrededor de un séptimo cuyo diámetro el ligeramente mayor. El acero aleado usualmente está disponible en forma de varillas lisas circulares. Los requisitos especiales para aceros de postensado se pueden encontrar en las normas ASTM.

3.3.2. Puente con vigas de concreto reforzado

A continuación se presentan las tablas que contienen los datos de cuantificación de obra gris para el puente con vigas de concreto reforzado, con una luz de 22 metros. La tabla VI, presenta la cantidad y tipo de acero y concreto necesario paracada elemento estructural de la subestructura del puente.

Tabla VI. Planilla de materiales – subestructura

Localización	Concreto (m ³)			Hierro (kg)	Tipo	Diam.	Long. (m)	Cant.	Peso (kg)
	3 000 psi	4 000 psi	5 000 psi						
Cortinas		17,14		2 320,01	C1	No. 5	6,60	4	40,97
					C2	No. 4	6,60	28	183,69
					C3	No. 4	6,60	44	288,66
					C4	No. 4	6,60	80	524,83
					C5	No. 6	6,60	4	59,00
					C6 a C7	No. 4	13,98	88	1 222,86
Viga de Apoyo		11,46		908,49	V1	No. 8	7,20	16	457,69
					V2	No. 6	7,20	8	128,74
					V3	No. 4	3,60	90	322,06
Columnas		30,00		5 901,87	K1	No. 8	8,80	36	1 258,65
					K2	No. 8	6,00	48	1 144,22
					K3	No. 6	8,80	24	472,03
					K4	No. 8	8,80	36	1 258,65
					K5	No. 4	2,40	204	486,66
					K6 a K40	No. 4	3,07	420	1 281,66
Aletones		16,18		1 489,30	A1	No. 5	2,70	4	16,76
					A2	No. 5	2,40	4	14,90
					A3	No. 4	2,70	136	365,00
					A4	No. 4	2,40	136	324,44
					A5	No. 6	2,70	4	24,14
					A6	No. 6	2,40	4	21,46
					A7	No. 4	13,98	52	722,60
Zapata		54,28		3 858,15	Z1	No. 6	4,94	176	1 943,20
					Z2	No. 6	7,14	120	1 914,95
TOTAL ACERO								14 477,82	

Fuente: elaboración propia.

La tabla VII presenta la cantidad y tipo de acero y concreto necesario para cada elemento estructural de la superestructura para el puente con vigas de concreto reforzado.

Tabla VII. Planilla de materiales – superestructura

Localización	Concreto (m ³)			Hierro (kg)	Tipo	Diam.	Long. (m)	Cant.	Peso (kg)
	3 000 psi	4 000 psi	5 000 psi						
Vigas (4 u)		52,38		21 783,54	V1	No. 4	22,40	48	1 068,75
					V2	No. 4	3,48	1096	3 791,20
					V3	No. 5	2,11	546	1 788,00
					V4	No. 5	1,68	546	1 423,62
					V5	No. 3	0,41	1092	250,72
					V6	No. 4	0,47	1084	506,42
					V7	No. 11	9,00	16	1 138,61
					V8	No. 11	12,00	8	759,07
					V9	No. 11	18,00	8	1 138,61
					V10	No. 11	22,40	56	9 918,54
Losa		18,09		2 342,56	L1	No. 4	22,40	27	601,17
					L2	No. 5	22,40	20	695,30
					L3	No. 4	6,80	150	1 013,88
					L4	No. 4	0,27	120	32,21
Aceras		4,09		432,39	A1	No. 4	22,50	6	134,19
					A2	No. 4	1,00	300	298,20
Diafragmas		2,70		409,26	D1	No. 6	6,50	9	130,75
					D2	No. 5	6,50	12	121,06
					D3	No. 4	1,60	99	157,45
Poste	0,49			158,19	P1	No. 5	1,06	44	72,39
					P2	No. 5	1,05	44	71,70
					P3	No. 2	0,58	12	1,73
					P4	No. 2	0,64	12	1,91
					P5	No. 2	0,72	22	3,94
					P6	No. 2	0,78	22	4,27
					P7	No. 2	0,21	20	1,05
					P8	No. 2	0,24	20	1,20
Barandal	2,02			403,03	B1	No. 2	0,82	450	91,88
					B2	No. 5	5,04	32	250,31
					B3	No. 5	2,45	16	60,84
Remate del Pasamanos	0,06			9,09	R1	No. 2	0,80	1	0,20
					R2	No. 2	0,86	1	0,21
					R3	No. 2	1,08	1	0,27
					R4	No. 2	1,24	1	0,31
					R5	No. 5	1,01	1	1,57
					R6	No. 5	1,54	1	2,39
					R7	No. 5	1,60	1	2,48
					R8	No. 5	1,07	1	1,66
Remate del Guardaruedas	0,37			17,02	G1	No. 4	0,95	3	2,83
					G2	No. 4	2,40	3	7,16
					G3	No. 4	1,63	3	4,86
					G4	No. 4	2,18	1	2,17
TOTAL ACERO								25 555,08	

Fuente: elaboración propia.

La tabla VIII presenta el resumen del tipo y cantidad de acero y concreto de la subestructura y superestructura del puente con vigas de concreto reforzado, contenidas en las tablas VI y VII.

Tabla VIII. **Resumen de materiales**

RESUMEN DE MATERIALES		
MATERIAL	Totales de Superestructura	Totales de Subestructura
Concreto 3 000 psi	2,94 m ³	0,00 m ³
Concreto 4 000 psi	77,26 m ³	129,06 m ³
Concreto 5 000 psi	0,00 m ³	0,00 m ³
Acero de Refuerzo	Totales	Totales
Barras No. 11	12 954,83 kg	0,00 kg
Barras No. 10	0,00 kg	0,00 kg
Barras No. 9	0,00 kg	0,00 kg
Barras No. 8	0,00 kg	4 119,21 kg
Barras No. 7	0,00 kg	0,00 kg
Barras No. 6	130,75 kg	4 563,52 kg
Barras No. 5	4 491,32 kg	72,63 kg
Barras No. 4	7 620,49 kg	5 722,46 kg
Barras No. 3	250,72 kg	0,00 kg
Barras No. 2	106,97 kg	0,00 kg
Subtotal	25 555,08 kg	14 477,82 kg
Total de Acero de Refuerzo		40 032,90 kg

Fuente: elaboración propia.

3.3.3. **Puente con vigas de concreto postensado**

La cuantificación de los materiales de obra gris para la subestructura del puente con vigas de concreto postensado de una luz de 22 metros es la misma que la del puente con vigas de concreto reforzado, la cual se encuentra en la tabla VI. La cuantificación de la superestructura se encuentra en la tabla IX.

Tabla IX. Planilla de materiales – superestructura

Localización	Concreto (m ³)			Hierro (kg)	Tipo	Diam.	Long. (m)	Cant.	Peso (kg)
	3 000 psi	4 000 psi	5 000 psi						
Vigas (4 u)			52,38	5 250,58	V1	No. 3	22,40	104	1 304,58
					V2	No. 3	3,40	484	921,54
					V3	No. 3	0,93	968	504,13
					V4	No. 5	2,11	242	792,48
					V5	No. 5	1,76	242	661,03
					V6	No. 3	0,78	968	422,82
					V7	No. 3	0,75	968	406,56
					V8	No. 3	6,00	24	80,64
					Parrilla A	No. 3	35,00	4	78,40
		Parrilla B	No. 3	35,00	4	78,40			
Losa		18,09		2 342,56	L1	No. 4	22,40	27	601,17
			L2		No. 5	22,40	20	695,30	
			L3		No. 4	6,80	150	1 013,88	
			L4		No. 4	0,27	120	32,21	
Aceras		4,09		432,39	A1	No. 4	22,50	6	134,19
			A2		No. 4	1,00	300	298,20	
Diafragmas		2,70		409,26	D1	No. 6	6,50	9	130,75
			D2		No. 5	6,50	12	121,06	
			D3		No. 4	1,60	99	157,45	
Poste	0,49			158,19	P1	No. 5	1,06	44	72,39
			P2		No. 5	1,05	44	71,70	
			P3		No. 2	0,58	12	1,73	
			P4		No. 2	0,64	12	1,91	
			P5		No. 2	0,72	22	3,94	
			P6		No. 2	0,78	22	4,27	
			P7		No. 2	0,21	20	1,05	
			P8		No. 2	0,24	20	1,20	
Barandal	2,02			403,03	B1	No. 2	0,82	450	91,88
			B2		No. 5	5,04	32	250,31	
			B3		No. 5	2,45	16	60,84	
Remate del Pasamanos	0,06			9,09	R1	No. 2	0,80	1	0,20
			R2		No. 2	0,86	1	0,21	
			R3		No. 2	1,08	1	0,27	
			R4		No. 2	1,24	1	0,31	
			R5		No. 5	1,01	1	1,57	
			R6		No. 5	1,54	1	2,39	
			R7		No. 5	1,60	1	2,48	
			R8		No. 5	1,07	1	1,66	
Remate del Guardaruedas	0,37			17,02	G1	No. 4	0,95	3	2,83
			G2		No. 4	2,40	3	7,16	
			G3		No. 4	1,63	3	4,86	
			G4		No. 4	2,18	1	2,17	
TOTAL ACERO								9 022,12	

Fuente: elaboración propia.

El resumen de materiales de la subestructura y superestructura del puente con vigas de concreto postensado, contenidas en las tablas VI y IX, se presenta en la tabla X.

Tabla X. **Resumen de materiales**

RESUMEN DE MATERIALES		
MATERIAL	Totales de Superestructura	Totales de Subestructura
Concreto 3 000 psi	2,94 m ³	0,00 m ³
Concreto 4 000 psi	24,88 m ³	129,06 m ³
Concreto 5 000 psi	52,38 m ³	0,00 m ³
Acero de Refuerzo	Totales	Totales
Barras No. 11	0,00 kg	0,00 kg
Barras No. 10	0,00 kg	0,00 kg
Barras No. 9	0,00 kg	0,00 kg
Barras No. 8	0,00 kg	4 119,21 kg
Barras No. 7	0,00 kg	0,00 kg
Barras No. 6	130,75 kg	4 563,52 kg
Barras No. 5	2 733,21 kg	72,63 kg
Barras No. 4	2 254,12 kg	5 722,46 kg
Barras No. 3	3 797,07 kg	0,00 kg
Barras No. 2	106,97 kg	0,00 kg
Subtotal	9 022,12 kg	14 477,82 kg
Total de Acero de Refuerzo		23 499,94 kg

Fuente: elaboración propia.

La tabla XI abarca la cuantificación del acero de preesfuerzo necesario para un puente con una luz de 22 metros, utilizando vigas de concreto postensado.

Tabla XI. **Planilla de materiales – acero de preesfuerzo**

Viga	Ductos	Cables por Ducto	Long. M	Long. Total	Long. Total	Peso por (kg/m)	Peso por Viga, kg
V1	3	7	0	23,60	495,6	1,108	549,00
V2	3	7	0	23,60	495,6	1,108	549,00
V3	3	7	0	23,60	495,6	1,108	549,00
V4	3	7	0	23,60	495,6	1,108	549,00
TOTAL ACERO POR VIGA							2 196,00

Fuente: elaboración propia.

3.4. Renglones de trabajo y precios unitarios

Los renglones de trabajo de un proyecto son una enumeración de las actividades que se llevarán a cabo para culminar la obra. Se debe tener cuidado de no dejar fuera ningún trabajo para evitar errores en el presupuesto y en la ejecución.

3.4.1. Mano de obra

Es uno de los aspectos más influyentes en el costo de una obra, especialmente si se debe utilizar personal con un nivel técnico específico. Para la construcción de vigas de concreto reforzado basta con que los obreros tengan noción del trabajo a desempeñar. Mientras que para la elaboración de vigas de concreto postensado si se requiere personal con cierto nivel de conocimiento del tema.

3.4.2. Transporte

Incluye el traslado de materiales hacia el lugar de la obra y la remoción del ripio y de más desechos. Pudiera ser, aunque no es muy usual, que también abarque llevar el personal al lugar de trabajo.

3.4.3. Formaleta

Debe construirse de tal manera que garantice la rigidez necesaria para soportar el concreto sin presentar asentamientos o deformaciones. También deben ser impermeables, y juntas herméticas que eviten fugas de agua. La madera utilizada en las formaletas tiene que cumplir con ciertas especificaciones, por ejemplo, un espesor uniforme, no menor de $\frac{3}{4}$ pulgada, ausencia de nudos, ranuras, u otros defectos.

3.4.4. Materiales

Se busca que los materiales cumplan con las especificaciones de diseño procurando el menor costo posible. Deben adquirirse de un proveedor de confianza que certifique la calidad de los mismos.

3.4.5. Equipo

Abarca las herramientas y maquinaria requeridas para la construcción de las obras permanentes y temporales. Si se emplea equipo propio el costo del mismo se determina según su depreciación a criterio del planificador.

3.4.6. Excavación

Es la remoción del volumen de tierra necesario para introducir los cimientos de la estructura, el apuntalamiento, tablestacado, y encofrado necesario, así como el drenaje, bombeo, etc. Puede incluir también el chapeo y destronque, si este fuese necesario y no estuviera indicado por separado.

3.4.7. Relleno

Es la colocación de los volúmenes de tierra necesarios para llenar las remociones realizadas en el excavado después de la colocación de los elementos pertinentes.

3.4.8. Armadura

Es el acero estructural dispuesto en la forma, tamaño y ensamblaje determinado en la etapa de diseño. En otras palabras es la unión del acero longitudinal y el acero transversal.

3.4.9. Concreto

Comprende la dosificación, mezcla, transporte, vaciado y curado del material. Las características del material y las condiciones de trabajo pueden variar según el elemento estructural que se va fundir.

3.4.10. Integración de renglones de trabajo para puente con vigas reforzadas

Las siguientes tablas engloban la integración de costos de cada renglón necesario para ejecutar la obra. Se utilizaron los precios actualizados por la Cámara Guatemalteca de la Construcción (CGC). La tabla XII abarca los costos del equipo, mano de obra y material para la excavación estructural de la cimentación del puente con vigas reforzadas.

Tabla XII. **Excavación estructural para cimentación**

Rendimiento: 400,00 m³

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Excavadora de oruga	40	Q 450,00	Q 36 000,00
1	Camión de volteo	40	Q 300,00	Q 12 000,00
			Total	Q 48 000,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Cuadrilla para excavación	60	Q 152,00	Q 18 240,00
			Total	Q 18 240,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 912,00

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
				Q -
			Total	Q -

Total Costo Directo:	Q 19 152,00
Costos Indirectos (25%):	Q 4 788,00
Equipo:	Q 48 000,00
Total Parcial:	Q 71 940,00
IVA (12%):	Q 8 632,80
TOTAL:	Q 80 572,80

TOTAL POR: m³ **Q 201,43**

Fuente: elaboración propia.

La tabla XIII incluye los costos del equipo, mano de obra y material utilizado en el relleno estructural de la cimentación del puente con vigas reforzadas.

Tabla XIII. **Relleno estructural para cimentación**

Rendimiento: 350,00 m³

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Camión de volteo	32	Q 300,00	Q 9 600,00
2	Compactador de plancha vibratoria	32	Q 500,00	Q 32 000,00
			Total	Q 41 600,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Cuadrilla para relleno	48	Q 152,00	Q 14 592,00
			Total	Q 14 592,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 729,60

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
350,00	Material para relleno	m ³	Q 30,00	Q 10 500,00
			Total	Q 10 500,00

Total Costo Directo:	Q 25 821,60
Costos Indirectos (25%):	Q 6 455,40
Equipo:	Q 41 600,00
Total Parcial:	Q 73 877,00
IVA (12%):	Q 8 865,24
TOTAL:	Q 82 742,24

TOTAL POR: m³ **Q 236,41**

Fuente: elaboración propia.

La tabla XIV contiene los costos del equipo, mano de obra y material utilizado para fundir los elementos estructurales empleando concreto de 3 000 libras sobre pulgada cuadrada para el puente con vigas reforzadas.

Tabla XIV. **Concreto 3 000 psi**

Rendimiento: 2,94 m³

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Concreteiras	12	Q 60,00	Q 720,00
			Total	Q 720,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Grupos de trabajo para fundición de Concreto	12	Q 152,00	Q 1 824,00
			Total	Q 1 824,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 91,20

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
2,94	Concreto 3000 psi	m ³	Q 1 350,00	Q 3 969,00
250,00	Madera para formaleta	pie tabla	Q 6,00	Q 1 500,00
			Total	Q 5 469,00

Total Costo Directo:	Q 7 384,20
Costos Indirectos (25%):	Q 1 846,05
Equipo:	Q 720,00
Total Parcial:	Q 9 950,25
IVA (12%):	Q 1 194,03
TOTAL:	Q 11 144,28

TOTAL POR: m³ **Q 3 790,57**

Fuente: elaboración propia.

La tabla XV abarca los costos de equipo, mano de obra y material utilizado en la elaboración de la armadura de acero estructural de los elementos del puente con vigas de concreto reforzado.

Tabla XV. **Acero estructural**

Rendimiento: 500,00 kg

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Equipo de soldadura	64	Q 150,00	Q 19 200,00
1	Equipo de Oxi-Acetileno	64	Q 225,00	Q 14 400,00
1	Cortadora de metal	64	Q 10,00	Q 640,00
1	Generador	64	Q 20,00	Q 1 280,00
			Total	Q 35 520,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Grupo de soldadores	64	Q 100,00	Q 12 800,00
			Total	Q 12 800,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 640,00

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
500,00	Acero Estructural	kg	Q 18,00	Q 9 000,00
60	Electrodo	lb	Q 23,00	Q 1 380,00
			Total	Q 10 380,00

Total Costo Directo:	Q 23 820,00
Costos Indirectos (25%):	Q 5 955,00
Equipo:	Q 35 520,00
Total Parcial:	Q 65 295,00
IVA (12%):	Q 7 835,40
TOTAL:	Q 73 130,40

TOTAL POR: kg **Q 146,26**

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVI incluye los costos del equipo, mano de obra y material utilizado para colocar el neopreno en los apoyos del puente con vigas reforzadas.

Tabla XVI. Neopreno para apoyos

Rendimiento: 42,50 dm³

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Cortadora con disco de diamante	16	Q 75,00	Q 1 200,00
			Total	Q 1 200,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Personas para preparación de neoprenos e instalación	24	Q 42,00	Q 2 016,00
			Total	Q 2 016,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 100,80

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
42,50	Neopreno Grado 60	dm ³	Q 866,37	Q 36 820,55
1	Epóxico	unidad	Q 169,00	Q 169,00
6	Laminas de acero	unidad	Q 86,00	Q 516,00
			Total	Q 37 505,55

Total Costo Directo:	Q 39 622,35
Costos Indirectos (25%):	Q 9 905,59
Equipo:	Q 1 200,00
Total Parcial:	Q 50 727,94
IVA (12%):	Q 6 087,35
TOTAL:	Q 56 815,29
TOTAL POR:	Q 1 336,83

dm³

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVII contiene los costos del equipo, mano de obra y material utilizado para colocar tubería de Hierro Galvanizado (HG) para el drenaje del puente con vigas reforzadas.

Tabla XVII. **Tubo de HG para drenaje**

Rendimiento: 16,00 ml

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Cortadora con disco de diamante	16	Q 60,00	Q 960,00
1	Generador	16	Q 15,00	Q 240,00
			Total	Q 1 200,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
4	Personal de instalación y corte de tubo	16	Q 30,00	Q 1 920,00
			Total	Q 1 920,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 96,00

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
3	Tubos HG de 4"	unidad	Q 1 500,00	Q 4 500,00
35,00	Alambre de amarre	lb	Q 8,00	Q 280,00
			Total	Q 4 780,00

Total Costo Directo:	Q 6 796,00
Costos Indirectos (25%):	Q 1 699,00
Equipo:	Q 1 200,00
Total Parcial:	Q 9 695,00
IVA (12%):	Q 1 163,40
TOTAL:	Q 10 858,40

TOTAL POR: ml **Q 678,65**

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVIII abarca los costos del equipo, mano de obra y material utilizado para fundir los elementos estructurales empleando concreto de 4 000 libras sobre pulgada cuadrada para el puente con vigas reforzadas.

Tabla XVIII. **Concreto 4 000 psi**

Rendimiento: 206,34 m³

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Concreteeras	400	Q 60,00	Q 48 000,00
2	Vibrador	400	Q 30,00	Q 24 000,00
Total				Q 72 000,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Grupos de trabajo para fundición de Concreto	400	Q 152,00	Q 121 600,00
28	Servicio de laboratorio y control de calidad	320	Q 2,25	Q 20 160,00
Total				Q 141 760,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 7 088,00

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
206,34	Concreto 4000 psi	m ³	Q 1 350,00	Q 278 559,00
8 000,00	Madera para formaleta	pie tabla	Q 6,00	Q 48 000,00
5,00	Aditivos para concreto, reductor de agua	Cubetas	Q 1 800,00	Q 9 000,00
3,00	Aditivo para concreto, curador	Cubetas	Q 1 200,00	Q 3 600,00
1	Obra falsa para soporte de vigas	Global	Q 31 000,00	Q 31 000,00
4	Bases de soporte de obra falsa	Unidad	Q 6 500,00	Q 26 000,00
1,00	Alambre galvanizado	Rollo	Q 450,00	Q 450,00
Total				Q 396 609,00

Total Costo Directo:	Q 545 457,00
Costos Indirectos (25%):	Q 136 364,25
Equipo:	Q 72 000,00
Total Parcial:	Q 753 821,25
IVA (12%):	Q 90 458,55
TOTAL:	Q 844 279,80

TOTAL POR: m³ Q 4 091,69

Fuente: elaboración propia.

La tabla XIX incluye los costos de equipo, mano de obra y material utilizado en la elaboración de la armadura de acero de refuerzo de los elementos estructurales del puente con vigas de concreto reforzado.

Tabla XIX. **Acero de refuerzo**

Rendimiento: 40 320,90 kg

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Generador	900	Q 15,20	Q 13 680,00
1	Sierra cortadora para metal	900	Q 10,80	Q 9 720,00
6	Extensiones	900	Q 0,50	Q 2 700,00
			Total	Q 26 100,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Grupo de armadores	900	Q 115,00	Q 207 000,00
			Total	Q 207 000,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 10 350,00

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
40 320,90	Acero corrugado	kg	Q 17,00	Q 685 455,30
10,00	Alambre de amarre	qq	Q 450,00	Q 4 500,00
			Total	Q 689 955,30

Total Costo Directo:	Q 907 305,30
Costos Indirectos (25%):	Q 226 826,33
Equipo:	Q 26 100,00
Total Parcial:	Q 1 160 231,63
IVA (12%):	Q 139 227,80
TOTAL:	Q 1 299 459,43

TOTAL POR: kg **Q 32,23**

Fuente: elaboración propia.

La tabla XX presenta el cuadro general de renglones de trabajo con sus respectivos códigos de localización en el documento Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, y sus precios unitarios, para un puente con vigas de concreto reforzado.

Tabla XX. Planilla de cantidades y costos unitarios

Item No.	Item	Unidad	Cantidades Estimadas	Precio Unitario	Costo Total
205.05(b)(1)	Excavación estructural para cimentación de estructuras (puentes)	m ³	400,00	Q 201,43	Q 80 572,00
205.11(b)	Relleno estructural para cimentación de estructuras (puentes)	m ³	350,00	Q 236,41	Q 82 743,50
553.03(a) 21	Concreto 3000 psi	m ³	2,94	Q 3 790,57	Q 11 144,28
553.03(a) 28	Concreto 4000 psi	m ³	206,34	Q 4 091,69	Q 844 279,31
552,01	Acero de refuerzo	kg	40 320,90	Q 32,23	Q 1 299 542,61
552.03(f)50	Acero estructural	kg	500,00	Q 146,26	Q 73 130,00
561.03 (c)	Neopreno	dm ³	42,50	Q 1 336,83	Q 56 815,28
602.03(c) 4"	Tubo galvanizado de 4"	ml	16,00	Q 678,65	Q 10 858,40
s/n	Relleno en aproches	m ³	300,00	Q 280,00	Q 84 000,00
s/n	Neopreno para junta de expansión	ml	12,00	Q 2 750,00	Q 33 000,00
GRAN TOTAL					Q 2 576 085,37

Fuente: elaboración propia.

3.4.11. Integración de renglones de trabajo para puente con vigas postensadas

La integración de costos para los renglones: excavación, relleno, concreto 3 000 libras sobre pulgada cuadrada, neopreno para apoyos, acero estructural y tubo de Hierro Galvanizado (HG) para drenaje, del puente con vigas de concreto postensado es la misma que la del puente con vigas de concreto reforzado la cual se encuentra en la sección 3.3.2.1.

Las siguientes tablas engloban la integración de costos de los renglones: concreto 4 000 y 5 000 libras sobre pulgada cuadrada, acero de refuerzo y

acero de preesfuerzo. Se utilizaron los precios actualizados por la Cámara Guatemalteca de la Construcción (CGC).

La tabla XXI abarca los costos del equipo, mano de obra y material utilizado para fundir los elementos estructurales empleando concreto de 4 000 libras sobre pulgada cuadrada para el puente con vigas postensadas.

Tabla XXI. **Concreto 4 000 psi**

Rendimiento: 153,94 m³

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Concreteiras	320	Q 60,00	Q 38 400,00
2	Vibrador	320	Q 30,00	Q 19 200,00
			Total	Q 57 600,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
2	Grupos de trabajo para fundición de Concreto	320	Q 152,00	Q 97 280,00
28	Servicio de laboratorio y control de calidad	320	Q 2,25	Q 20 160,00
			Total	Q 117 440,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 5 872,00

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
153,94	Concreto 4000 psi	m ³	Q 1 350,00	Q 207 819,00
7 300,00	Madera para formaleta	pie tabla	Q 6,00	Q 43 800,00
3,00	Aditivos para concreto, reductor de agua	Cubetas	Q 1 800,00	Q 5 400,00
2,00	Aditivo para concreto, curador	Cubetas	Q 1 200,00	Q 2 400,00
1,00	Alambre galvanizado	Rollo	Q 450,00	Q 450,00
			Total	Q 259 869,00

Total Costo Directo:	Q 383 181,00
Costos Indirectos (25%):	Q 95 795,25
Equipo:	Q 57 600,00
Total Parcial:	Q 536 576,25
IVA (12%):	Q 64 389,15
TOTAL:	Q 600 965,40

TOTAL POR: m³ **Q 3 903,89**

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXII incluye los costos del equipo, mano de obra y material utilizado para fundir los elementos estructurales empleando concreto de 5 000 libras sobre pulgada cuadrada para el puente con vigas de concreto postensados.

Tabla XXII. **Concreto 5 000 psi**

Rendimiento: 52,38 m³

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Concreteeras	80	Q 60,00	Q 4 800,00
2	Vibrador	80	Q 30,00	Q 4 800,00
			Total	Q 9 600,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Grupos de trabajo para fundición de Concreto	240	Q 152,00	Q 36 480,00
10	Servicio de laboratorio y control de calidad	200	Q 2,25	Q 4 500,00
			Total	Q 40 980,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 2 049,00

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
52,38	Concreto 5000 psi	m ³	Q 1 350,00	Q 70 713,00
880,00	Madera para formaleta	pie tabla	Q 6,00	Q 5 280,00
2,00	Aditivos para concreto, reductor de agua	Cubetas	Q 1 800,00	Q 3 600,00
4	Bases para soporte de obra falsa	Unidad	Q 6 500,00	Q 26 000,00
1,00	Aditivo para concreto, curador	Cubetas	Q 850,00	Q 850,00
1	Obra falsa para soporte de vigas	Global	Q 31 000,00	Q 31 000,00
			Total	Q 137 443,00

Total Costo Directo:	Q 180 472,00
Costos Indirectos (25%):	Q 45 118,00
Equipo:	Q 9 600,00
Total Parcial:	Q 235 190,00
IVA (12%):	Q 28 222,80
TOTAL:	Q 263 412,80

TOTAL POR: m³ Q 5 028,88

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXIII contiene los costos de equipo, mano de obra y material utilizado en la elaboración de la armadura de acero de refuerzo de los elementos estructurales del puente con vigas de concreto postensado.

Tabla XXIII. **Acero de refuerzo**

Rendimiento: 23 499,94 kg

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Generador	900	Q 15,20	Q 13 680,00
1	Sierra cortadora para metal	900	Q 10,80	Q 9 720,00
6	Extensiones	900	Q 0,50	Q 2 700,00
			Total	Q 26 100,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Grupo de armadores	900	Q 115,00	Q 103 500,00
			Total	Q 103 500,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 5 175,00

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
23 499,94	Acero corrugado	kg	Q 17,00	Q 399 498,98
10,00	Alambre de amarre	qq	Q 450,00	Q 4 500,00
			Total	Q 403 998,98

Total Costo Directo:	Q 512 673,98
Costos Indirectos (25%):	Q 128 168,50
Equipo:	Q 26 100,00
Total Parcial:	Q 666 942,48
IVA (12%):	Q 80 033,10
TOTAL:	Q 746 975,58

TOTAL POR: kg **Q 31,79**

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXIV abarca los costos de equipo, mano de obra y material utilizado en la colocación de acero de preesfuerzo para las vigas de concreto postensado de un puente con una luz de 22 metros.

Tabla XXIV. Acero de preesfuerzo

Rendimiento: 2 196,00 kg

EQUIPO

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Generador Trifásico	40	Q 25,00	Q 1 000,00
1	Central Hidráulica	40	Q 250,00	Q 10 000,00
1	Gato Multitorón	40	Q 360,00	Q 14 400,00
			Total	Q 25 400,00

MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hora	Sub-total
1	Personal para instalación de ductos y cables	20	Q 1 500,00	Q 30 000,00
1	Servicio de postensado con gatos hidráulicos	40	Q 2 500,00	Q 100 000,00
			Total	Q 130 000,00

HERRAMIENTAS (5% Mano de Obra)

Q 6 500,00

MATERIALES

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Sub-total
2 196,00	Acero de Presfuerzo	kg	Q 18,00	Q 39 528,00
16	Anclajes de postensado	unidad	Q 1 200,00	Q 19 200,00
280,00	Inyección con lechada de cemento	ml	Q 100,60	Q 28 168,00
10,00	Aditivo para mortero de inyección	bolsa	Q 600,00	Q 6 000,00
			Total	Q 92 896,00

Total Costo Directo:	Q 229 396,00
Costos Indirectos (25%):	Q 57 349,00
Equipo:	Q 25 400,00
Total Parcial:	Q 312 145,00
IVA (12%):	Q 37 457,40
TOTAL:	Q 349 602,40

TOTAL POR: kg **Q 159,20**

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXV presenta el cuadro general de renglones de trabajo con sus respectivos códigos de localización en el documento Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, y sus precios unitarios, para un puente con vigas de concreto postensado.

Tabla XXV. Planilla de cantidades y costos unitarios

Item No.	Item	Unidad	Cantidades Estimadas	Precio Unitario	Costo Total
205.05(b)(1)	Excavación estructural para cimentación de estructuras (puentes)	m ³	400,00	Q 201,43	Q 80 572,00
205.11(b)	Relleno estructural para cimentación de estructuras (puentes)	m ³	350,00	Q 236,41	Q 82 743,50
553.03(a) 21	Concreto 3000 psi	m ³	2,94	Q 3 790,57	Q 11 144,28
553.03(a) 28	Concreto 4000 psi	m ³	153,94	Q 3 903,89	Q 600 964,83
553.03(a) 35	Concreto 5000 psi	m ³	52,38	Q 5 028,88	Q 263 412,73
552.01	Acero de refuerzo	kg	23 499,94	Q 31,79	Q 747 063,09
554.04(a)	Acero de presfuerzo	kg	2 196,00	Q 159,20	Q 349 603,20
552.03(f)50	Acero estructural	kg	500,00	Q 146,26	Q 73 130,00
561.03 (c)	Neopreno	dm ³	42,50	Q 1 336,83	Q 56 815,28
602.03(c) 4"	Tubo galvanizado de 4"	ml	16,00	Q 678,65	Q 10 858,40
s/n	Relleno en aproches	m ³	300,00	Q 280,00	Q 84 000,00
s/n	Neopreno para junta de expansión	ml	12,00	Q 2 750,00	Q 33 000,00
GRAN TOTAL					Q 2 393 307,30

Fuente: elaboración propia.

4. COMPARACIÓN ENTRE PUENTES

Luego de haber recabado información de los sistemas constructivos bajo estudio y haber realizado la integración de costos para ambos modelos de puentes, se realizó el análisis de los resultados obtenidos. Este análisis es aplicable únicamente a puentes con luces de veinte metros o aproximadas a esta longitud.

4.1. Comparación de sistemas constructivos

Después de analizar los aspectos de cada uno de los sistemas constructivos, se puede inferir lo siguiente:

Ambas metodologías de construcción tienen varios puntos en común, por ejemplo, comparten dos formas distintas de realización, que son vigas prefabricadas en campamento y vigas *in situ*, sobre obra falsa; también comparten los mismos estudios previos; y emplean los mismos pasos constructivos hasta el momento de tensado en el caso de vigas de concreto postensado.

El tensado es un proceso complejo que requiere una cantidad considerable de días, personal y equipo especializado, el cual no se necesita en vigas de concreto reforzados.

En cuanto a las características de comportamiento de las vigas bajo solicitaciones de carga, las cuales han sido comprobadas experimentalmente y se utilizan como criterios de diseño, las vigas de concreto postensado están

diseñadas para evitar el agrietamiento, el cual no hay manera de evitar en forma satisfactoria en vigas de concreto reforzado.

4.2. Comparación de costos

Tras la realización de la integración de costos, se puede inferir lo siguiente:

En lo que se refiere al costo total de materiales de construcción, este es más elevado al emplear vigas de concreto reforzado; se debe principalmente a que requiere mayor cantidad de acero de refuerzo, el cual es el material de construcción más costoso entre los que deben emplearse en este tipo de obras.

El costo de equipo y mano de obra es mayor al emplear vigas de concreto postensado, debido a que el proceso de tensado requiere alquiler de equipo especial y contratación de mano de obra especializada.

El costo total de la obra es inferior al emplear vigas de concreto postensado. Se debe a que el costo de material es superior cuando se emplean vigas de concreto reforzado. El costo de mano de obra y equipo es mayor cuando se utilizan vigas de concreto postensado, pero esta diferencia de costos no es mayor que la del material.

La tabla XXVI contiene los costos de material, mano de obra y equipo con el objetivo de servir como un método de comparación de costos para ambos métodos constructivos.

Tabla XXVI. **Cuadro comparativo de costos**

Puente Renglón	Vigas de concreto postensado	Vigas de concreto reforzado
Mano de obra	Q 443 312,00	Q 400 152,00
Materiales	Q 962 841,53	Q 1 155 198,85
Equipo	Q 246 940,00	Q 226 340,00
Total	Q 2 393 307,30	Q 2 576 085,37

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La metodología de construcción de vigas de concreto postensado es más compleja y conlleva más tiempo que la metodología de vigas de concreto reforzado, debido a que se trata de un proceso constructivo cuyo propósito es el de mejorar las características mecánicas de resistencia del concreto reforzado simple.
2. Las vigas de concreto postensado están destinadas a presentar un mejor comportamiento bajo solicitaciones de carga que las vigas de concreto reforzado, ya que su objetivo es reducir la fisuración del concreto sin aditivos o características especiales de fábrica que aumenten su resistencia.
3. La metodología más conveniente, en cuanto a simplicidad, es la que se utiliza al construir vigas de concreto reforzado, ya que no requiere de equipo y personal especializado, que sí es necesario para llevar a cabo el proceso de postensado.
4. Emplear vigas de concreto reforzado supone un costo más elevado en comparación con la utilización de vigas de concreto postensado, puesto que el primer método necesita una mayor cantidad de acero, el cual es uno de los materiales de más alto valor monetario en el mercado de la construcción, para poder suplir las características de resistencia requeridas en este tipo de estructuras.

5. En un puente con una luz de 22 metros, es menor el costo al emplear vigas de concreto postensado en comparación con las vigas de concreto reforzado.

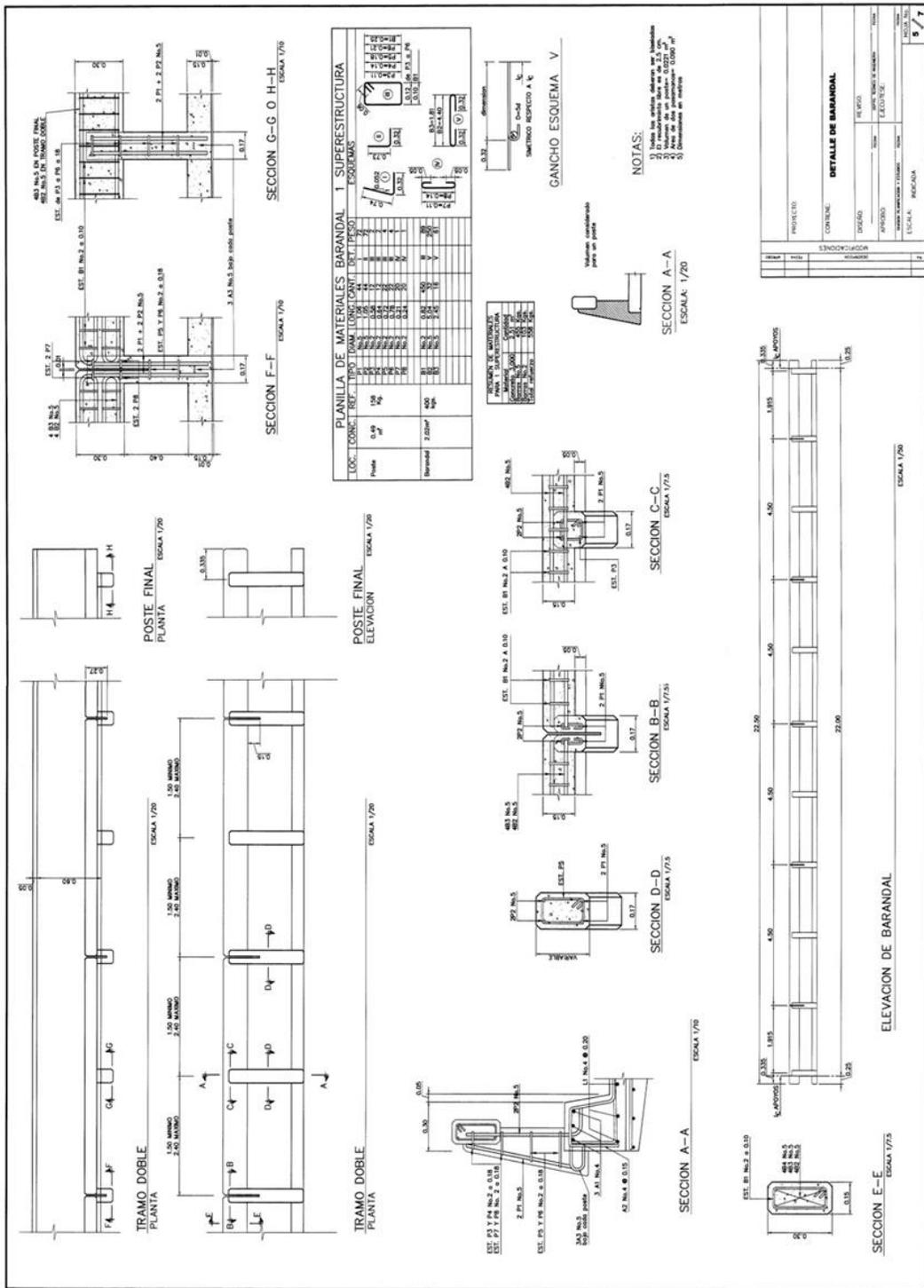
RECOMENDACIONES

1. Llevar a cabo más comparaciones entre costos y métodos constructivos, utilizando otros materiales y/o sistemas disponibles en el medio, con el fin de contribuir a la implementación de técnicas más eficientes e innovadoras en el diseño y construcción de obras civiles.
2. Comparar las ventajas al emplear estos y otros sistemas de construcción de acuerdo a la luz del puente debido a que los resultados se alteran al cambiar esta característica.
3. Adaptar la integración de costos al medio y las condiciones de trabajo, ya que son aspectos que varían considerablemente por causa de la diversidad cultural y social de las distintas regiones del país.

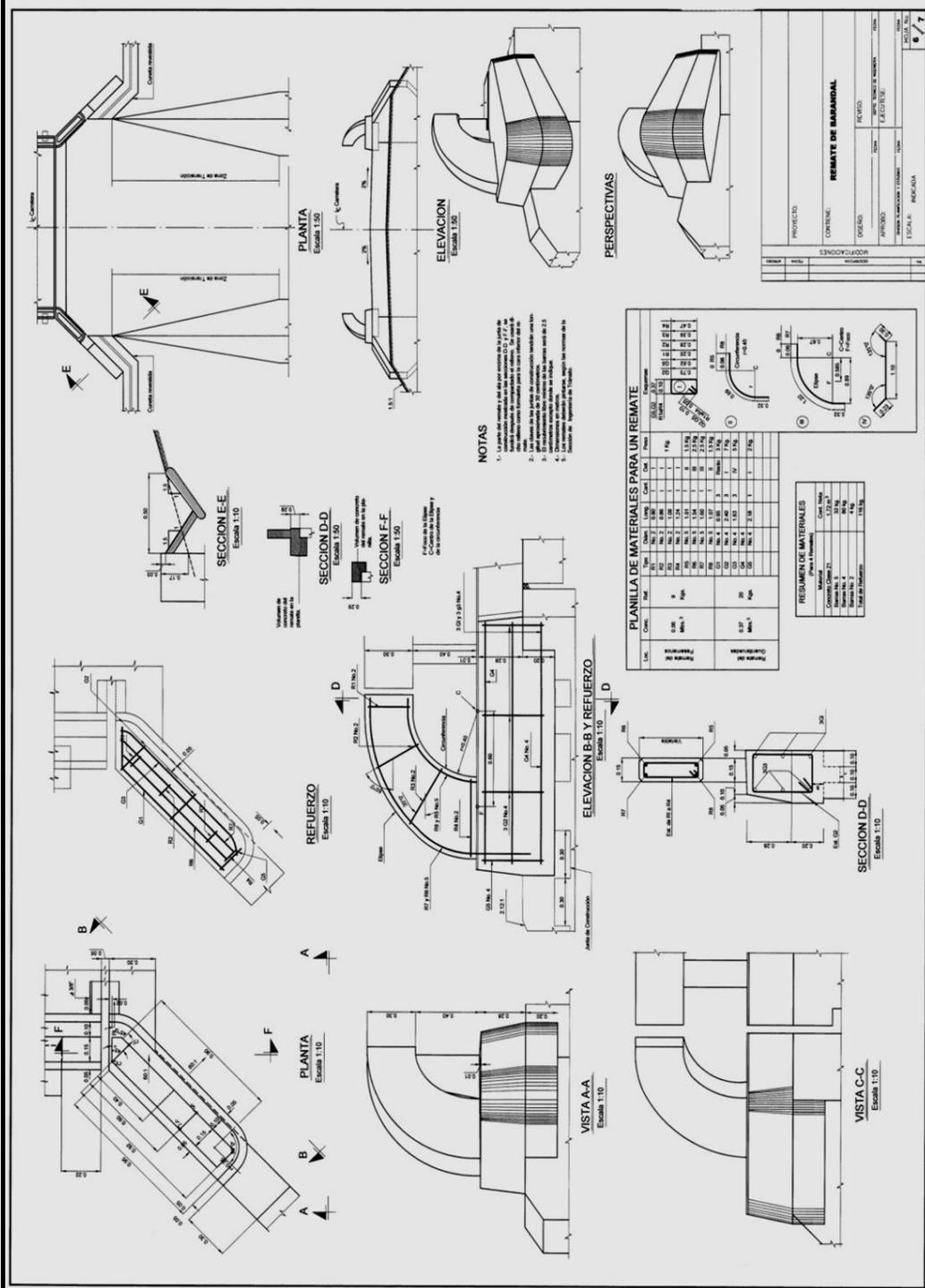
BIBLIOGRAFÍA

1. CIFUENTES GONZALES, Roger Arturo. *Análisis comparativo entre el uso de vigas de puentes de concreto reforzado y preesforzado en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos. Guatemala. Facultad de Ingeniería. 1979. 41 p.
2. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. 2a ed. Guatemala: MICIV, 2002. 690 p.
3. HARMSEN, Teodoro E. *Diseño de estructuras de concreto armado*. 4a ed. Perú: Pontificia Universidad Católica de Perú. 2005. 681 p.
4. HERNÁNDEZ FIGUEROA, Oscar Miguel. *Análisis comparativo de los costos de construcción de diferentes tipos de puentes cortos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos. Facultad de Ingeniería. 1989. 169 p.
5. HERRERA M., Jerónimo H. *Puentes*. 2a ed. Santafé de Bogotá, D.C. Colombia: Universidad Católica de Colombia. 1996. 147 p.
6. NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto*. 12a ed. Santa Fé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana. 1999. 722 p.

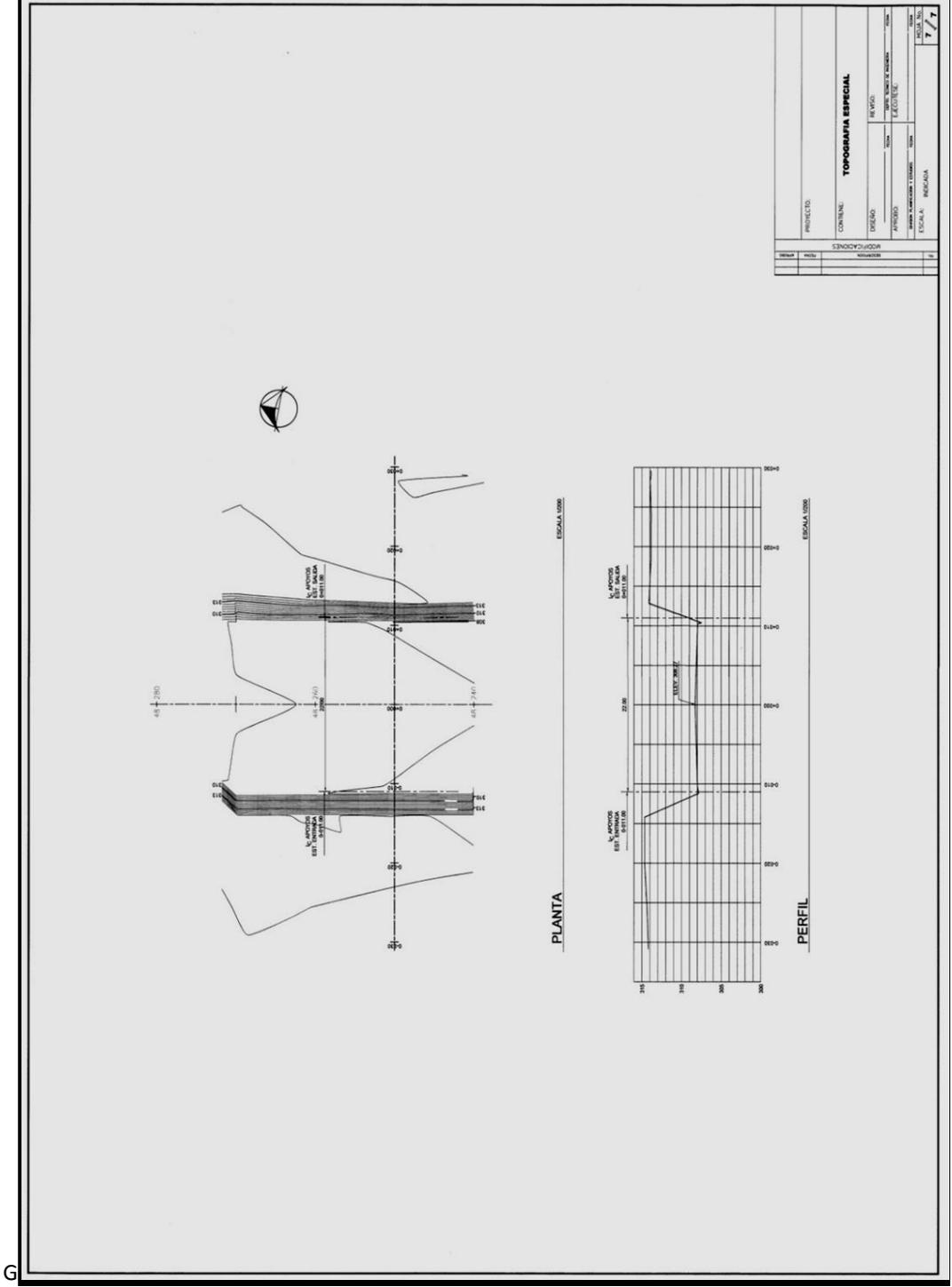
ANEXOS



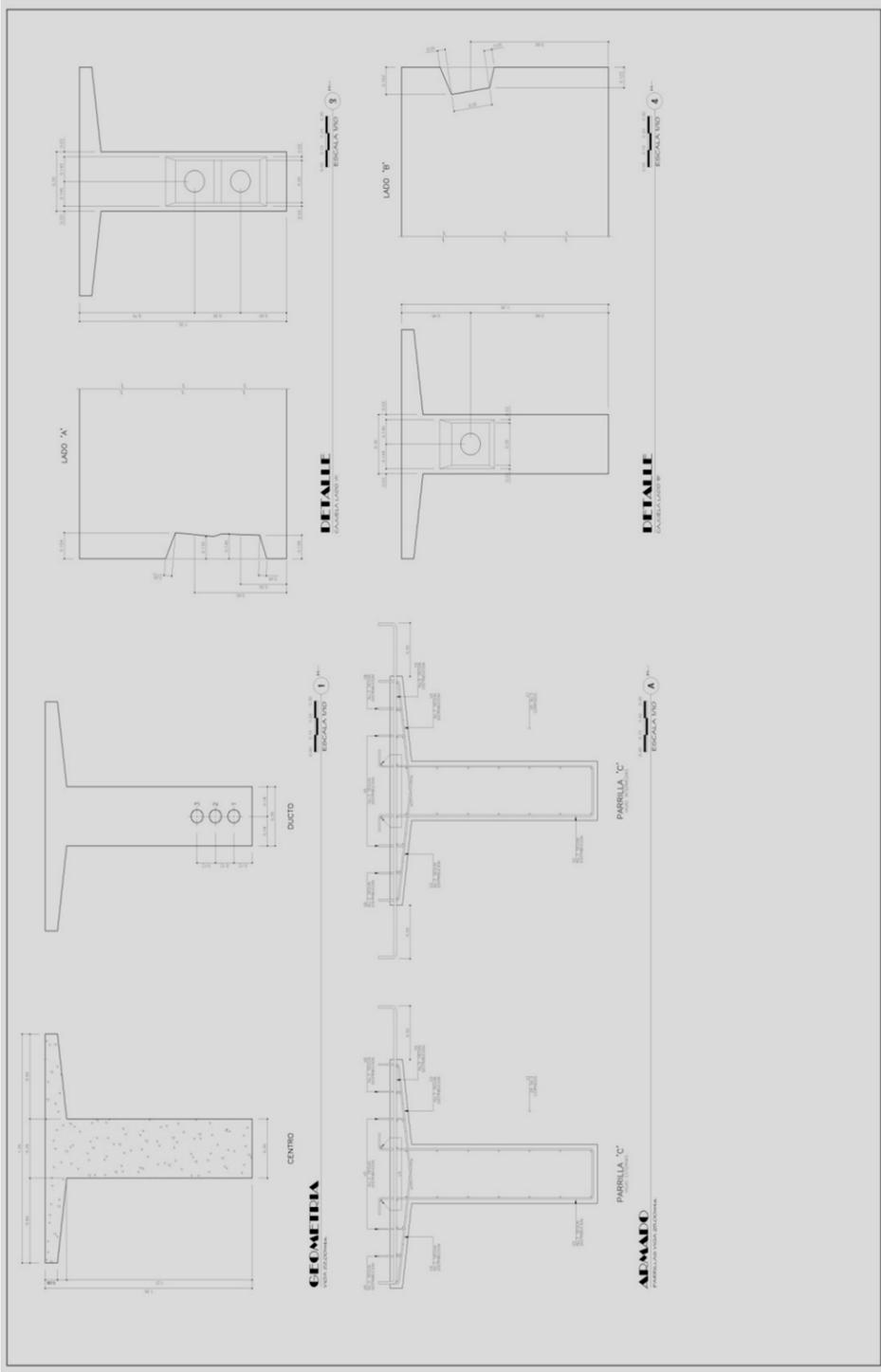
Fuente: Grupo Muratori S.A.



Fuente: Grupo Muratori S.A.



Fuente: Grupo Muratori S.A.



Fuente: Grupo Muratori S.A.