

Universidad de Matanzas

Facultad de Ciencias Técnicas



**CONCEPTUALIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LA SUPERESTRUCTURA DE UN
PUENTE CURVO CON SECCIÓN CAJÓN PREFABRICADO.**

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: Raydel Domínguez Montenegro

Tutor(es): Ing. Beatriz Martínez Pedraza

Lic. Ing. Pedro Hernández Delgado

Matanzas, 2018

PENSAMIENTO

“POR MUY LARGO QUE SEA EL CAMINO, LO MÁS IMPORTANTE ES EL PRIMER PASO”

VINICIUS DE MORAES

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente, declaro que yo Raydel Domínguez Montenegro soy el único autor de este Trabajo de Diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

DEDICATORIA.

A mis padres por ser faro y guía en todos estos años de arduo esfuerzo para conseguir este triunfo, porque nunca dejaron de creer en mí, por hacer este sueño realidad.

AGRADECIMIENTOS.

A mis tutores Ing. Beatriz Martínez Pedraza y Lic. Ing. Pedro Hernández Delgado sin los cuales esta investigación no hubiese sido posible por todo su esfuerzo y dedicación gracias.

A mi mamá por darme lo que no tiene, por hacer esfuerzos gigantes para poder graduarme, por sus noches de desvelo, por todo ese amor que me profesa, por todos los consejos dados, por eso y muchos más, gracias.

A mi padre por darme todo su amor y cariño y ayudarme a enfrentar todos los obstáculos que se me han presentado en el camino.

A mi novia Griseys Mederos por todo ese amor y comprensión que me brinda día a día y por su ayuda incondicional.

A mi tata Karla, a Sara y Rita por todo el cariño que me han dado.

A mima Mildy y abuelo Raúl, a mima Cirial y abuelo Fermín, a mis tíos y primos gracias por apoyarme siempre.

A todas aquellas personas que desde que llegué a la universidad me brindaron su mano para atravesar este largo camino.

A mis compañeros de aula que hoy son ingenieros y a los que no siguieron por cosas de la vida, en especial a Christian que más que un compañero es un hermano.

A la Dra. Marian mi hermana que aunque no la vea todos los días siempre estuvo para darme un buen consejo. A ella y toda su familia, gracias.

En la universidad pude realizar mi sueño de ser “artista”, a todas las personas de casa de cultura muchas gracias, en especial a Noraya, Ania y Luisito

Al profe Tato por darme la oportunidad de conocer sobre la carrera de Turismo y darme excelentes consejos.

A Sonia Benavides por brindarme siempre su ayuda.

Al profesor Tomas Espinosa por ser más que un profesor, un amigo.

A todos los profes del departamento de construcciones por brindarme sus conocimientos y prepararme como futuro ingeniero en especial a Braga, Lima, Recondo, Alejandro, Manuel, Reina, Homero y Carlos.

Al Ruben por su ayuda desde los primeros años en la carrera.

A mis actuales compañeros de aula en especial a Xiomara, César, Luis David, Richard, Sara, Narciso, Sandra, Canito, Niuris, Lester, Lesly e Iris, el Peque, Troya.

A Jorge Inda por ser más que un compañero de aula, un verdadero amigo y un hermano.

A todos con los que compartí en las fiestas, en especial a Álvaro.

RESUMEN

Las vigas U postensadas y pre-losas prefabricadas son una nueva forma de concebir la superestructura de un puente para formar una sección cajón, por lo que el uso de este tipo de solución se pudiera implementar en la terminación del viaducto de Matanzas. Una vez analizado el estado del arte de las vigas U postesadas, su evolución e implementación en diferentes proyectos, se afirma que estas vigas pueden ser utilizadas para la conformación de puentes que tengan que desarrollar una curva, pues posibilitan mayor estética, reducción de las vigas a utilizar y una disminución del costo del proyecto. Se definió una serie de elementos para la conceptualización geométrica de la superestructura de un puente curvo con sección cajón prefabricado utilizando la Norma AASTHO LRFD Bridge Design Specifications y documentos que se rigen por esta normativa. Para el dimensionamiento de una viga U curva se tiene en cuenta diferentes elementos donde lo más importante es la eficiencia de la sección, del radio de la curva a seguir y la base de la sección de la viga. Se concibió geoméricamente una propuesta de vigas U postesadas y pre-losas prefabricadas para implementarla en la continuidad y terminación del viaducto de Matanzas partiendo de los elementos analizados. Se elaboró la conceptualización de los moldes para las pre-losas y vigas propuestas, lo que proporciona una primera idea para su construcción. Este trabajo es un acercamiento a este sistema de viga y losa, donde se enfocan diferentes elementos para realizar una conceptualización geométrica de la superestructura de un puente en Cuba.

Palabras claves: vigas U postensadas; pre-losas prefabricadas; conceptualización; moldes.

.

.

ABSTRACT

The post-tensioned U-beam and precast pre-slabs are a new form to conceive the superstructure of a bridge to form a box section. That is why the use of this solution could be carried out to finish Matanzas viaduct. Once analyzed the state of the art of the post-tensioned U-beams, its evolution and implementation in different projects, it can be asserted that these beams can be used for the conformation of bridges that develop a curve because they enable a greater aesthetics, a reduction of the beams to be used and a decreasing in the cost of the project. It was defined a series of elements for the geometrical conceptualization of the superstructure of a curved bridge with a precast box section using the AASTHO LRFD Bridge Design Specifications' Regulation and documents that are subjected to this regulation. It was taking into account different elements to determine the dimensions of a curved U-beam, where the most important aspects are the section efficiency, the radius of the curve to be follow and the base of the beam section. It was conceived, geometrically, a proposal of post-tensioned U-beams and precast pre-slabs to be implemented in the continuation and ending of the Matanzas viaduct, taking into account the elements previously analyzed. It was elaborated the casts for the pre-slabs and beams that were proposed, what provides a first idea of its construction. This work is an approach to this system of beam and slab, where different elements are focused to accomplish a geometrical conceptualization of the superstructure of a bridge in Cuba.

Keywords: post-tensioned U-beam, precast pre-slabs, conceptualization, casts.

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo I: Acercamiento a la concepción de puentes curvos de hormigón postensado de sección cajón.	7
1.1 Componentes estructurales de puentes.	7
1.2 Reseña historia de la evolución de los puentes	9
1.3 Puentes de hormigón pretensado.	10
1.4 Ventajas y desventajas del hormigón pretensado en la construcción de puentes. .	11
1.5 Puentes de vigas.	14
1.6 Formas de concebir una sección cajón para puentes.	15
1.7 Superioridad de la viga U postensada curvada horizontalmente.	20
1.8 Construcción de las vigas U.....	23
1.9 Losa de cierre.	24
1.10 Moldes para la creación de vigas.	26
1.11 Moldes para la creación de losas.	28
1.12 Actualidad de los puentes postensados en Cuba.....	28
1.13 Implementación de puentes vigas cajón en Matanzas.	28
Conclusiones Parciales.....	31
Capítulo II Conceptualización de las vigas U postensadas curvas y pre-losas prefabricadas.	32
2.1 Concepción de las vigas.....	32
2.1.1 Dimensionamiento.	32
2.1.2 Análisis de estabilidad de la viga con radio constante.....	34
2.1.3 Eficiencia de la sección.....	37
2.1.4 Peralto de la sección.....	38
2.1.5 Grosor de paredes.	39
2.1.6 Diafragmas.	39
2.1.7 Distancia entre vigas.	40
2.1.8 Espaciamiento entre vigas.....	40
2.1.9 Construcción de la viga.....	41
2.1.10 Transportación.	42
2.2 Pre-losas.	42
2.2.1 Pre-losas interiores.....	43
2.2.2 Pre-losas exteriores.	45
2.3 Moldes.....	47
2.3.1 Cama superior.	47
2.3.2 Cama inferior.	48
2.3.3 Molde de las losas para voladizo.	48
2.3.4 Moldes para pre-losas interiores	48
Conclusiones Parciales.....	48
Capítulo III. Implementación conceptual de sección cajón para puentes curvos con vigas postensadas y pre-losas prefabricadas.	50
3.1 Implementación de vigas U postensadas curvas en la etapa final del viaducto de Matanzas.	50
3.2 Dimensionamiento de la viga.....	53

3.2.1 Resultados del análisis de la estabilidad de la viga.....	54
3.2.2 Eficiencia de la sección.....	55
3.2.3 Peralto de la sección.....	56
3.2.4 Grosor de paredes.	57
3.2.5 Longitud de las vigas	57
3.2.6 Espaciamiento entre vigas.....	58
3.3 Concepción de las pre-losas.....	59
3.4 Concepción de los moldes.	62
3.4.1 Construcción de los moldes de las vigas.....	62
3.4.1.1 Cama inferior.	63
3.4.1.2 Cama Superior.	65
3.4.2 Construcción de los moldes de losa.	69
3.4.2.1 Moldes losas con voladizo (exteriores).....	69
3.4.2.2 Moldes losas sin voladizo (interiores).	71
Conclusiones Parciales.....	72
Conclusiones	73
Recomendaciones	74
BIBLIOGRAFÍA	75
Anexos	78
Anexo No. 1 Plano Concepción de vigas U. (Ver carpeta de anexos).....	78

INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios el hombre ha construido puentes para unir dos puntos de interés con diferentes materiales, siendo el hormigón pretensado uno de los utilizados en la concepción de los diferentes elementos de los puentes.

El aumento de los flujos vehiculares ha obligado al hombre a crear nuevas vías de comunicación con el objetivo de facilitar una disminución de éstos, a través de intersecciones a desnivel o puentes donde su trazado vial contemple curvas. Con la utilización de vías U postensadas se ha posibilitado la creación de dichas construcciones con una mayor estética, disminución de los costos y vigas a utilizar. Este tipo de construcción ha sido utilizado con éxito en los Estados Unidos de América.

En los últimos años en Cuba, se ha experimentado un incremento de la circulación vehicular, existiendo en las horas picos congestionamientos en las principales calzadas y avenidas de las ciudades, por lo que se hace necesario concebir nuevos viales que den respuesta a este aumento del tráfico.

Un ejemplo de lo anterior se expresa en la ciudad de Matanzas, donde la única vía que permite el flujo vehicular entre la barriada de Versalles con el centro de la ciudad de Matanzas, es el puente Lacre Morlot (La Concordia), el cual data de más de un siglo de construcción, marcado con un notable deterioro. Para dar una solución a la continuidad y terminación del viaducto de la provincia, facilitando la comunicación del transporte automotor entre ambas barriadas, la Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería (EMPAI) de la provincia de Matanzas, se encuentra inmersa en concebir puentes con un mayor atractivo, de acorde a las nuevas formas de construcción.

Con los resultados de la presente investigación, el autor propone una solución teórica con el empleo de pre-losas y vigas de sección U a la propuesta de continuidad del viaducto de Matanzas concebida por el estudiante Yunior R. Rodríguez de quinto año de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Matanzas.

Esta obra a construir forma parte de un proyecto, el cual consta de diferentes fases en su ciclo de vida, siendo éstas: de concepción, definición, implementación, operación y desactivación. La conceptualización geométrica de la superestructura de puente curvo con sección cajón prefabricado, está concebida en la primera etapa del mismo, la cual está sustentada en vigas U postesadas y losas prefabricadas colocadas en su tope para la conformación de una sección cajón y losas que salven una luz entre dichas vigas. Esta concepción constituye una novedad para la construcción de puentes en Cuba.

Teniendo en cuenta los aspectos expuestos con anterioridad, el autor concibe como problema de investigación el siguiente:

Problema de investigación: ¿Cómo lograr la conceptualización geométrica de la superestructura de un puente curvo con sección cajón prefabricado en Cuba?

Objetivo general:

- Conceptualizar geoméricamente de la superestructura de un puente curvo con sección cajón prefabricado en Cuba.

Objetivos Específicos:

- Analizar el estado del arte del diseño de vigas postensadas curvas tipo U para puentes curvos.
- Definir procedimiento para la conceptualización geométrica de la superestructura de un puente curvo con vigas U postensadas.
- Implementar la conceptualización geométrica de la superestructura de un puente curvo con vigas U postensadas para la continuidad y terminación del viaducto de Matanzas.
- Diseñar moldes para los elementos de la superestructura de un puente curvo con radio constante.

Campo de acción.

Conceptualización geométrica de vigas de sección U postesadas y losas prefabricadas para puentes curvos con radio constante.

Objeto de estudio.

Vigas de secciones U postensadas para puentes curvos y losas prefabricadas para formar una sección cajón.

La presente investigación constituye un acercamiento al estudio de vigas postensadas con sección U en Cuba. El autor, para conformar la presente tesis, consultó una variada bibliografía en idioma inglés, al ser muy escasa en idioma español, posibilitando con ello la compilación de información relevante sobre estos tópicos. De igual forma, en Cuba no existe normativa para la construcción de las vigas propuestas, por lo que se hizo necesario acudir a normas como son: “AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) LRFD Bridge Design Specifications” y diferentes documentos asociados a ésta, para la conceptualización de las vigas y las pre-losas a utilizar y de esta forma conformar la sección de la superestructura del puente para su implementación en la continuidad y terminación del viaducto.

La conceptualización de los elementos de la superestructura del puente, fue realizado con la utilización de diferente software, como son: SketchUp Pro 2018, AutoCAD 2017, Autodesk Structural Analysis Professional 2018.

Para dar respuesta a los objetivos concebidos, se utilizaron un conjunto de métodos de científicos, entre los que se destacan:

Analítico - Sintético: Permitió analizar la información existente a nivel internacional sobre la utilización y forma de creación de los elementos componentes de los puentes curvos con vigas de sección U postensadas y un sistema de losas prefabricadas. Este método se manifestó en el análisis de la bibliografía y la síntesis de la información consultada.

Histórico-Lógico: Proporcionó exponer de forma correcta la evolución de los materiales utilizados en la creación de los puentes y los diferentes formas de sus elementos.

Modelación: Facilitó el diseño de las losas y vigas de la superestructura de un puente de sección cajón, utilizando como herramientas diferentes *softwares* de diseños.

La presente tesis presenta determinados valores, destacándose entre ellos:

Económico: La adecuación de esta tipología en Cuba sustituirá la forma de creación de los puentes curvos y la posibilidad de creación de nuevas formas de intersección posibilitando con esto las necesidades de satisfacer las necesidades del tránsito y permitir una mejor fluidez, seguridad vial y confort.

Social: Al aplicarse esta propuesta, se facilitará una forma segura y cómoda del flujo vehicular entre La Habana y el balneario de Varadero, preservando al mismo tiempo los valores del patrimonio del casco histórico de la ciudad de Matanzas.

Metodológico: Una vez realizada el dimensionamiento de los componentes para su implementación en los puentes curvos, se aporta a las empresas especializadas una herramienta pionera para el posterior estudio de otros aspectos de los elementos a utilizar en la creación de los puentes curvos.

Es importante señalar el aporte teórico de la presente investigación, al realizarse una compilación relevante de información en idioma español sobre la concepción de puentes con vías postensadas, la cual podrá ser utilizada como base bibliográfica en los contenidos que sobre este tópico pueda incorporarse en la formación de pregrado y postgrado.

El aporte práctico, se sintetiza en la conceptualización de las vigas y losas para la formación de superestructura de un puente, la cual puede tener una curva en su trazado vial. Esta propuesta puede ser aplicada en la continuidad y culminación del viaducto de Matanzas.

Estructura de la tesis.

Resumen.

Índice.

Introducción.

Se detalla el protocolo de investigación, donde se plantea la situación problemática, problema científico, objetivo general y objetivos específicos, los métodos de investigación utilizados y los principales valores que presenta la presente tesis.

Capítulo I: Acercamiento a la concepción de puentes curvos de hormigón postensado de sección cajón.

En él se refleja el estado del arte del hormigón postensado en puentes, recopilándose información bibliográfica sobre la implementación de los materiales utilizados cronológicamente en los puentes, la viabilidad de la viga de sección U para puentes curvos y la implementación de diferentes tipos de pre-losas.

Capítulo II: Conceptualización de las vigas U postensadas curvas y pre losas prefabricadas.

Se describen diferentes componentes a tener en cuenta para el diseño geométrico de los elementos de la superestructura de los puentes de sección cajón prefabricados, utilizando vigas U y pre-losas.

Capítulo III: Implementación conceptual de sección cajón para puentes curvos con vigas postensadas y pre-losas prefabricadas.

Este capítulo referencia, así como los análisis realizados en el segundo capítulo, se puede dar solución conceptual a la creación de las vigas U postensadas y las losas prefabricadas para conformar una sección cajón y proponerla para la creación de la etapa

final del viaducto. Además se conciben conceptualmente los moldes para los elementos en cuestión.

Conclusiones.

Concluida la investigación, según la situación problémica y la aplicación de los métodos de investigación, se obtienen conclusiones partiendo de los objetivos específicos planteados.

Recomendaciones.

Bibliografía.

Anexos.

CAPÍTULO I: ACERCAMIENTO A LA CONCEPCIÓN DE PUENTES CURVOS DE HORMIGÓN POSTENSADO DE SECCIÓN CAJÓN.

Los puentes en cierta medida hacen más fácil la comunicación terrestre en todos los sentidos pues con el simple hecho de acortar distancias de un punto a otro, independientemente de los escenarios geográficos adversos, ahorrar tiempo, asegurar la transportación, constituyen una ganancia y factibilidad para su diseño y construcción. Es por ello que los hombres se dieron a la tarea de edificar puentes cada vez más resistentes y en armonía con el medio ambiente.

Otro elemento de gran significado, es la necesidad de la resistencia que deben disponer los puentes a partir de las cargas que soportan, su propio peso y la intensidad del tráfico vehicular, por lo que la selección de materiales resistentes para los diferentes componentes estructurales ha sido de suma importancia para la perpetuidad de éstos.

En el presente capítulo se exponen los diferentes criterios y conceptos vinculados con los puentes, en particular a los de vigas tipo U a nivel internacional y la utilización de un sistema de losas prefabricadas, para formar de conjunto con la viga U una sección cajón.

1.1 Componentes estructurales de puentes.

Los puentes están conformados por diferentes elementos estructurales, los cuales poseen una función propia, haciendo que trabajen como un todo integral. Dichos elementos están ubicados en la superestructura o en la subestructura. Aspectos cuyas definiciones son tomadas de la Norma Americana “AASHTO LRFD Bridge Design Specification” los cuales se abordan a continuación. Ellos se reflejan en la fig. 1.1

Subestructura: Conjunto de elementos estructurales de un puente encargados de transmitir las acciones desde la superestructura a la infraestructura.

Cimentación: Parte de la obra que constituye su base o apoyo y a través de la cual se transmiten las cargas de la estructura al terreno.

Estribo: Elemento vertical que constituye el apoyo extremo de los tramos exteriores de un puente.

Pila: Elemento vertical que constituye los apoyos de los tramos interiores de un puente.

Superestructura: Conjunto de elementos estructurales de un puente que soportan directamente las acciones que se producen como consecuencia del cumplimiento de su propia misión funcional.

Tablero de puente: Estructura de un puente sobre la que se coloca el pavimento para transitar y que descansa sobre la estructura de las vigas, arcos, etc., dispuestos en toda su longitud.

Vigas: Reciben esta denominación por ser los elementos que permiten salvar el vano, pudiendo tener una gran variedad de formas.

Diafragmas: Son vigas transversales a las anteriores y sirven para su arrojamiento. En algunos casos pasan a ser vigas secundarias cuando van destinadas a transmitir cargas del tablero a las vigas principales. Estas vigas perpendiculares pueden recibir otras denominaciones como viguetas.

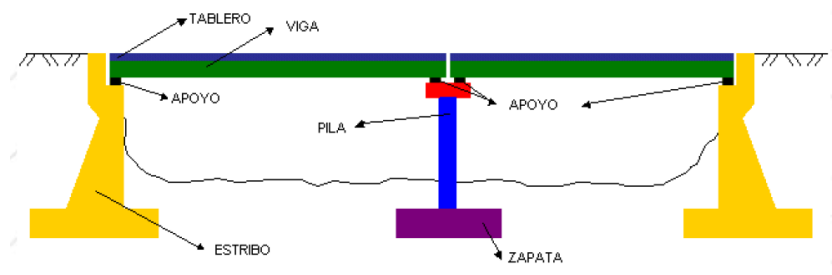


Fig.1.1 Elementos de un puente. Fuente: Alberto Villarino Otero. Libro Puentes

La forma, tipo de materiales u otros componentes han presentado una evolución en el tiempo, asociada al propio desarrollo de la ciencia y la técnica, siendo necesario realizar un esbozo histórico de la evolución de los puentes.

1.2 Reseña historia de la evolución de los puentes.

Los primeros puentes se realizaron de materiales cuya resistencia y durabilidad era ínfima si la comparamos con los materiales de hoy. Las lianas o cuerdas, madera y piedra fueron los primeros materiales utilizados para la creación de las diferentes tipologías de puentes, destacándose tres grandes familias: rectos, arcos y colgados.

A finales de siglo XVIII se construye el puente de Coalbrookdale (1776-1779) sobre el Severn en Inglaterra, siendo el primer puente de fundición que dio lugar a la época más brillante de historia de los puentes, introduciéndose un nuevo material, el hierro, posibilitando la creación de puentes metálicos.

A finales del siglo XIX, cien años después de la iniciación de los puentes metálicos, se empezó a utilizar el acero para construir puentes, el primero cuya estructura principal fue de acero es el de San Luis sobre el río Mississippi en los Estados Unidos, proyecto de James B. Eads en 1874.

Otro de los materiales de gran impacto para diferentes acciones constructivas, entre ellas los puentes en el siglo XIX, es el hormigón armado. Se le atribuye la invención del hormigón a John Smeaton en la construcción del faro de Eddystone en Reino Unido en 1774 y a Joseph Aspdin la regulación de los componentes del cemento portland en 1824.

El primer puente de hormigón armado es la pasarela de Chazelet (Francia), se construyó en 1875, con una luz de 16,5 m y 4 m de ancho por Joseph Monier lo cual facilitó construcciones de puentes de grandes luces a inicios del siglo XX, ejemplo de ello es el Ivry sobre el Sena (Francia) en 1930, el cual fue una pasarela triangulada de 134,5 m de luz. El puente de Villeneuve-St. Georges sobre el mismo río, con una viga continúa de alma llena con luz máxima de 78 m, terminado en 1939.

A inicios del siglo XX, comienzan las investigaciones para disponer de un material más resistente y económicamente más viable, el hormigón pretensado. Las primeras tentativas fue del norteamericano P.H Jackson y del francés Freyssinet; pero fracasaron en sus inicios, al no disponer de acero de alta resistencia.

Este último autor, logra a finales de la década del 30 del pasado siglo, la introducción del hormigón pretensado en la construcción de puentes con la edificación del puente de Oelede en Alemania, con un tramo biapoyado de 31 m de luz y formado por cuatro vigas doble T, separadas entre sí 1,4 m.

Después de la Segunda Guerra Mundial, la construcción de puentes siguió su avance, con el objetivo de reconstruir los puentes devastados por la guerra o construir otros que facilitaran la comunicación terrestre. Para ello se continuo utilizándose el acero y generalizándose el hormigón pretensado, introduciéndose una variante de éste con los puentes en voladizo, siendo la primera referencia el del puente de Balduinstein, sobre el Lahn en 1950, de 62 m de luz en Alemania.

Con posterioridad comienza la construcción de puentes por dovelas en avance en voladizo en la antigua Unión Soviética y en Europa Occidental, siendo significativo el puente de Almodóvar en España, dirigido y proyectado por Carlos Fernández Casado.

El hormigón como material para la construcción de puentes evolucionó en el tiempo, a partir de la introducción de nuevas ideas de diferentes investigadores e ingenieros. Ejemplo de ello es el ingeniero Eugene Freyssinet, el cual fue el impulsor de convertir los conceptos de pretensado del hormigón en realidad.

1.3 Puentes de hormigón pretensado.

El hormigón pretensado ha demostrado ser técnicamente ventajoso. Mirando 50 años atrás, la construcción de puentes prefabricados ha tenido un constante crecimiento y también el aumento del tamaño y peso de las piezas. Sin embargo el desarrollo no es el mismo en diferentes países, en algunos la construcción de puentes pretensados es muy usada como por ejemplo en Bélgica, Italia, Países Bajos, España, Reino Unido y también Canadá y Estados Unidos, donde el mercado del hormigón pretensado en puentes abarca más del 50%; estos países poseen un extensivo rango de soluciones y técnicas tanto para proyectos pequeños como grandes y el pretensado juega un papel importante en el diseño y ejecución de los proyectos. (José Calavera, 2004).

Tomando como ejemplo a los EE.UU como país, desde 1970 hasta el 2011 ha construido 373 670 puentes, de los cuales 24,45 % son de hormigón, 10,69 % son de hormigón continuo, 17,45 % son de acero, 7,95 % acero continuo, 6,50% pretensado continuo, 2,85 % de madera 0,01 % de albañilería, 0,38 % de aluminio y hierro fundido, 0,15% de otro tipo y 29,46 % de éstos son de hormigón pretensado, apreciándose a simple vista un amplio uso del hormigón pretensado en la construcción de puentes(Pielstick & Inc., 2015)

Este material es económico tanto para puentes de claros medios, donde se emplean elementos pretensados estándar producidos en serie, como para puentes de grandes claros como son los puentes lanzados o atirantados. En la actualidad un gran porcentaje de los puentes a nivel mundial se construyen con esta tipología, y es además una de sus áreas más exitosas.

Este material posee diferentes soluciones típicas; entre los sistemas que se utilizan para puentes de hormigón pretensado tenemos: Losas extruidas o alveolares pretensadas con losa in situ, vigas postensadas con losa, ambas in situ, vigas T, I o cajón con losa in situ, vigas de sección cajón, de una sola pieza o en dovelas, pretensadas o postesadas.

Independientemente de la maximización que ha presentado el uso del hormigón pretensado en la construcción de puentes, éstos presentan determinadas ventajas y desventajas, aspectos que se abordarán a continuación.

1.4 Ventajas y desventajas del hormigón pretensado en la construcción de puentes.

El avance del prefabricado de hormigón pretensado durante sus 65 años de historia es en gran medida incremental y metódico. Las mejoras en materiales, fabricación, eficiencias de construcción, tamaños, formas de productos, garantía de calidad y la confiabilidad resultó en un crecimiento constante de la industria.

En corto tiempo, no solo se ha proporcionado una nueva solución en la industria del hormigón prefabricado, sino también a la comunidad de diseño, donde se ha abierto un nuevo segmento del mercado para fabricantes de puentes, donde por primera vez se están

construyendo varios puentes trapezoidales de viga en forma de caja con luces que se aproximan a los 80m.

Los productos horizontalmente curvados generalmente no han sido considerados debido a procesos de planta profundamente arraigados, encofrado complejo y otras restricciones que sean superados recientemente.(Nickas & Dick, 2015).

El desarrollo ha facilitado a esta nueva e importante tecnología:

- La capacidad de formar, emitir, manejar y transportar vigas de más de 2,4 m de peralte con longitudes de una sola pieza de más de 60m.
- El desarrollo y uso generalizado de concreto confiable de alto rendimiento que proporciona alta resistencia, baja permeabilidad, ganancia de fuerza rápida y adecuada fluidez.
- Numerosas técnicas que permiten el empalme en el campo de vigas de hormigón prefabricado en orden para reducir el tamaño de las piezas individuales que facilita la manipulación y el transporte mientras se alcanzan tramos muy largos, en algunos casos más de 80 m.
- Innovación en la fabricación de formas de acero que brinda la capacidad de adaptarse un conjunto variable de condiciones. Esto incluye la capacidad de crear formas de vigas complejas curvadas horizontalmente con radios variables en la misma forma ajustable y reutilizable.
- El desarrollo de equipos de acarreo únicos que pueden transportar con seguridad grandes cargas permitidas de hasta 1512 kN en vías públicas.
- La disponibilidad de grandes grúas móviles que pueden levantar estas pesadas vigas.
- Comercialización y disponibilidad de software que permite el análisis de estadísticas y esquemas que incluye los cambios estructurales en las propiedades de sección que pueden ocurrir durante la erección, incluyendo la consideración de fluencia y contracción, así como también la determinación de deflexiones y cambios durante la construcción.

- Los elementos se fabrican en un lugar distinto del puente, permitiendo simultanear su fabricación con la construcción de otros elementos del puente como cimentaciones, pilas y estribos, con la consiguiente reducción de plazos de construcción.
- Se puede disponer de mayor espacio de fabricación pues incluso se pueden utilizar varias fábricas, ventaja especial si en la obra existe disponible sólo un espacio reducido.
- Una mayor resistencia permite disminuir la sección necesaria y con ello el peso de la pieza y la magnitud de los medios de transporte y montaje necesarios para la construcción.
- Las tolerancias de fabricación, la calidad del acabado y el Control de Calidad son mejores.
- Se ahorran apuntalamientos, cimbras y encofrados en la obra.

Este material poseen inconvenientes o desventajas para su utilización; algunos de los cuales son:

- Se necesitan grandes medios de transporte y montaje, así como sus correspondientes accesos y plataformas de trabajo en la obra.
- Las uniones entre elementos o entre elementos prefabricados y partes “in situ” pueden ser bastantes o muy complejas, en especial en estructuras hiperestáticas.
- Los elementos prefabricados para puentes se fabrican en general, con un hormigón de mayor resistencia que el utilizado en partes de puentes “in situ” con la misma función resistente, por varias razones:
- El desmolde en edades tempranas, para la reutilización del molde y reducir el ciclo temporal de fabricación, requiere suficiente resistencia a esas edades tempranas, en especial en piezas pretensadas, lo que exige hormigones de alta resistencia final.

Este material tiene la posibilidad de moldearse dependiendo la necesidad que se tenga para la creación de diferentes elementos estructurales y no estructurales de un puente, donde uno de los elementos de mayor relevancia son las vigas.

1.5 Puentes de vigas.

Los puentes de vigas en su mayoría están compuestos por vigas y diafragmas o vigas secundarias transversales a las primeras, conformando el entablado del puente, sobre éstas se colocan losas, las cuales pueden ser de hormigón in situ o prefabricado. A estas vigas les llega todo el peso de la superestructura, transfiriéndolo posteriormente a los apoyos y hacia los cimientos.

A partir del desarrollo del hormigón pretensado esbozado anteriormente, se ha visualizado que el mismo ha sido utilizado en los diferentes elementos de los puentes, tanto en losas, estribos pilas y vigas, las cuales son un elemento fundamental en la transferencia de las cargas que recibe el puente.

Los puentes de vigas son utilizados para longitudes, cortas y medias de 30 a 40 m, en algunos casos pueden alcanzar 60m. Los mismos poseen una gran variedad de secciones, como son: Vigas I vigas cajón, vigas T o T invertida, las cuales pueden variar en longitud y peralte, dependiendo de la longitud de la luz que se salve.

Los tableros de las vigas pueden ser de losa con encofrado perdido entre vigas, pre-losas o semi-losas entre vigas o con vuelos exteriores, losas de espesor completo y losas para tableros de vigas metálicas.

Los estribos pueden ser de tierra armada, de elementos verticales en cantiliver, de gravedad y estribos flotantes sobre terraplén y las pilas o fustes independientes con o sin capitel de apoyo, pilas pórticos formados por fustes verticales y cabeceros superior de unión y pilas construidas por dovelas horizontales.

Todos estos elementos antes mencionados han ido evolucionando con el paso del tiempo, los cuales han variado su forma dependiendo del proyecto que se vaya a implementar. Ello se justifica en las vigas utilizadas en los puentes, específicamente las vigas con

sección U, las cuales han variado su forma de empleo, cantidad de vigas y sección de las mismas.

1.6 Formas de concebir una sección cajón para puentes.

Se puede relacionar los conceptos de viga U (fig. 1.2 a) y viga cajón (fig. 1.2 b); pero no son la misma estructura. La viga cajón puede ser de hormigón pretensado, postensado o acero, posee una sección completamente cerrada donde se puede asentar la losa del puente. La misma puede ser de sección única conformando una caja cerrada, utilizada mayormente en los puentes para trenes, aunque pueden utilizarse varias vigas en forma de cajas para conformar la calzada.



Fig 1.2 a Viga U de hormigón. Fuente:(Gregg A.Reese, Summit Engineering Group, & Company, 2017)

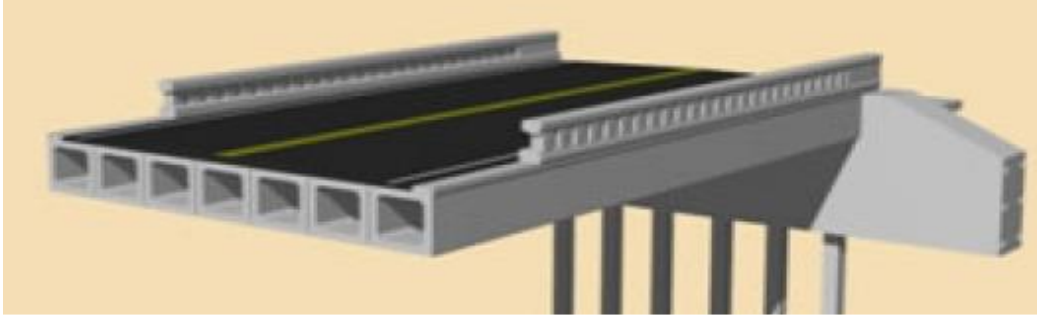


Fig. 1.2 b Puente con viga cajón. Fuente:(www.fhwa.dot.gov/bridge/abc/prefab_def.cfm)

Por su parte la viga U es una estructura que puede ser pretensada, postensadas o de acero, la misma tiene forma trapezoidal o rectangular hueca, la sección cierra cuando se le coloca la losa en la parte superior conformando de esta forma una sección cajón.

La diferencia entre la viga cajón y la viga U, es que la primera es construida en un solo paso y la viga U, se construye primero la viga y posteriormente se le coloca la pre losa, aunque la forma de trabajo de estas dos secciones es similar.

En sus inicios estas vigas, en forma de cajón o en U eran ubicadas una a continuación de otra (fig. 1.3), por lo que se creaban una gran cantidad de juntas entre las mismas y presentaban grietas de cortante sobre las juntas, provocando así la penetración de sales lo cual hacía que aparecieran manchas y corrosión del acero, ocasionando ésto mantenimientos e interrupción del tráfico. Con este tipo de secciones cajón, la construcción de puentes necesitaba una gran cantidad de piezas con una longitud considerable. (Sameh S. Badie, 1999)



Figura 1.3 Puente con vigas cajón adyacentes. Fuente:(NCHRP, 2009)

En la actualidad las vigas U postensadas han evolucionado de forma vertiginosa en diferentes países, se pueden citar ejemplos como Japón, Alemania y Estados Unidos (EE.UU), este último ha aumentado el uso de este tipo de vigas para puentes curvos.

Las vigas con este tipo de sección cajón se ha utilizado en disímiles proyectos de los estados norteamericanos; desde que se introduce el pretensado en dicho país en 1950, ejemplo en 1960 con “Seattle Monorail System”. Años después en 1980 Robert L Reed, jefe retirado en la División de Puentes y Estructuras en 1985, concibió el concepto de una figura trapezoidal abierta en el tope. Un diseño evolucionista con el nombre de “U-beam” la cual tuvo gran aceptación por ser más eficiente que las secciones utilizadas anteriormente.

Desde ese entonces en los territorios de EE.UU donde se ha utilizado con más fuerza las vigas con sección trapezoidal U abierta en el tope con diferentes soluciones de losa para el cierre son en Texas, Colorado, Florida, Pensilvania y Nebraska.

Ensayos eficientes para el desarrollo de las vigas de sección trapezoidal en 1973 “Batchelor and Camphell” recomendaron a la “Ontario Precast Concrete Manufacturers Association” la adopción de la nueva viga pretensada de forma trapezoidal para reemplazar las vigas I en longitudes relativamente largas. (Sameh S. Badie, 1999)

En 1991 el Departamento de Transporte de Texas (TxDOT), desarrollaron vigas U pretensadas. Este sistema tiene características similares a las de Ontario, excepto que estas vigas no son postensadas y son alzadas sin la necesidad de soportes temporales.(Sameh S. Badie, 1999)

En mayo de 1993, la reunión anual de la Asociación Estadounidense de la Carretera Estatal y funcionarios de transporte (AASHTO) Subcomité de Puentes y Estructuras (SCOBS) por sus siglas en inglés, se llevó a cabo en Denver, Colorado. Los asistentes recorrieron el sitio de la rampa de Park Avenue sobre el proyecto de la I-25 el cual estaba en construcción en ese momento. Los ingenieros vieron una gran viga curvada en U de hormigón prefabricado siendo levantada. El puente fue diseñado por el Departamento de Transporte en Colorado (CDOT) por sus siglas en inglés y se muestra

en la fig.1.4. Este fue el primer puente construido en curva con vigas trapezoidales curvadas de hormigón postensado diseñado por el estado.

El director de personal de PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute) señaló el potencial de estas vigas de hormigón prefabricadas curvas.

Los moldes en el campo requerían madera para el encofrado lo cual podría ser mejorado si se hormigonaban en plantas prácticas, pero el encofrado curvo, postensado, y transporte de las secciones pesadas serían impedimentos obvios para el Productor de PCI en el momento. Por lo tanto, PCI continuó monitoreando esta oportunidad única que se estaba desarrollando en Colorado.



Figura 1.4. La rampa de Park Avenue en el centro de Denver, Colorado.

Fuente: Departamento de Transporte de Colorado

De 1995 a 2000, CDOT desarrolló estándares para secciones de viga en U trapezoidales prefabricadas. Las secciones fueron desarrolladas para que puedan ser utilizadas para segmentos curvos horizontales y también pueden ser pretensados, postensados o una combinación de los dos. (Michael L. McMullen, 2008)

Ha pasado más de una década, cuando miembros del Comité de productores de Bridge PCI de Denver informó durante una reunión en 2004 que su empresa estaba produciendo vigas en U curvadas horizontalmente para un proyecto en Denver. Fue el paso elevado de Ramp K (Fig.1.5 que vincula I-25 y SH 270). Tiene un radio de 293 m y una longitud total de 432.8 m.



Figura 1.5. El paso elevado de Ramp K en I-25-SH 270 en Colorado. Fuente: Cumbre Grupo de ingeniería.

En el 2008 en Colorado es terminada la intersección SH 270/I-25 con el nombre de Ramp K, la cual fue el primer puente terminado con vigas U curvadas horizontalmente, fue diseñada por el Departamento de Transporte de Colorado y fue prefabricado en el sitio. Tenía una longitud máxima de 70 m. El proyecto también usó 200 paneles prefabricados de cubierta de hormigón prefabricado para colocar entre las dos líneas de la viga.

Desde la finalización de la rampa de Park Avenue en 1995 hasta aproximadamente 2000, CDOT ha desarrollado continuamente el concepto. Lo refinaron de maneras que alentaron la producción en una planta de prefabricación.

Mover la producción a una planta se considera importante, porque sabían que estas plantas invertirían en acero de alta calidad de forma ajustable para radio que podrían usarse una y otra vez para muchos proyectos. El tiempo y los costos de configuración serían más bajos; por lo tanto, la solución sería práctica para proyectos de tan solo dos o tres tramos.

Las plantas con encofrado de acero producen acabados superficiales superiores y puede mantener tolerancias más ajustadas, control de calidad y programas de aseguramiento.

Además, las plantas colocan y curan a alta resistencia, poseen baja relación agua-cemento de manera rutinaria sin revestimiento, requisitos complejos para los procedimientos de clima frío o caliente necesarios en el campo.

La fabricación en planta optimiza la sección transversal aprovechando el hormigón. La decisión a la producción de plantas fue un paso que reduciría programa, costo y mejora de la calidad.

En Florida se implementa por primera vez este tipo de vigas U en el 2014 para el rediseño de la intersección con la Interestatal 95 (I 95) y la Carretera Estatal 202 (*State Road 202*), en Jacksonville, ganando un lugar entre las diferentes tipos de vigas a utilizar en puentes con similares características.

Esta evolución de la viga U ha posibilitado la creación de viaductos con una calidad excelente, un costo inferior y disminución en los tiempos de ejecución si se compara con otras tecnologías.

1.7 Superioridad de la viga U postensada curvada horizontalmente.

La utilización de diferentes formas y materiales para la creación de vigas que fueran curvas ha ido cambiando con el transcurso de los años, como se ha explicado anteriormente.

Las vigas de hormigón postensadas surgen como una alternativa a las de viga de acero en la construcción de puentes vehiculares, estas vigas de hormigón postensado han demostrado su rentabilidad, pues la oxidación en los aceros tanto pasivos como activos de este material es menor al no estar en contacto directo con el medio ambiente. Otro aspecto a destacar es el de la durabilidad de estos elementos y la disminución de los mantenimientos a los mismos.

Al realizar una comparación en uno de los primeros proyectos con vigas curvas en Colorado, en 2008 es terminado el proyecto 270 Ramp Y, donde Modjeski and Masters Company en una de sus presentaciones expone la diferencia de costos entre un diseño de acero y el diseño empleando vigas curvas postensadas, donde se observa una clara rentabilidad de postensado por encima del acero al observar que el diseño en este material

hubiese costado \$6 200 000 mientras que el utilizado tuvo un costo de \$ 4 732 240. Estas cuestiones positivas a favor del postensado reafirmaron que el material utilizado para dichas vigas, ocupe en la actualidad un lugar cimero.

Si se analiza el contexto actual donde los flujos vehiculares son cada vez mayores y las intersecciones a nivel están a punto del colapso, los cruces a desnivel son una variante factible para solucionar dicho problema salvando grandes luces. Hasta ahora para salvar tramos intermedios se han empleado estructuras relativamente cortas, a menudo con diversos requisitos, construyéndose con hormigón armado. El notable éxito de proyectos recientes demuestra las ventajas de usar componentes prefabricados de hormigón postensado para construir estas estructuras en aplicaciones de alto perfil, pero con la solución de un problema aparecen otros, este es el caso de dichas intersecciones a desnivel, las cuales para su viabilidad deben desarrollar una curva horizontal con un determinado peralte, para que la circulación se realice con seguridad y confort, es aquí donde las vigas-U postensadas son una variante factible para la creación de estas nuevas intersecciones.

El desarrollo de las vigas curvas viene dado ya que las vigas usadas para realizar estos puentes curvados horizontalmente eran rectas, con este tipo de curvas los puentes tenían que desarrollar un voladizo para poder implementar la curva deseada, esto trae consigo que las fuerzas de cortante no sean asumidas de forma equitativa por todas las vigas, por ende la utilización de las vigas curvadas horizontalmente resuelve este problema de forma eficaz (fig. 1.5).



Fig. 1.5 Vigas rectas utilizadas en la construcción de un puente curvado horizontalmente. Fuente:(William N. Nickas, 2010)

Actualmente para estas soluciones de vigas curvadas horizontalmente existen diferentes secciones, las más comunes son las I y en la actualidad se ha insertado la sección U.

Comparando estas dos soluciones de viga, la I y la U el autor plantea que si se traza una línea curva imaginaria y sobre ella se proyecta una viga I y una viga U con características similares, mismo peralte y ancho de las base iguales se puede observar claramente que hay una mayor posibilidad que la viga U una vez cerrada con la pre-losa pueda resistir los efectos de la torsión de forma más eficaz que la viga I.

Otro aspecto que se puede plantear en relación con la superioridad de la viga U en cuanto a la viga I es la rigidez que adquiere la misma una vez que es cerrada con la losa, por lo que dicha sección es más eficiente que la viga I. (ver capítulo 2)

En el caso de utilizar vigas U el número de éstas es inferior al que se necesitaría utilizando vigas I. Puede indicarse que dos vigas U son equivalente a cinco vigas I. y cuatro vigas U equivalen a siete vigas I, por lo que los gastos de izaje cuando se construyen puentes curvos con vigas U son menores que si se emplearan vigas de sección I fig.1.6

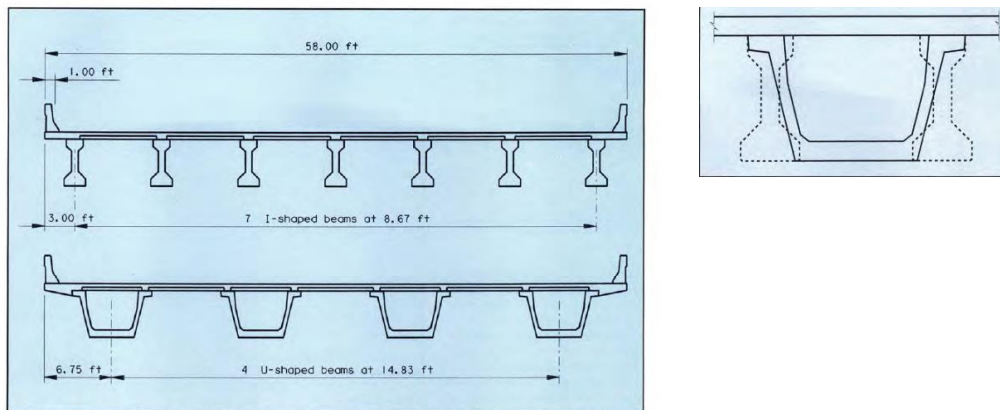


Fig.1.6 Comparación entre vigas U y vigas I. Fuente: The New Texas U-Beam Bridges - An Aesthetic and Economical Design Solution. PCI Journal

Otro de los aspectos que se pueden comparar es la parte estética, ya que se observa de forma más armónica en su parte inferior un puente con vigas U, que un puente con vigas

I. También posibilita al conductor observar de mejor forma la vía y el paisaje al poseer vanos más grandes y una menor cantidad de pilas.

Si bien este tipo de vigas es superior que las vigas I en cuanto a características estructurales, se dificulta a la hora de realizar su encofrado por la forma que posee, lo cual no es un impedimento para poder desarrollar su construcción a nivel mundial.

Las secciones de la viga se pueden utilizar para tramos simples, sus tramos son limitados porque son pesados de transportar. Las longitudes de tramo se pueden aumentar considerablemente empalmado secciones más cortas en el sitio del puente y luego hacer tramos múltiples continuos sobre varios pilares. Las longitudes de tramo pueden aumentarse más proporcionando secciones más peraltadas, como el proyecto que se muestra en la, Figura 1.7



Figura 1.7. El viaducto I-5 Trinidad (Colorado) presenta vigas escalonadas que brindan espacio libre de 80 m sobre un patio de ferrocarril. Foto: PCI

Otro de los aspectos que favorece la utilización de vigas U es el tiempo de construcción y ahorro de costos.

Donde la cimbra no es práctica para vigas cajón de hormigón in situ, la solución prefabricada ha demostrado ser no solo el menos costoso sino que resulta una construcción más rápida, el apuntalamiento se simplifica y los costos son menores.

1.8 Construcción de las vigas U.

La construcción de Vigas en U horizontalmente curvadas son secciones moldeadas en encofrado de acero que puede ser configurada para acomodar varios radios tan cortos como 150 m. Las secciones contienen conductos de postensado en la parte inferior y pueden ser parcialmente postesadas si es necesario para controlar las tensiones.

Para la conformación de la sección cajón con vigas U postesadas y la conformación de la sección transversal del puente es necesario la colocación en su tope de una pre-losa, la cual puede concebirse de diferentes procederes. A continuación se expresa alguna de las variantes existentes.

1.9 Losa de cierre.

La parte superior de las vigas en U se cierran con " tapa de losas " en el campo. La construcción de estas pre-losas para estos tipos de puentes puede ser con hormigón pretensado o con hormigón amado. En la actualidad es más común observar la colocación de estas pre-losas posterior a la implementación de las vigas, en algunos casos son colocadas in situ las losas que se encuentran entre las vigas, utilizando encofrado perdido o moldeadas en planta. Las colocadas encima de las vigas, posibilitan un todo integrado, formando una sección cajón.

Estas losas, las cuales dan el cierre a la sección cajón, presentan una construcción diversa, pues pueden o no conformar voladizos en la superestructura del puente. La construcción de los mismos está dada a partir de dos soluciones, la primera utilizando aditamentos que se colocan en las paredes exteriores de las vigas para realizar el encofrado in situ (fig. 1.6 a, b) o utilizando losas prefabricadas de dos capas completadas con una carpeta de hormigón in situ para dar un cierre completo a la sección transversal del puente (fig. 1.6 d, e). De igual forma pueden utilizarse losas de hormigón prefabricado de peralte total o vaciado completo fig. (1.6 c), aunque estas son mucho más pesadas que las mencionadas anteriormente.

De acuerdo a la Asociación de Vías Federales, por sus siglas en inglés (FHWA), los sistemas y elementos de puentes de hormigón prefabricado brindan muchas ventajas, tales como una zona de trabajo segura, una mejor calidad de la construcción, un menor impacto ambiental con menor interrupción del tráfico (FHWA 2004). El uso de elementos de puentes prefabricado reduce la cantidad de equipo requerido en el lugar del proyecto, elimina la necesidad de ubicar pilares temporales en el caudal de cruce, y reduce la cantidad de emisiones producidas por el tráfico detenido, el cual a su vez disminuye el impacto medioambiental. (PATIL, 2005)

TxDOT desarrolló e implementó un nuevo sistema de plataforma de puente prefabricado en Ft. Worth, Texas, con la ayuda de investigadores de la Universidad Estatal de Oklahoma, la Universidad A & M de Texas y Austin Prestressed. Este sistema ha abordado cada desafío modificando la forma de los paneles de plataforma prefabricados, de modo que contienen una sección de peralte total y peralte parcial o vaciado parcial. Elimina la necesidad de todo tipo de trabajo, proporciona una plataforma de trabajo de construcción, es ajustable para cumplir con las tolerancias de construcción y proporciona un soporte para todos los equipos de construcción necesarios. Se utiliza hormigón armado in situ para unir las piezas pre montadas y proporcionar la superficie de conducción final para la plataforma del puente. Este sistema ha producido mejoras drásticas en la velocidad de construcción. Las mejoras en la economía se proyectan sobre los métodos modernos de construcción de puentes en Texas. (Tyler Ley, Ghashgesh, & Patil, 2010).

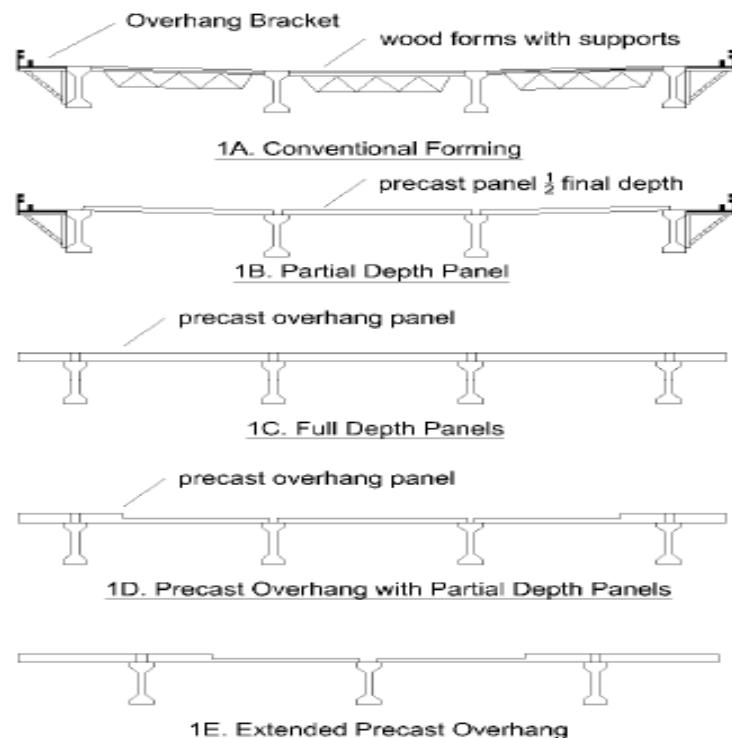


Figura 1.6 Diferentes formas de prefabricado y construcción in situ de las losas de cubierta de puentes. Fuente: (Tyler Ley et al., 2010)

Para la conformación de los voladizos y crear la sección cajón con las vigas U se utilizará el sistema propuesto por TxDOT (fig.1.7).

Se colocan pre-losas de vaciado parcial para las vigas interiores y las losas entre vigas, una vez colocada todas las losas se vierte una capa de hormigón, la cual proporciona la unión de todas las piezas y el peralte total de la sección.

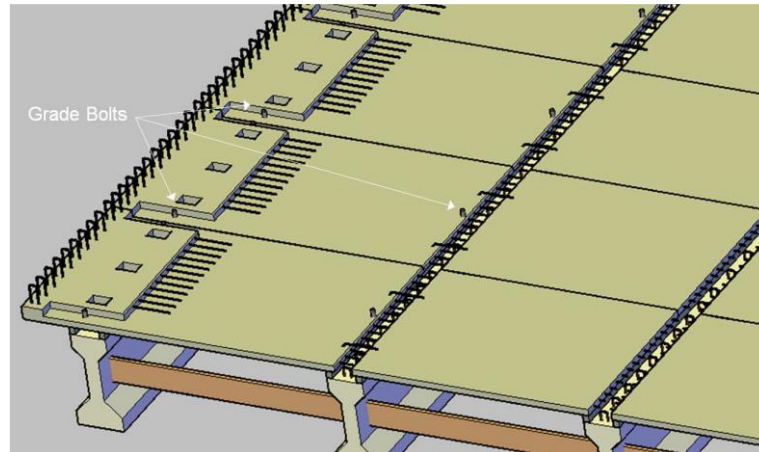


Figura 1.7 Losa con voladizo. Fuente:(Tyler Ley et al., 2010)

1.10 Moldes para la creación de vigas.

Para la creación de las vigas U postesadas se hace necesario la implementación de moldes. La bibliografía consultada no enuncia la metodología a seguir para la concepción de los mismos.

Los moldes a construir pueden estar ubicados a cielo abierto o implementados en una fábrica de elementos de prefabricado, los mismos son de acero. Están conformado por dos elementos cama superior (fig. 1.8) y cama inferior (fig. 1.9).

Según diferentes fotografías observadas, el autor puede deducir que los mismos poseen diferentes elementos, los cuales se pueden tomar como guía para poder elaborarlos.



Figura 1.8 Molde de viga. Cama superior. Fuente (Nickas & Dick, 2015).

En laa fig. 1.8 se observa una cama superior, la cual presenta dos elementos fundamentales que le dan cuerpo y rigidez al molde, las costillas interiores y las láminas de acero.

Estos moldes por su gran tamaño necesitan grúas para su colocación, especialmente la cama superior que es el primer elemento que se retira una vez creada la viga.



Figura 1.9 Molde de viga. Cama inferior. Fuente:(William N. Nickas, 2010)

En el caso de la cama inferior (fig1.9) presenta al igual que la cama superior, costillas laterales exteriores y láminas de acero cumpliendo las mismas funciones que las antes descritas.

1.11 Moldes para la creación de losas.

Para la creación de los moldes para las pre-losas propuestas por el TxDOT no se encontró ninguna metodología ni normativa a seguir en la bibliografía consultada, pues las empresas productoras de moldes especiales no brindan información de la construcción de estos productos, por lo que el autor en los siguientes capítulos analiza la forma de crear los moldes para su posterior desarrollo en nuestro país.

1.12 Actualidad de los puentes postensados en Cuba.

Cuba fue pionera en la construcción de puentes con elementos postensados, ejemplo es el puente de Cuyaguaje con 92 m entre los años 1955 y 1956 en Pinar del Río. Otro exponente es el puente de Bacunayagua con una longitud de 310m entre los años 1956 y 1959 por Luis Sáenz Duplace, proyectista principal, considerado como una de las siete maravillas de la ingeniería civil cubana. En la actualidad nuestro país no está en un lugar cimero con respecto al desarrollo de los puentes de hormigón postensados.

Si insertamos a nuestro país en el contexto mundial, se puede apreciar que en los últimos años ha existido un aumento en los flujos vehiculares a lo largo y ancho del país, dando lugar a que en horas picos las intersecciones no den abasto para el paso de los vehículos. En los próximos años la creación de intersecciones a desnivel y nuevos viales en la isla es inminente sobre todo en áreas donde el desarrollo y la actividad económica florecen. Se puede reflejar como ejemplo la zona de desarrollo del Mariel, intersecciones en ciudad de la Habana, el nudo hacia Varadero y viaducto de Matanzas.

1.13 Implementación de puentes vigas cajón en Matanzas.

Matanzas es conocida como la Atenas de Cuba por su fervor cultural y como la ciudad de los puentes. **San Carlos y San Severino de Matanzas** fue fundada en octubre de 1693 en un sitio privilegiado de la geografía norte de Cuba, entre la desembocadura de los ríos

Yumurí, San Juan y Canímar. Matanzas es la capital de la provincia del mismo nombre. La ciudad de Matanzas alberga una población de 144 447 habitantes según el censo realizado en 2004. ("Matanzas City Athens of Cuba," 2018)

Matanzas está situada bordeando la bahía del mismo nombre, localizada unos 100 km al este de La Habana y 40 km al oeste de Varadero. ("Matanzas City Athens of Cuba," 2018)

Está situada en una región predominantemente llana, su altitud máxima (el Pan de Matanzas) alcanza los 389 metros sobre el nivel del mar (msnm) en las Alturas Habana–Matanzas. ("Matanzas City Athens of Cuba," 2018)

La ciudad está surcada por tres ríos llamados Yumurí, San Juan y Canímar sobre los cuales se han construido una serie de puentes, por lo que a Matanzas también se le conoce como “la ciudad de los puentes”. ("Matanzas City Athens of Cuba," 2018)

Actualmente la ciudad se encuentra en un reordenamiento en diferentes esferas socioeconómicas, como parte de su plan maestro Matanzas 325, donde la vialidad es una de ellas, por lo que el actuar de los ingenieros y arquitectos va dirigido en proporcionar a la ciudad una forma de tránsito más segura y cómoda tanto para los peatones como para tránsito vehicular.

En la urbe matancera se puede apreciar que la conexión entre el centro de la ciudad y la barriada de Versalles es la Vía Blanca, específicamente por el puentes Lacret Morlot (La Concordia) para el transporte automotor, siendo éste uno de los cinco puentes centenarios en la ciudad, además que el mismo no fue construido para soportar los flujos vehiculares actuales. Por esta razón la construcción de otro enlace entre dichos puntos, es una de las tareas urgentes que se plantea en la provincia por parte de diferentes entidades. Para este problema inminente, las soluciones que existen son poco eficientes o el costo de las mismas es muy elevado.

Una nueva solución es la propuesta por el estudiante Junior R. Rodríguez Cepero de 5to año de la Carrera de Ingeniería Civil en la Universidad de Matanzas en su tema de tesis

de grado con el título “Propuesta de continuidad del viaducto de Matanzas” la cual ofrece dar solución a la problemática planteada anteriormente a través de un vial que una estos dos puntos, basándose en la solución existente de continuidad de viaducto en su tercera etapa (fig. 1.10). Esta solución conlleva a que el vial a proyectar posea una curva de un radio de 208m. Por tal motivo el uso de vigas de sección U curvas son una solución para dar solución a dicho problema.



Figura 1.10 Propuesta de continuidad del viaducto de Matanzas. Fuente: Google Earth.

La utilización de vigas U las cuales conforman una sección cajón con la losa de cierre es un recurso factible para este tipo de puentes, pues al analizar esta solución de forma integral se puede apreciar que resulta viable. Cuba al ser una isla, todas sus construcciones y específicamente los puentes están afectadas de forma directa por el salitre, las altas temperaturas y las intensas lluvias, dando por resultado que en un gran porcentaje las construcciones tengan problemas con la corrosión de los aceros y si estas son en su totalidad de dicho material la afectación es mayor, tal es el caso de los puentes en la provincia, los cuales son sometidos a continuas reparaciones por causa de estos elementos ambientales.

Con el uso de las vigas U curvas postensadas la durabilidad de los elementos componentes es mucho mayor, por lo que para su construcción hay que utilizar

hormigones de altas prestaciones y poco permeable, así la penetración de sales en el hormigón es mucho menor, además del rápido montaje de dichos elementos y la disminución de los costos.

Para la construcción de puentes con vigas U curvadas y losas prefabricadas uno de los desafíos fundamentales es la elaboración de sus moldes que por su geometría es compleja su creación.

La concepción geométrica de las secciones de las vigas y las losas a construir a partir de diferentes normativas se presenta en el siguiente capítulo.

Conclusiones Parciales.

Una vez analizado el estado del arte de las vigas U postesadas su evolución e implementación en diferentes proyectos, se puede afirmar que estas vigas pueden ser utilizadas para conformación de diferentes puentes que tengan que desarrollar una curva, pues posibilitan mayor estética, reducción de las vigas a utilizar y una notable disminución del costo del proyecto.

La posibilidad de la modificación en cierto rango de las dimensiones de las pre-losas diseñadas por el Departamento de transporte de Texas, se pueden utilizar para concebir una sección cajón de un puente con vigas U postesadas tanto en tramos curvos como en tramos rectos. Siendo viable la aplicación de esta propuesta en el contexto cubano y en particular de la ciudad de Matanzas.

CAPÍTULO II CONCEPTUALIZACIÓN DE LAS VIGAS U POSTENSADAS CURVAS Y PRE-LOSAS PREFABRICADAS.

En la actualidad Cuba no posee ningún documento que contemple el diseño de vigas U postesadas para la construcción de puentes en curva, por lo que el presente capítulo aborda criterios que se tendrán en cuenta para la conceptualización geométrica de los elementos de la superestructura de un puente, los cuales se basan fundamentalmente en la curvatura, la eficiencia de la sección y la concepción de los moldes para la fabricación de estos elementos.

En diferentes países como Estados Unidos, tiene un gran avance la construcción de los puentes en curva con vigas prefabricadas de hormigón postensado, lo que le permite realizar los elementos con calidad y en un periodo de tiempo relativamente corto. Además los mismos están avalados por diferentes instituciones como PCI, Subcomité de Puentes y Estructuras (SCOBs), TxDOT y CDOT por mencionar algunas. Los procedimientos están recogidos en la AASTHO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS). Además que poseen de forma muy bien estructurada todo los elementos necesarios para la construcción de puentes en curva con vigas U curvadas horizontalmente, recogidos en unas serie de planos por el PCI denominados “PCI Zona 6 Estándar”.

2.1 Concepción de las vigas.

2.1.1 Dimensionamiento.

La construcción de la superestructura del puente consta de dos etapas fundamentales: la construcción y el montaje de las vigas y pre-losas. Estos dos elementos son el eje de la investigación en cuestión.

En las vigas hay dos pasos fundamentales en su construcción, el primero es el tipo de sección a utilizar y el segundo la selección del peralte de la viga.

El primer paso es resolver una sección, por lo que se propone una forma cajón, cuando se habla de esta sección se entiende una unidad de forma trapezoidal, la cual responde a diferentes causas.

El autor considera que una de estas causas es el despegue de las piezas del molde; pues es muy difícil retirar la pieza cuando es de sección ortogonal, la cual sería desde el punto de vista estructural más eficiente al tomar las fuerzas de cortante y al poseer ángulos de noventa grados respecto a sus ejes. Otra de las causas es que este tipo de sección tiene una forma más estética.

Por esta dificultad que presenta la viga de sección rectangular, es necesario practicar una fuga, con un ángulo mínimo sin que esta variación tenga gran influencia en el comportamiento estructural de la viga fig. 2.1.

Al analizar la sección propuesta fig.2.1 se puede observar que trazando dos líneas perpendiculares a la base, se tiene que la mayor cantidad de área queda confinada dentro de esas dos líneas, posibilitando así que las paredes verticales de la sección trabajen de forma similar si se compara con una pared completamente vertical, la excentricidad cae dentro de la base de la sección, esto implica que no hay casi flexión por parte de esta pared respecto a la base de la sección.

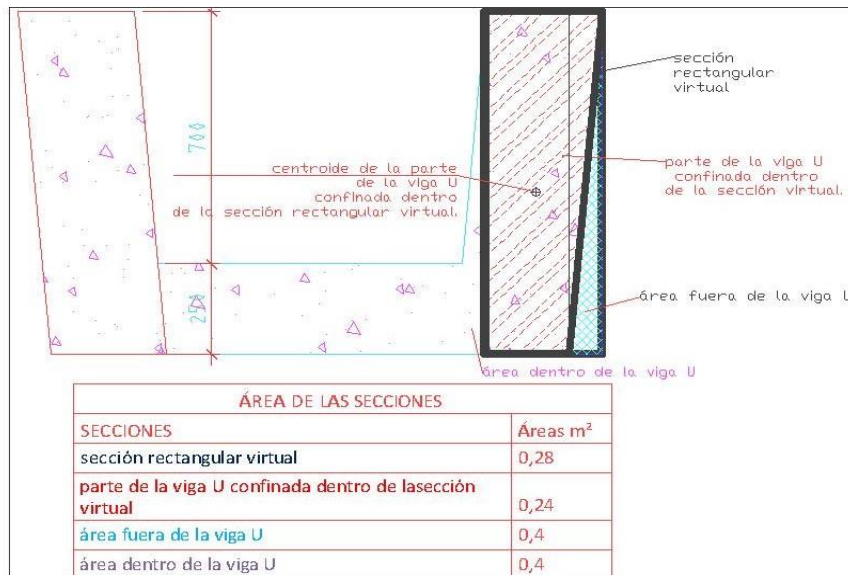


Fig. 2.1 Sección de viga U. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Análisis de estabilidad de la viga con radio constante.

La particularidad que tienen estas vigas curvadas horizontalmente de sección U que se desean construir es que no giran al estar simplemente apoyadas, por lo que el uso de apoyos intermedios en la construcción de puentes no es necesario, la torsión por el peso propio de la misma es mínimo, disminuyendo el uso de diafragmas intermedios. Esto se logra a partir de que el centro de gravedad de la viga no se encuentre a una distancia superior a la permisible del área de apoyo virtual.

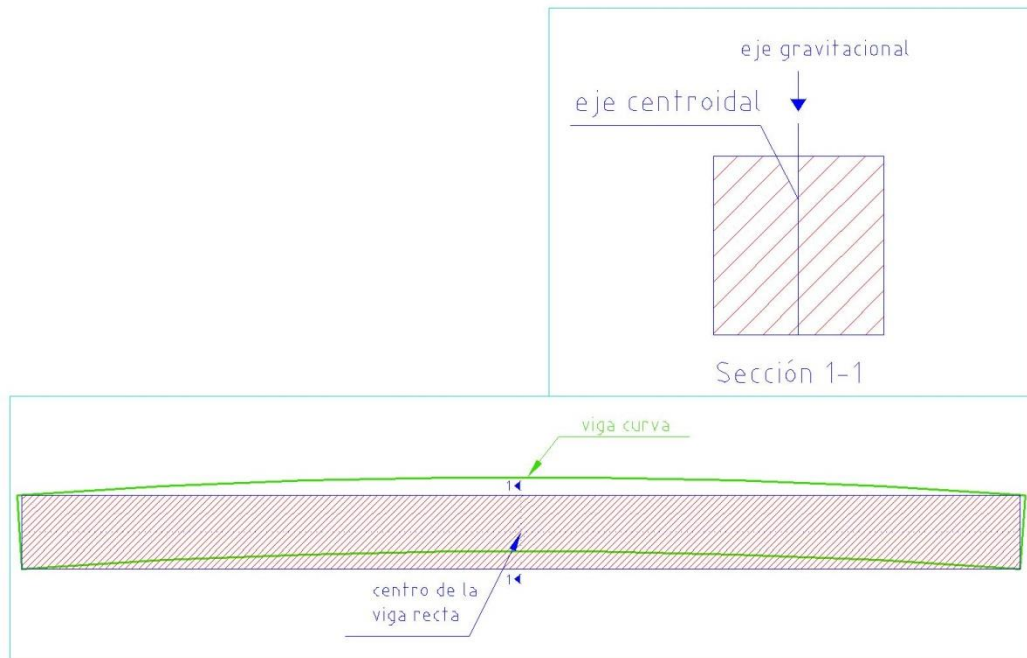


Fig. 2.2 Viga recta. Fuente elaboración propia

Dicho fenómeno no se observa si se toma una viga recta, de sección simétrica, la sección de dicha viga es un rectángulo cuyo centro de gravedad se encuentra dentro de su área de apoyo, al concentrar el peso propio de la viga en su centro, el mismo sería una fuerza centrada en la sección, por lo que su eje centroidal corresponde con su eje de gravedad fig. 2.2.

Este fenómeno sí ocurre en una sección que sea curva, pues el centro de gravedad de la viga curva puede o no estar dentro del área de apoyo de la viga. Esta diferencia entre el centro de gravedad y el eje de la viga puede ocasionar el vuelco cuando se encuentre simplemente apoyada sin soportes intermedio.

Las vigas a diseñar no presentan este fenómeno aunque su eje centroidal de la sección no coincida con el eje de gravedad en el centro de la misma, ya que la curvatura que presentan dichas vigas posibilita que la mayor cantidad de su área se encuentre dentro de su área virtual de apoyo longitudinal (fig. 2.3). De esta forma el centro de gravedad de la viga va a desplazarse dentro de la sección de la misma, posibilitando que la viga no gire cuando esté simplemente apoyada.

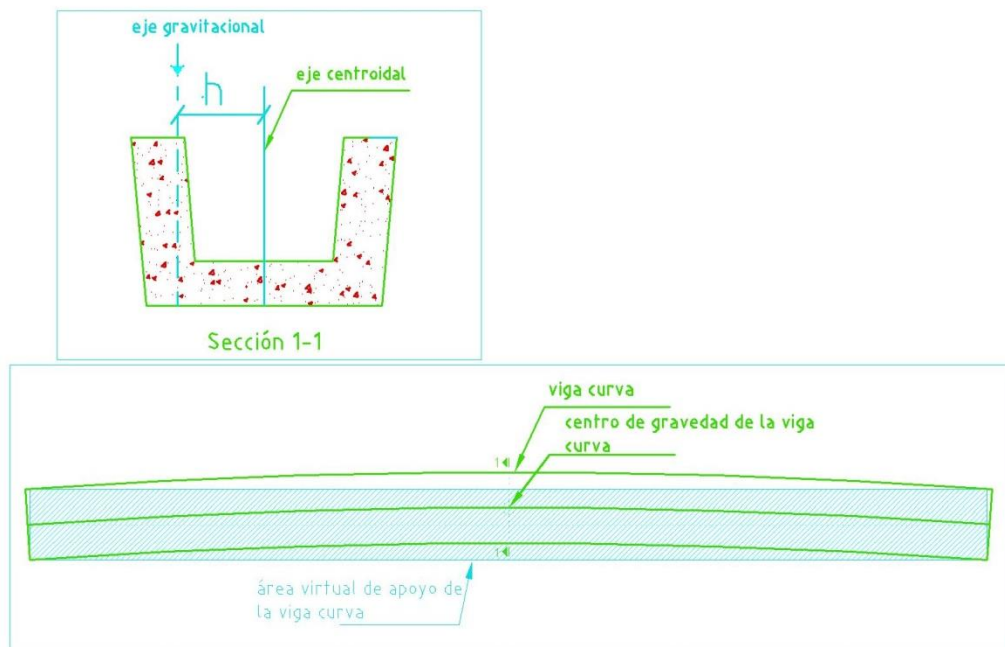


Fig. 2.3 viga curva. Fuente: elaboración propia

Lo demostrado anteriormente se puede expresar de la siguiente manera: la viga es un arco de una circunferencia y su longitud es su cuerda correspondiente (c), la distancia del

centro de gravedad y el punto central de la viga es la altura del segmento circular (h) fig. 2.4.

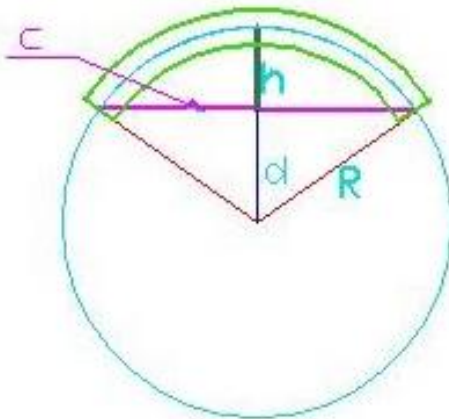


Fig. 2.4 Segmento Circular. Fuente: Elaboración propia

Si se fija la longitud del radio (R) y se varía la longitud de la viga (C), varía también la altura de segmento circular (h), el cual va a ser la distancia entre el eje centroidal y el eje gravitacional utilizando la expresión $c = 2\sqrt{h} \times (2 \times R - h)$.

Por lo planteado anteriormente, para lograr que las vigas sean estables y que el centro gravitacional quede dentro de la sección de la viga, se debe aumentar el radio (R) para que disminuya la altura del segmento circular (h) que es la distancia entre el eje centroidal de la viga y su eje gravitacional.

Para ver la estabilidad de la viga se proponen diferentes radios y longitudes de vigas utilizando la expresión $c = 2\sqrt{h} \times (2 \times R - h)$ en función de c y R.

La ventaja que posee la viga U con respecto a otra sección en curva, es que el centro de gravedad de la viga queda dentro del cajón, por lo tanto no gira al estar simplemente apoyado, pues el centro de gravedad queda dentro del área de apoyo. Por tal razón el primer aspecto es que la viga es estable, observando que la variable a seguir es el radio de curvatura.

2.1.3 Eficiencia de la sección.

La utilización de vigas de sección U postensadas posibilita la reducción de vigas en la superestructura de un puente, facilitando así una disminución de la carga permanente que le llega a la cimentación. Además que la estética aumenta, al disminuir la cantidad de líneas visuales que proporcionaba las vigas I postesadas, las cuales son las más utilizadas para la construcción de puente de viga y losa de hormigón.

Desde que se planteó la forma de viga cajón trapezoidal, el TxDOT decidió usar el método de Guyon, el cual ha sido debatido por diferentes estudiosos del tema Podolny y Muller y, Rabbat y Russell para poder apreciar la eficiencia de la sección de viga. En esencia, el factor de eficiencia se puede expresar como la relación del momento de inercia de la sección dividido por el producto del área y las distancias desde el centroide de la sección a las fibras superiores e inferiores. (Ralls, 1993). Matemáticamente, la ecuación sería:

$$\rho = \frac{I}{Aybyt} = \frac{r^2}{ybyt}$$

Donde,

ρ = factor de eficiencia de la sección

I = momento de inercia de la sección

A = área de la sección

y_b = distancia desde el centro de la sección a la fibra inferior

y_t = distancia desde el centro de la sección a la fibra superior

r = relación de rotación de la sección = $\sqrt{I/A}$

Mientras más alto sea el factor de eficiencia, más eficiente será la sección.

Para este estudio, se tomaron diferentes secciones comparándolas, las cuales se encuentran en la tabla. 2.2, mostrándose los resultados analizados por el TxDOT con lo cual se expresa que mientras más alto es el factor de eficiencia más eficiente será la sección.

Tabla 2.2 Comparación de la eficiencia y el peso de vigas I y vigas U. Fuente: (Ralls, 1993)

Beam type	Efficiency factor	Weight (kips per linear ft)
AASHTO Type IV	0.456	0.82
U54A	0.516	1.07
U54B	0.509	1.17
Texas Type C	0.426	0.52
U40A	0.505	0.92
U40B	0.485	1.02

Note: 1 kip per ft = 0.00148 kg/m.

Al analizar la tabla anterior, se puede observar que las vigas en forma de U por su forma son más pesadas que las vigas I; pero poseen un mayor coeficiente de eficiencia.

Se puede expresar para que una viga en curva posea mayor estabilidad la misma puede ser concebida en forma de U, pues son más eficientes y su base debe estar en correlación con el radio de curvatura que presente la viga.

2.1.4 Peralto de la sección

El segundo elemento a resolver es el peralto de la viga, el cual va a depender de la luz a salvar, estas van en un orden de 20 m a 40 m. Según la AASTHO del 2012 considera que para vigas cajón de sección constante, la relación de peralto y longitud está entre 1/5 y 1/30 y la relación óptima se encuera entre 1/18 y 1/20.

2.1.5 Grosor de paredes.

Un tercer componente es el dimensionamiento de las paredes laterales, observando las secciones de diferentes vigas utilizadas en los Estados Unidos en los planos de “Vigas curvas empalmadas PCI Zona 6” conjuntamente con las especificaciones del “Manual de Diseño de Puentes del PCI”, expresa que las dimensiones de las paredes laterales de las vigas poseen un espesor entre 22,6 cm y 25,4 cm, mientras que la base de la sección posee 22,86 cm.

Por ser esta la primera tentativa de construcción de puentes con viga U en nuestro país, no poseer la misma calidad de los materiales que los existentes en los Estados Unidos, se propone que las paredes laterales posean 30 cm de espesor y la base 25 cm. Se ha tenido en cuenta una vez se calcule área de acero, el recubrimiento que debe tener el elemento dependiendo de la agresividad del lugar.

2.1.6 Diafragmas.

La utilización de diafragmas en puentes de viga y losa es común al aportarles rigidez, posibilitando además la conformación del entablado. Se ubican transversal a las vigas.

En los puentes de hormigón pretensado con vigas curvas cumplen una función fundamental, pues la fuerza radial ejercida por la carga móvil es un factor a considerar a la hora de diseñar un puente con dichas características. En los puentes con viga cajón, al ser éstas curvas, los diafragmas intermedios no van a cubrir toda la sección transversal de la calzada, sino que se encuentran dentro de las vigas, proporcionándole mayor resistencia a la torsión que experimentan dichas vigas.

Según las consultas bibliográficas realizadas por el autor relacionadas con las normas de construcción de puentes descritas en la AASTHO de 1996, la cual expresa que para las vigas de sección cajón curvas con un radio menor de 240m, los diafragmas deben tener un espaciamiento máximo de 24,4 m; mientras que las vigas con radio menor que 121,9m los diafragmas interiores deben estar espaciados a 12,22m. De igual forma en AASTHO del 2012 en la sección 5.13.2.2 expone que a las vigas donde su radio sea menor que 240 m se deberá colocarle diafragmas interiores.

Sobre la base de lo antes expuesto, el autor propone que como es la primera tentativa de construcción de vigas curvas de sección cajón postensadas en el país, la cantidad de diafragmas aumente en 1 respecto a las normativas consultadas, posibilitando una mayor eficiencia de la viga al asumir las diferentes solicitaciones.

2.1.7 Distancia entre vigas.

Las longitudes de las vigas se tomarán de centro de cabezal al centro de cabezal de las pilas (fig. 2.5). Se propone que estas vigas se coloquen en un cabezal de sección rectangular y las vigas sobre aparatos de apoyos.

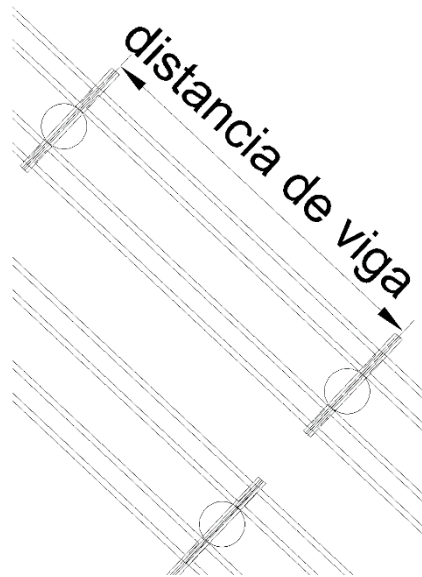
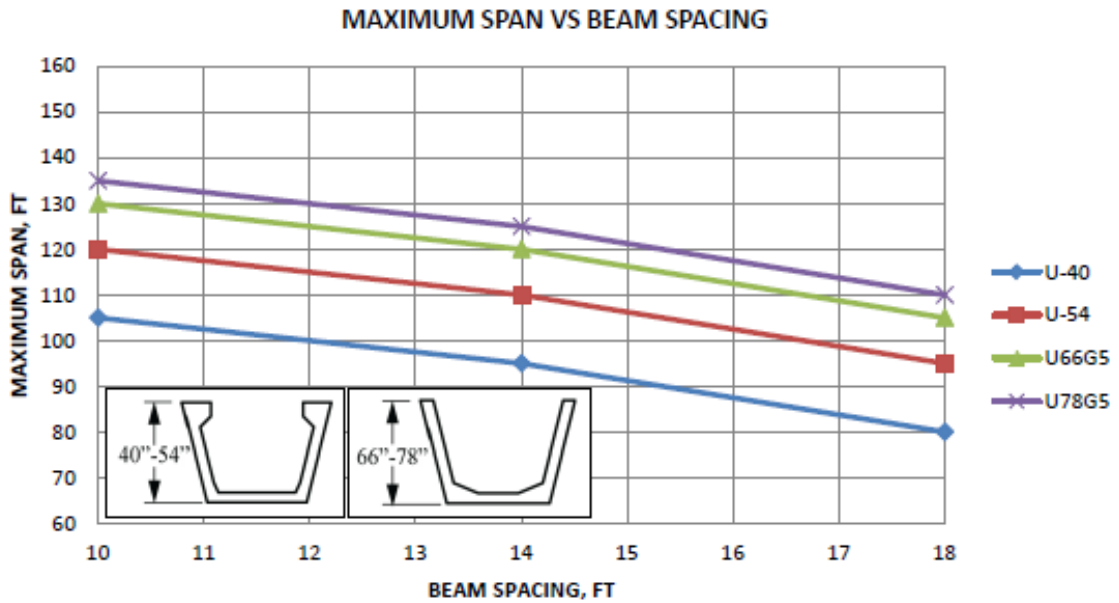


Figura 2.5 Longitud de viga. Fuente: Elaboración propia.

2.1.8 Espaciamiento entre vigas.

Para realizar el espaciamiento de las vigas U en una sección transversal de un puente se utiliza el Manual de Diseño de Puentes del PCI (3ra edición del 2011), el cual posee gráficas (página 6-22 hasta 6-38), donde se intercepta el largo de la viga con su espaciamiento.

En la fig. 2.5 se observan el gráfico referente a diferentes tipos de vigas U, a medida que aumenta la longitud de las vigas disminuyes el espaciamiento entre las mismas.



Nota: Los valores de la gráfica son en pies (ft). 1 ft=0,3 m

Figura. 2.5 Longitud máxima contra espaciamiento máximo. Fuente:(PCI, 2011)

2.1.9 Construcción de la viga.

Una vez que se define la planta y la concepción de la viga, se procede a la segunda etapa del análisis, la construcción de la viga. Esta se puede realizar de dos formas, la primera puede variarse el radio para cada viga, para esto es necesario realizar tantos moldes como viga tenga el proyecto. La segunda es diseñando un solo molde con un mismo radio, permitiendo disminuir o ampliar la longitud para hormigonar las vigas. Se entiende así que la viga más corta iría en la parte interior de la curva y la larga en la parte exterior. Resumiendo estas ideas, se pueden elaborar varios moldes de diferentes radios o con un mismo molde y modificar las dimensiones para obtener las vigas. El autor considera que

la segunda opción es la más viable ya que la ejecución de los moldes es muy costosa y atentaría contra la economía del proyecto.

2.1.10 Transportación.

Otro de los elementos de importancia es la transportación de estos elementos de gran longitud por la carretera, con vehículos especiales, ya que las mismas se ejecutarán en la planta de prefabricado y posteriormente se trasladarán.

Según la Norma Cubana 53-02 de 1986 “Caracterización técnica y características geométricas del trazado directo” se exponen en la tabla No. 4 los diferentes anchos de carril para este tipo de vías, siendo 3 m el más crítico.

Por lo planteado anteriormente, el dimensionamiento de la sección transversal de la viga no debe sobrepasar la normativa anterior.

2.2 Pre-losas.

En la segunda etapa de construcción de la superestructura del puente se encuentra el dimensionamiento y colocación de las pre-losas y hormigonado del tablero.

Las soluciones a emplear para elaborar la superficie que se coloca encima de las vigas son varias para la concepción de puentes de vigas U postensadas en curva, el autor considera que es más factible la utilización de pre-losas prefabricadas, las cuales posean dimensiones viables para su transportación y montaje.

Este rango está dado pues al utilizar una mayor cantidad de losas es más fácil su maniobrabilidad; pero aumenta la cantidad de juntas en el puente, no siendo así si se aumenta las dimensiones de las mismas, aunque al ampliar el área de las losas su peso aumenta, dificultando en cierta medida la facilidad para su posterior desplazamiento.

Para el ancho de las losas se propone un rango de 2 a 4 m de longitud y de 2 a 3 m de ancho. Con este rango propuesto por experiencia en el proyecto del puente sobre el río Toa, la ejecución de los moldes de las pre-losas no presenta ningún inconveniente para su construcción ni transportación.

Estas pre-losas se pueden clasificar en pre-losas interiores y pre-losas exteriores.

2.2.1 Pre-losas interiores.

La cantidad de pre-losas interiores a utilizar varía en dependencia de la cantidad de vigas que posea el puente, la separación entre las mismas y su longitud.

Dentro de las pre-losas interiores existen varios tipos (tabla 2.1), las cuales se utilizan o no dependiendo de la cantidad de vigas que existan en la sección transversal del puente. Las mismas obedecen a diferentes factores para obtener sus dimensiones y formas, se utiliza la herramienta “Matriz de Camino” del *software* “AutoCAD 2017”.

Tabla 2.1 Dimensiones propuestas para tipos de pre-losas. Fuente: Elaboración Propia.

<i>Tipos de pre-losas interiores</i>	<i>Dimensiones</i>	
	<i>ancho</i>	<i>largo</i>
Pre-losas sobre vigas	comprendido entre 2m y 3m	El largo de las pre-losas está dado por la distancia que haya entre las alas de la viga (fig. 2.4).
Pre-losas entre vigas	Cantidad entera de elementos sobre las vigas.	El largo e fijan dependiendo de la separación que haya entre las vigas.

Cuando se desarrolla una curva, las pre-losas tienen forma de sector circular como se muestra en la (fig. 2.6), sus lados más cortos son arcos y su radio depende de la posición y tipo de pre-losa (tabla 2.2).

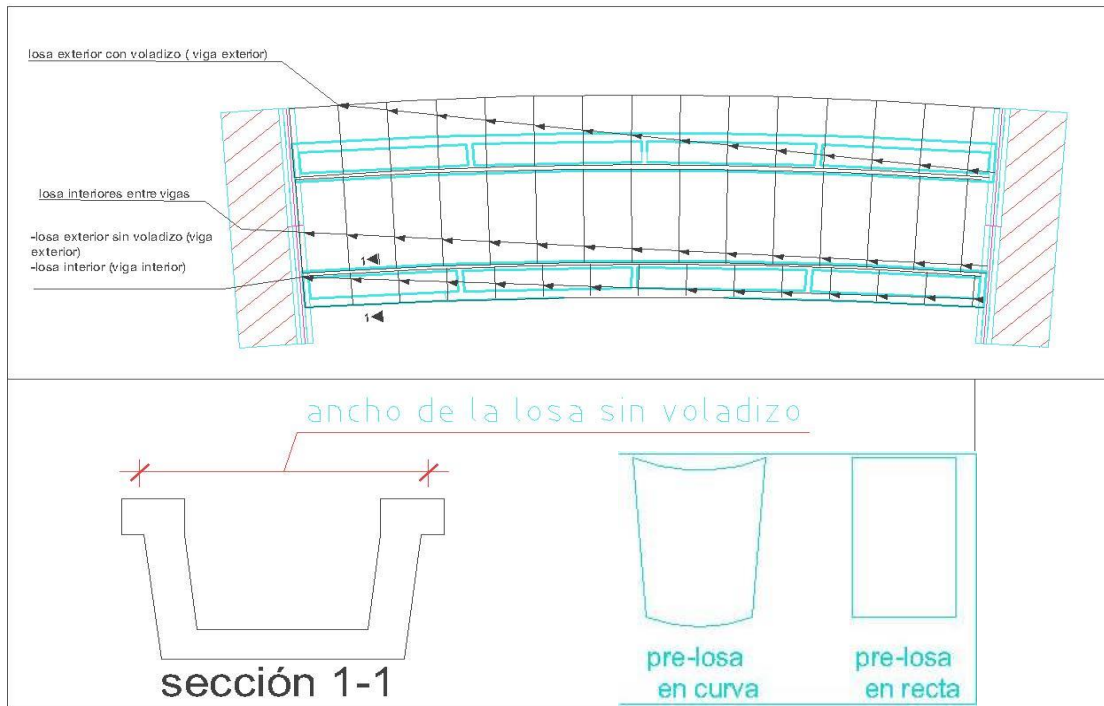


Figura 2.6 Tipo de pre losas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.2 Radios a seguir para tipos de pre-losas interiores. Fuente: Elaboración Propia.

Tipos de pre-losas interiores	Radio a seguir en sus arcos	
	Arco interior (hacia el centro del puente)	Arco exterior (hacia afuera del puente)
Pre-losas sobre vigas exteriores	Radio del eje del vial	Radio más externo del vial.
Pre-losas sobre vigas	Radio del eje del vial	Radio del eje del vial

interiores		
Pre-losas entre vigas	Radio del eje del vial	Radio del eje del vial

Con los radios seleccionados para dicho arco posibilita que la forma de la pre-losa encaje de forma correcta con las otras las cuales poseen estructura similar.

2.2.2 Pre-losas exteriores.

Para lograr un correcto dimensionamiento de estas pre-losas a utilizar, el autor consultó diferentes bibliografías:

- La AASTHO del 2012 en el artículo 3.6.1.3.4—*Deck Overhang Load (Carga del voladizo de la cubierta)* El voladizo debe sobresalir 1,82 m del centro de la viga.
- El Manual de diseño de puentes-LRFD del Departamento de Transporte de Texas (TxDOT) en la sección 3 para vigas U tipo 40 y 54, las cuales presentan características similares a las propuestas por el autor en el Capítulo III. Este Manual expresa que para la construcción de voladizos, la longitud máxima desde el borde del voladizo hasta el borde de la viga es de 119,39 cm.

Según las especificaciones consultadas con anterioridad, el autor toma la del Manual de Diseño de Puentes-LRFD del Departamento de Transporte de Texas, al ser uno de los estados de E.E.U.U que ha fomentado el uso de los puentes de sección U. Además de exponer de forma más específica las dimensiones de longitud para las losas en voladizo.

Las losas de voladizo tendrán un espesor aproximado a los 20 cm en la cara exterior (voladizo) y un espesor de 12 cm en la cara opuesta a este (PATIL, 2005).

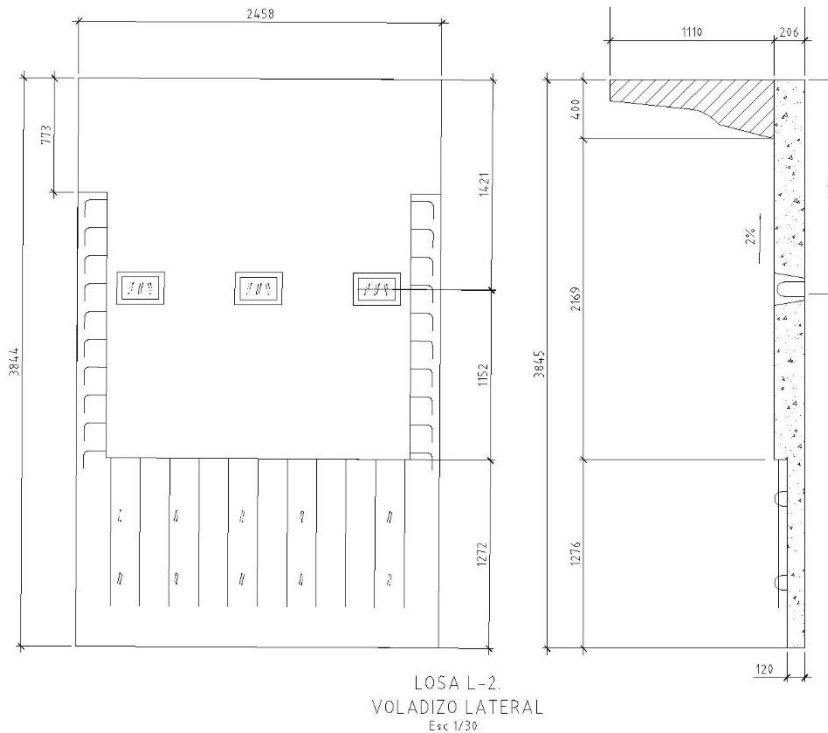


Figura 2.7 Forma de las pre losas exteriores. Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones de estas losas pueden variar en dependencia del ancho de la viga utilizada, oscilando así la posición de las oquedades para las cajas de cortante de dicha losa y el largo de la viga donde se apoyen.

Las pre-losas que conforman el voladizo del puente al estar en curva deben seguir un radio en sus bordes para conformar de forma estética la superficie del vano a construir. Es por ello que las pre-losas mencionadas con anterioridad en sus bordes exteriores, tendrán el mismo radio que el que posee el lado al que se proyecte y su arco opuesto tendrá el radio del eje de la vía.

Para lograr el dimensionamiento del ancho de las pre-losas en curva se procede de igual manera que en las pre-losas interiores.

Partiendo de que las dimensiones del sistema enunciado con anterioridad es variable, posibilita que se ajuste sus anchos para que en el la longitud de vano propuesto contengan un número exacto de losas, como se muestra en la figura 2.6.

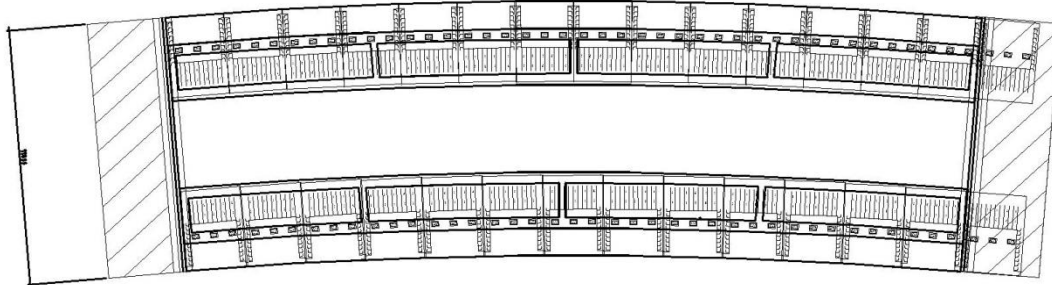


Figura 2.6 Forma de colocación de las pre losas exteriores. Fuente: Elaboración propia

2.3 Moldes.

En la bibliografía consultada no aparece la metodología a seguir para la fabricación de estos elementos. El autor plantea que para la elaboración de la cama superior se puede utilizar elementos de acero como material base, al ser este flexible y resistente.

2.3.1 Cama superior.

Para la creación de la cama superior, la misma debe poseer el área negativa confinada dentro de la sección de la viga. Para lograr la forma deseada se sugiere implementar costillas interiores y planchas de acero.

Para la creación de las costillas se utilizarán perfiles laminados y las planchas de acero con espesor de 4mm. La unión entre estos elementos conformanr el cuerpo de la cama, la cual será soldada.

La separación entre costillas, el autor estima que debe ser aproximadamente a 1m entre costillas y su disposición es radial.

2.3.2 Cama inferior.

La concepción de la cama inferior es similar a la cama superior. La forma de esta cama estará dada por el aspecto que tenga la sección exterior de la viga.

Los parámetros tratados con anterioridad también se aplican para la concepción de la cama inferior, variando solo el espesor de las láminas de acero que serán de 8mm.

2.3.3 Molde de las losas para voladizo.

Para la concepción de los moldes de las losas con voladizo se debe tener en cuenta que esta losa no presenta el mismo espesor en toda su longitud, por lo que la creación de un molde especial para la misma debe concebirse de forma que sus elementos puedan desmontarse para poder extraer la losa completa.

Otro de los aspectos que se debe tener en cuenta es la forma de la losa, pues varía dependiendo si se va a colocar en una viga recta o curva. El molde de la misma tiene que seguir la forma de la viga.

2.3.4 Moldes para pre-losas interiores.

A diferencia de las losas para voladizo del puente, las pre-losas interiores poseen un único espesor por lo que la concepción de su molde es más simple, dependiendo de la forma de la losa, las cuales varían su forma, ya sea si se encuentran en recta o en curva.

Conclusiones Parciales.

Se definió una serie de elementos para la conceptualización geométrica de la superestructura un puente curvo con sección cajón prefabricado utilizando la Norma AASTHO LRFD Bridge Design Specifications y documentos especializados que se rigen por la normativa antes citada.

No se encontró bibliografía referente a la construcción de los moldes para los elementos analizados, por lo que para la conceptualización de los mismos, el autor se basó en la visualización de diferentes imágenes.

Para el dimensionamiento de una viga U curva se deben tener presente diferentes elementos donde lo más importante es: la eficiencia de la sección, el radio de la curva a seguir y la base de la sección de la viga.

La forma, longitudes y cantidades de las pre-losas a utilizar varían en dependencia del largo y la curvatura del puente, no siendo así la longitud de voladizo, la cual esta normada.

Se pudo concebir una serie de elementos para la conceptualización geométrica de la superestructura de un puente curvo con vigas U postensadas.

CAPÍTULO III. IMPLEMENTACIÓN CONCEPTUAL DE SECCIÓN CAJÓN PARA Puentes CURVOS CON VIGAS POSTENSADAS Y PRE-LOSAS PREFABRICADAS.

En Cuba los trazados de puentes curvos postensados se logran con la implementación de vigas rectas formando una poligonal y recreando la curva proyectada sobre dichas vigas, además que no presentan voladizos.

Dos elementos que tienen en su contra estos tipos de puentes son: las dificultades para construir vigas I curvas postensadas y la poca estética de los puentes curvos ejecutados con vigas rectas.

Por lo que la variante de construir vigas curvas en forma de U para concebir una sección cajón con pre-losas prefabricadas es más factible, al posibilitar una solución viable para diferentes puentes curvados horizontalmente que utilicen vigas postensadas en Cuba.

Esta solución es planteada para puentes en curva o intersecciones a desnivel, siendo una propuesta para futuras intersecciones en la Zona de Desarrollo del Mariel y en la creación de un nuevo vial de acceso de la barriada de Versalles a Matanzas, dándole continuidad y terminación al viaducto de Matanzas.

Este capítulo referencia como los análisis realizados en el Capítulo II puede dar solución conceptual a la creación de las vigas U postensadas y las losas pre-fabricadas para conformar una sección cajón y proponerla para la creación de la etapa final del viaducto de la ciudad de Matanzas. Además se conciben conceptualmente los moldes para los elementos en cuestión.

3.1 Implementación de vigas U postensadas curvas en la etapa final del viaducto de Matanzas.

La terminación del viaducto de la ciudad de Matanzas es una tarea pendiente, los proyectos propuestos por diferentes especialistas, no se ajustan a las condiciones actuales.

Con la implementación de las vigas U postensadas se puede conseguir una disminución de la cantidad de dichos elementos a utilizar, los cuales pueden favorecer la reducción del costo del proyecto. Una de las variantes es la del estudiante Junior Rodríguez, la cual se muestra en fig. 3.1, donde el autor del presente trabajo implementa las vigas U postensada.

Al compararla con otras soluciones existentes fig. 3.2, se puede apreciar que la misma es más viable, pues disminuye considerablemente su longitud, la cantidad de apoyos y vigas a utilizar.



Figura 3.1 Variante de etapa final del viaducto Matanzas. Fuente: Yunior Rodríguez.

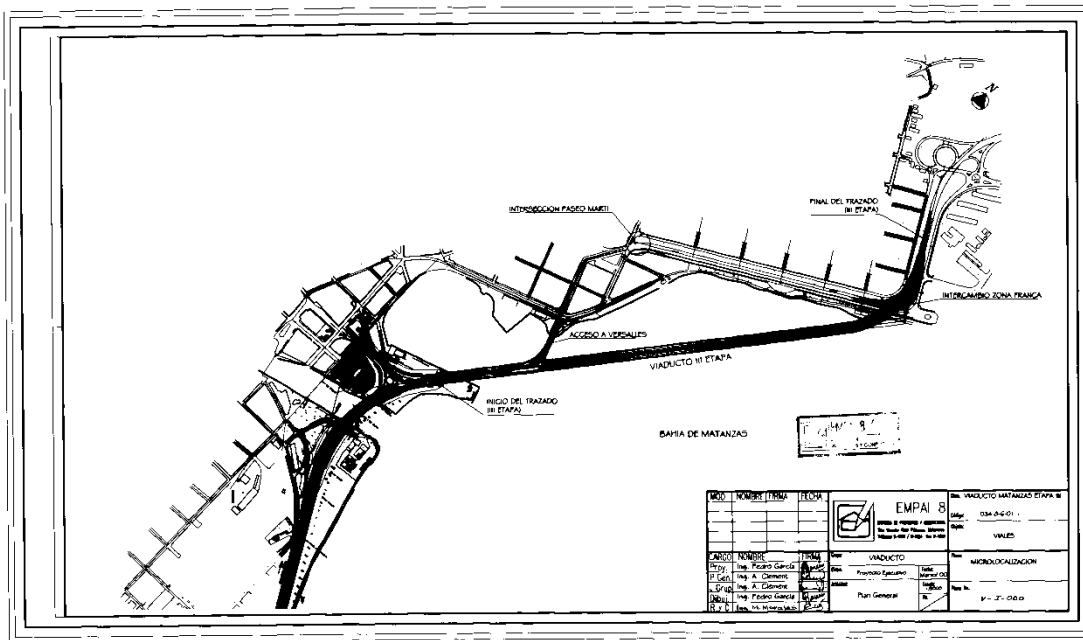


Figura 3.2 Variante de etapa final del viaducto Matanzas. Fuente: EMPAI 2000.

En la variante expresada en la fig. 3.1, el vial posee dos puentes, los cuales presentan curvas con radios diferentes y la posición de sus apoyos a distancias desiguales, como se refleja en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Radio y distancia entre pilotes. Fuente: Elaboración propia

Tramos	Radio (m)	Distancia entre pilas (m)
Curva 1	208.93	31.8
Curva 2	223.93	34.08
Recta	-	31.83

Planteada las longitudes de los elementos que influyen en la concepción de las vigas, el próximo paso es el diseño de las mismas.

Una vez expuesto los diferentes criterios a seguir en el Capítulo II, el autor propone la siguiente forma y dimensiones para una viga U, teniendo en cuenta el dimensionamiento de los diferentes componentes de la viga, el análisis de eficiencia, los resultados del análisis de la estabilidad de la viga y las concepciones que se tuvo para la utilización de las pre-losas.

3.2 Dimensionamiento de la viga.

Para el presente caso, se propone una sección de viga (fig. 3.3) con 1820 mm en la base y 1334 mm de peralte, esta forma responde a los criterios analizados en el Capítulo II respecto a la geometría de la viga, la cual debe ser de forma trapezoidal y no cuadrada para disminuir las tensiones en el momento del desencofre de la viga.

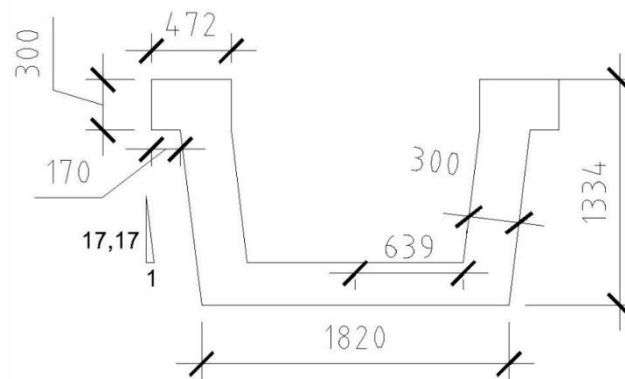


Figura 3.3 Sección de viga U. Fuente: Elaboración propia.

El autor concibe la viga con alas en el borde superior de las paredes laterales, las cuales posibilitan una mayor área de apoyo para las pre-losas y mayor área de hormigón (fig. 3.4), si se compara con una viga en forma cuadrada con la misma base y el mismo espesor en las paredes laterales.

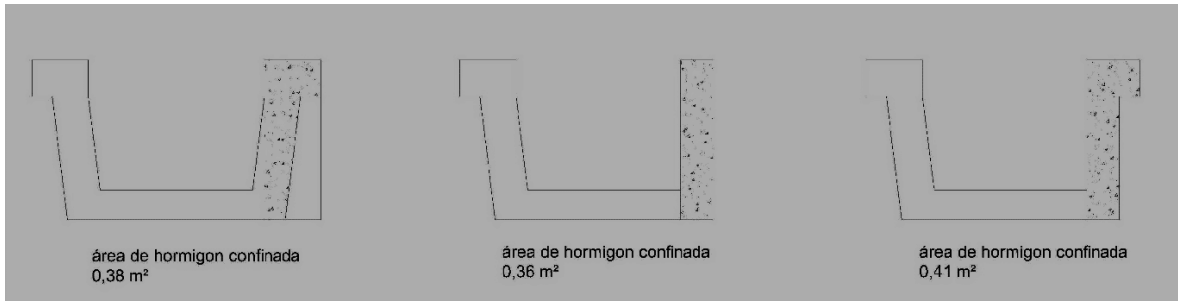


Figura 3.4 Comparación entre formas de paredes de las viga. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Resultados del análisis de la estabilidad de la viga.

Para lograr estabilidad en la viga, se proponen diferentes radios y longitudes de vigas utilizando la expresión $c = 2\sqrt{h} \times (2 \times R - h)$, en función de c y R se puede observar los diferentes valores obtenidos de h , como se muestra en la tabla 3.2.

Considerando un ancho (b) de viga de 1820 mm curva y teniendo en cuenta el criterio de estabilidad anterior, se puede plantear que $h_{max} = b/2$ y aplicando un factor de seguridad de 0,8 se tiene $h_{recomendada} = 0,8 \times b/2$. Al realizar el cálculo $h_{recomendada} = 728$ mm el cual es el tope de la distancia recomendada por el análisis anterior entre el eje gravitacional y el eje centroidal de la sección.

Tabla 3.2 Altura del segmento circular (h). Fuente: Elaboración propia

	(máximo)	(recomendado)			
	h=0,91	h=0,728			
C	R	h	C	R	h
15	200	0,14	26	200	0,42
16	200	0,16	27	200	0,46
17	200	0,18	28	200	0,49
18	200	0,2	29	200	0,53
19	200	0,23	30	200	0,56
20	200	0,25	31	208	0,58
21	200	0,28	32	210	0,61
22	200	0,3	33	220	0,62
23	200	0,33	34	223	0,65

24	200	0,36	35	223	0,69
25	200	0,39			

C-cuerda (longitud de la viga) R-radio h –altura del segmento circular (distancia entre eje centroidal y el eje gravitacional)

Al analizar el resultado de la tabla 3.2 se puede expresar (h) es inversamente proporcional al radio, siempre que se mantenga la longitud de la viga (c) y se aumenta el radio de la viga. Se observa que fijando un radio y variando la longitud de la viga, se obtiene diferentes valores de h, los cuales se encuentran en el rango recomendado. ($0,91 < h < 0,728$).

Lo anterior facilita la selección del radio en dependencia de la longitud de la viga con los datos ya predeterminados, siendo un resultado factible para la construcción de los elementos.

Esta evaluación posee una desventaja, pues puede utilizarse solo con un radio constante, cuando varia esta condición no es factible la utilización de dicho procedimiento para el análisis de las vigas. Aunque para la concepción de los viales de esta índole, dígase puentes o intersecciones a desnivel en curvas, éstas son en su mayoría curvas circulares simples para poder lograr una mayor comodidad en la construcción de sus elementos.

3.2.2 Eficiencia de la sección.

Se utilizó el software Autodesk Robot Structural Analysis 2018 para buscar las características geométricas necesarias para implementarlas en la expresión de la eficiencia de la sección.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.3 Características geométricas de la sección. Fuente: Elaboración propia

Área	Inercia	Distancia desde el eje centroidal hacia el tope	Distancia desde el eje centroidal hacia la base de la sección (yb)	Eficiencia de la sección. $\rho = \frac{I}{Aybyt}$
------	---------	-------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------

		de la sección (yt)		
14081,62 cm ²	86883552,79 cm ⁴	62,9 cm	71,3 cm	1,39

Nota: Se analizó la eficiencia de la viga con sus dimensiones en pulgadas.

Si se compara con la sección de vigas U54A (ver tabla 2.2 Capítulo II) la cual tiene una eficiencia de sección de 0,54, se observa que la sección de la viga propuesta posee mayor eficiencia que la antes planteada, por lo que su uso puede ser factible para el proyecto propuesto.

3.2.3 Peralto de la sección.

Según la AASTHO LRFD Bridge Design Specifications del 2012, la relación de peralto y longitud de la viga de sección U se encuentra entre 1/5 a 1/30, siendo óptima entre 1/18 a 1/20.

Con las dimensiones entre pilote del proyecto de 31,8 m y 34,08 m en recta y curva respectivamente, un peralto de 1,33 m, se obtiene para las relaciones de peralto/largo 0,04 y 0,039, las cuales se encuentran entre el rango óptimo, como se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Relación peralto/altura. Fuente: Elaboración propia

AASTHO		Distancia entre pilotes (m)		Peralto de sección (m)		
Relación Peralto/largo	Relación Peralto/largo óptimo	Recta	Curva	(h)	Relación Peralto/largo de la viga	
1/5 a 1/30	1/18 a 1/20	31	34	1.33	Recta	Curva
0.2 a 0.033	0.05 a 0.033				0.04	0.039

Para predimensionar la sección, se debe tener en cuenta el espesor total de la solución de pre-losa seleccionada (fig. 3.5 a). Se eligió este peralto en concordancia con el que se propuso en la propuesta diseñada por la EMPAI (fig. 3.5 b). La dimensión a tomar no debe sobrepasar 1,6 m, al impedir una correcta visual hacia la bahía de la ciudad.

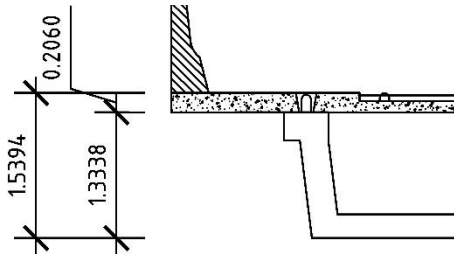


Figura 3.5a Sección de la superestructura.
Fuente: Elaboración propia.

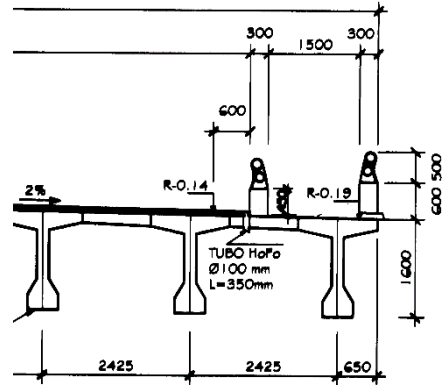


Figura 3.5b Sección de la superestructura.
Fuente: EMPAI 2000

3.2.4 Grosor de paredes.

Según el epígrafe (2.1.5) se toman las especificaciones propuestas para el predimensionamiento de la viga cuya sección se muestra en la fig. 3.3.

3.2.5 Longitud de las vigas

En la conceptualización del proyecto, se observa la construcción de dos puentes. Según la variante tomada para realizar la conceptualización geométrica de la superestructura de los puentes con sección cajón prefabricado, la longitud de las vigas en la parte curva de los mismos son diferentes, pues al aumentar el radio y tener una distancia única entre pilotes, aumenta la distancia de las vigas, estas longitudes son mostradas en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Dimensiones de las vigas en curva. Fuente: Elaboración propia.

	Radio (m)	Longitud Viga interior (m)	Longitud Viga exterior (m)

Curva 1(C1)	208.93	31.8	32.3
Curva 2(C2)	223.93	34.57	33.63

Esta variante (fig. 3.1) posee un tramo en recta donde las vigas de los puentes tienen una longitud de 31.8 m.

La tabla 3.5 resume la cantidad total de vigas para salvar las luces entre las pilas.

Tabla 3.5 Cantidad de vigas por tramos

<i>Cantidad de vigas</i>			
Recta	Curva 1(C1) vigas interiores	Curva 2(C2) vigas exteriores	total
16	8	8	32

3.2.6 Espaciamiento entre vigas.

Con la utilización de las vigas U, se logra el principal objetivo que es disminuir la cantidad de vigas a utilizar en la superestructura del puente. Para logra esta máxima y un espaciamiento óptimo, el autor se basa en los elemento de la fig. 2.5.

La sección de la viga planteada por el autor posee 1.33 m de peralto y las vigas U 54 son de 1,37m, teniendo peraltos similares se realizó una interpolación para obtener la separación entre las vigas. Con 34 m de longitud y 1,33 m de peralto se arribó a la conclusión que las vigas pueden estar separadas a 4,27 m del centro de la viga al centro de la sección transversal de la vía.

Para la sección transversal propuesta de 11m, la separación de las vigas concebidas es menor que las obtenidas a través de la interpolación, por lo que las vigas pueden ser concebidas para utilizarlas en la sección transversal de los puentes. Lo anterior se refleja en la (fig. 3.6).

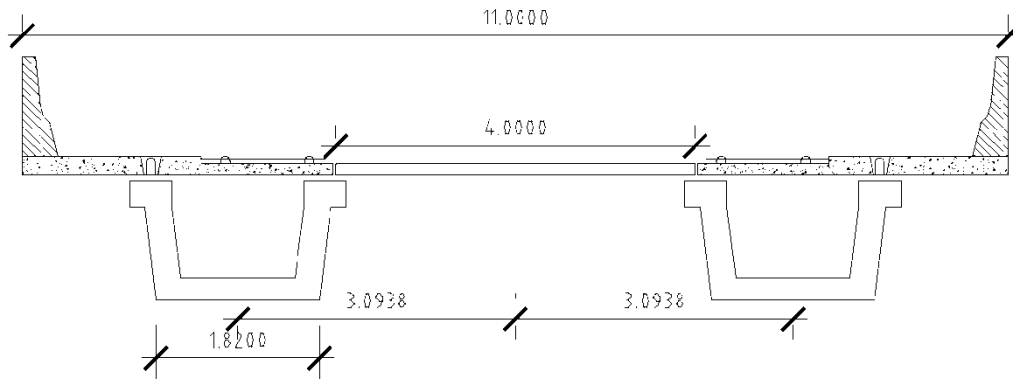
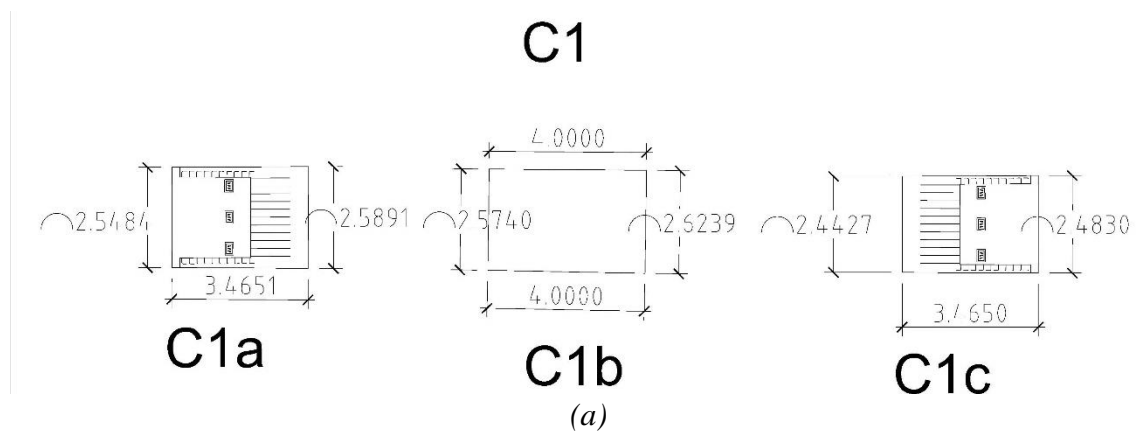
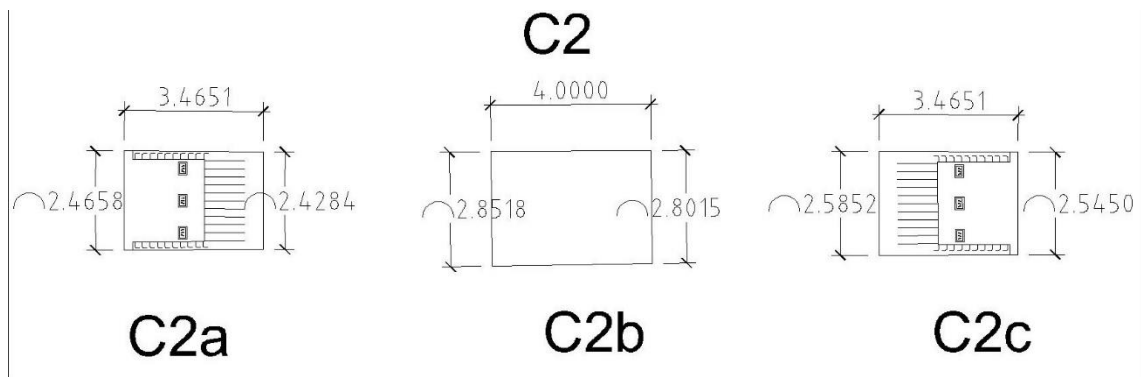


Figura 3.6 sección de puente con viga U. Fuente: Elaboración propia

3.3 Concepción de las pre-losas

Como consecuencia de que existen dos puentes con diferentes radios en sus curvas y cada uno con dos vigas y longitudes entre los estribos diferentes, se presentan las dimensiones de las pre-losas exteriores e interiores de cada puente en la figura 3.7.





(b)

Figura 3.7 Dimensiones de las pre-losas exteriores e interiores de los puentes. (a) puente con radio 208 y (b) puente con radio 223. Fuente: Elaboración propia

Las pre-losas interiores tanto en curva como en recta poseen el mismo espesor inferior que presentan las pre-losas para voladizo.

Para la parte del vial que se encuentra en recta, las dimensiones de los elementos para puente son las mismas, las cuales se presentan en la (fig. 3.8).

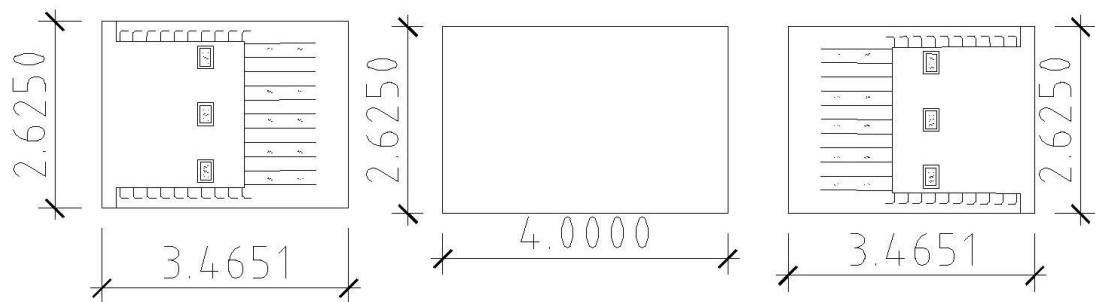


Figura 3.8. Dimensiones de las pre-losas exteriores e interiores en recta. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en las figuras anteriores (fig. 3.7) y (fig. 3.8) difiere la forma de las pre-losas, ya que en la parte curva las mismas poseen una forma de sector circular y en la parte recta forma rectangular.

Por lo planteado en el Capítulo II, las pre-losas exteriores en su borde externo siguen un radio dado (R) y en el borde interno poseen el radio del vial de la viga, mientras que la pre-losa interior el arco que presenta esta dado por el radio del vial. Lo anterior planteado se expresa en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Radios a seguir por las pre-losas. Fuente: Elaboración propia.

<i>Puente C1</i>	<i>Borde interior</i>	<i>Borde exterior</i>
C1a	R-208,93	R-202,73
C1b	R-208,93	R-208,93
C1c	R-208,93	R-213,73
<i>Puente C2</i>		
C2a	R-223,93	R-219,14
C2b	R-223,93	R-223,93
C2c	R-223,93	R-230,14

Según las dimensiones dadas, la tabla 3.6 expresa la cantidad de pre-losas a concebir para dichos puentes.

Tabla 3.6 Cantidad de pre-losas

<i>Elementos</i>	<i>Cantidad por vanos</i>	<i>Cantidades totales</i>
C1a	12	48
C1b	12	48
C1c	13	52
C2a	13	52
C2b	12	48

C2c	14	56	
Ra	12	48	
Rb	12	48	
Rc	12	48	<i>Total de elementos (pre-losas)</i>
			448

La creación de elementos de hormigón prefabricados es imposible sin un molde previo, el cual le da la forma deseada para su posterior utilización.

3.4 Concepción de los moldes.

Las diferentes bibliografías consultadas no expresan soluciones para la construcción de los moldes de los elementos tratados con anterioridad. Se expone de forma empírica la concepción de los mismos en los siguientes sub epígrafes.

3.4.1 Construcción de los moldes de las vigas.

Las combinaciones que se pueden realizar para lograr diferentes longitudes de vigas son varios, Como este proyecto consta de dos puentes y varía las dimensiones y radio, se hace necesario concebir al menos 3 moldes: uno para las vigas rectas y dos para las vigas curvas.

Estos dispondrán de dos elementos, la cama inferior con láminas de 8mm de espesor y la cama superior con láminas de 4mm de espesor, los cuales posibilitarán dar forma a la sección.

Para la curvatura deseada de los moldes, se debe utilizar equipos de topografía con el objetivo del correcto replanteo de la curva. En el trazado, se realizarán estaciones de aproximadamente de 1 m, siendo estas las guías de las costillas interiores y exteriores.

Para cubrir la pared inferior y laterales de las camas, se utilizarán planchas de acero, sus dimensiones en la parte inferior estarán dadas por el ancho de la base inferior de la

sección de la viga y en el caso de la cama superior por el ancho de la sección de la viga, restándole el espesor de las paredes laterales. El largo de las planchas para la bases de las camas se fija por la separación de las costillas.

Dichas planchas, para su unión son soldadas, rebajando el excedente de soldadura para que pueda quedar una cama lisa, proporcionando así una buena terminación del elemento.

3.4.1.1 Cama inferior.

La cama inferior en su conjunto estará compuesta por costillas laterales, plancha de acero base, planchas de acero laterales, elementos de sujeción entre las costillas, elementos base de fijación con la cama superior y elementos de cierre. La descripción de estos elementos se muestra en la fig. 3.9.

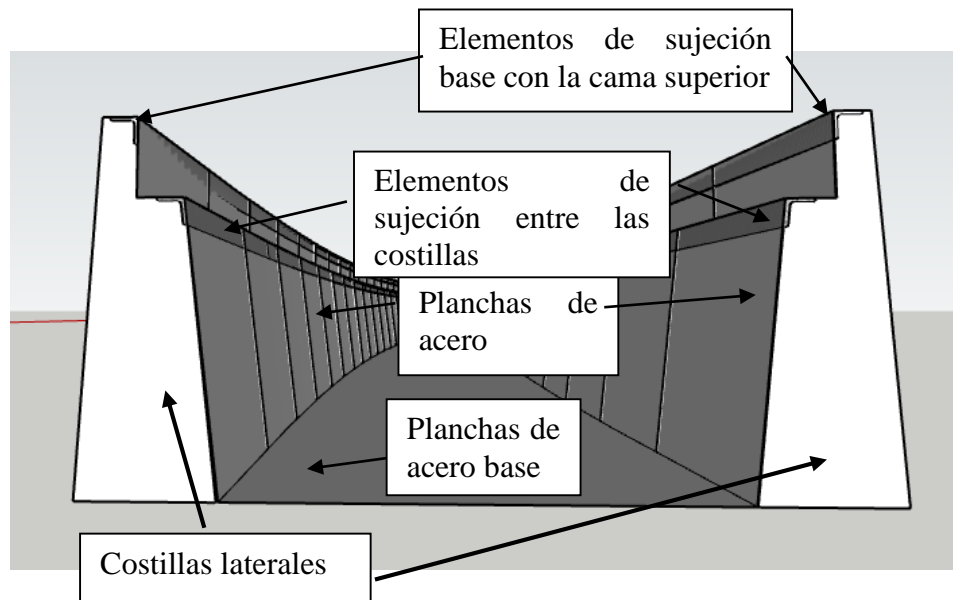


Figura 3.9 Elementos de la cama inferior. Fuente: Elaboración propia

Para conformar la superficie de la cama las dimensiones de las planchas a utilizar están dadas de la siguiente forma:

- El ancho de las planchas que conforman la base es igual a la distancia que tiene la base de la sección de la viga.
- El largo es la distancia que hay entre las pestañas.
- La altura es la distancia que existe desde la base hasta la parte inferior del ala de la viga.

Para conformar la parte correspondiente al molde del ala se utilizan los mismos criterios de ancho anteriormente planteado. El largo y la altura van a estar dados por las dimensiones que presente este elemento en el proyecto. (consultar Anexo No. 1)

La base de los moldes de las vigas U estará conformada por una losa de hormigón armado, la cual posibilita que no presente deformaciones la cama inferior. Para la conformación de las paredes de dicha cama se utilizarán planchas de acero.

La rigidez de la cama se sustentará por costillas laterales a ambos lados. Las mismas actúan igual que un muro de contención, las cuales restringen las deformaciones en las caras laterales del molde.

Estos elementos rigidizadores posibilitan la unión de las planchas, serán de láminas de 8mm de grosor, la altura será fijada por la viga a construir, las dimensiones de estos elementos se precisan en el Anexo No. 1.

Las costillas laterales poseen un ángulo de inclinación respecto a su eje horizontal, fijado por la fuga de la pared lateral de la viga para lograr la forma trapezoidal.

La unión de las costillas con la plancha base y las planchas laterales serán por soldadura. Para rigidizar las costillas, se coloca un elemento que va de costilla a costilla en la parte inferior de las alas del molde. El elemento que rigidiza las costillas, será un perfil “L” (fig. 3.10) ya que se adapta a la posición donde se va a estacionar.

Para darle el cierre final a la cama inferior, una vez que esté colocada la cama superior, se sitúa un elemento de cierre, el cual se presenta en la fig. 3.10.

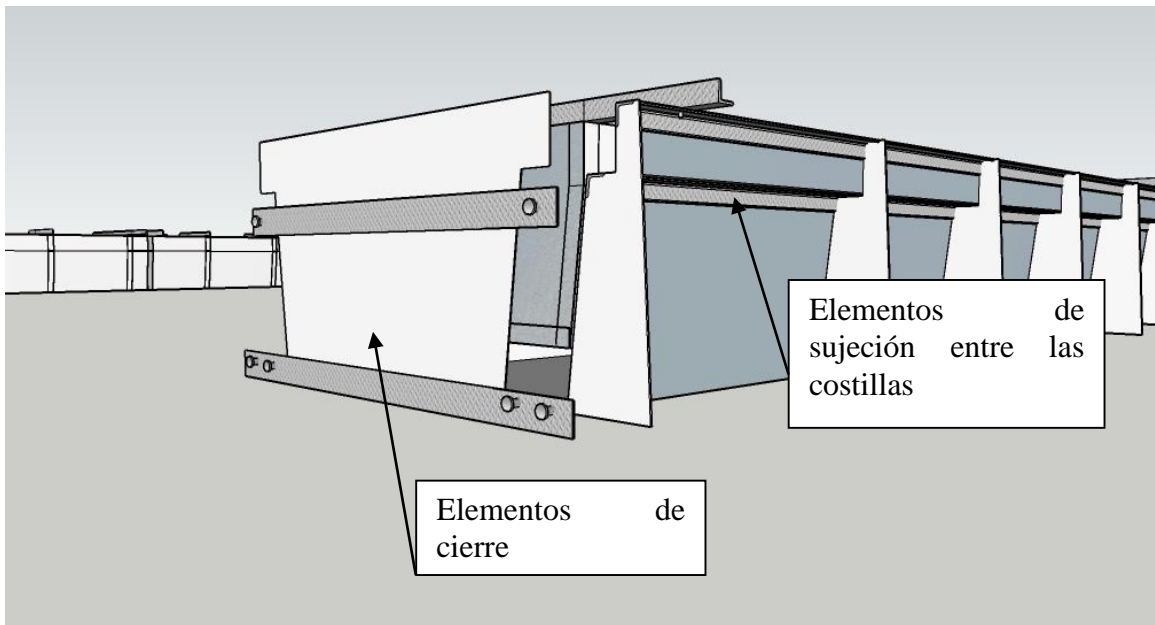


Fig. 3.10 Elementos de cama inferior. Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2 Cama Superior.

La cama superior está conformada por planchas de acero de 4 mm de grosor, elementos de cierre y costillas interiores y costillas exteriores (fig. 3.11).

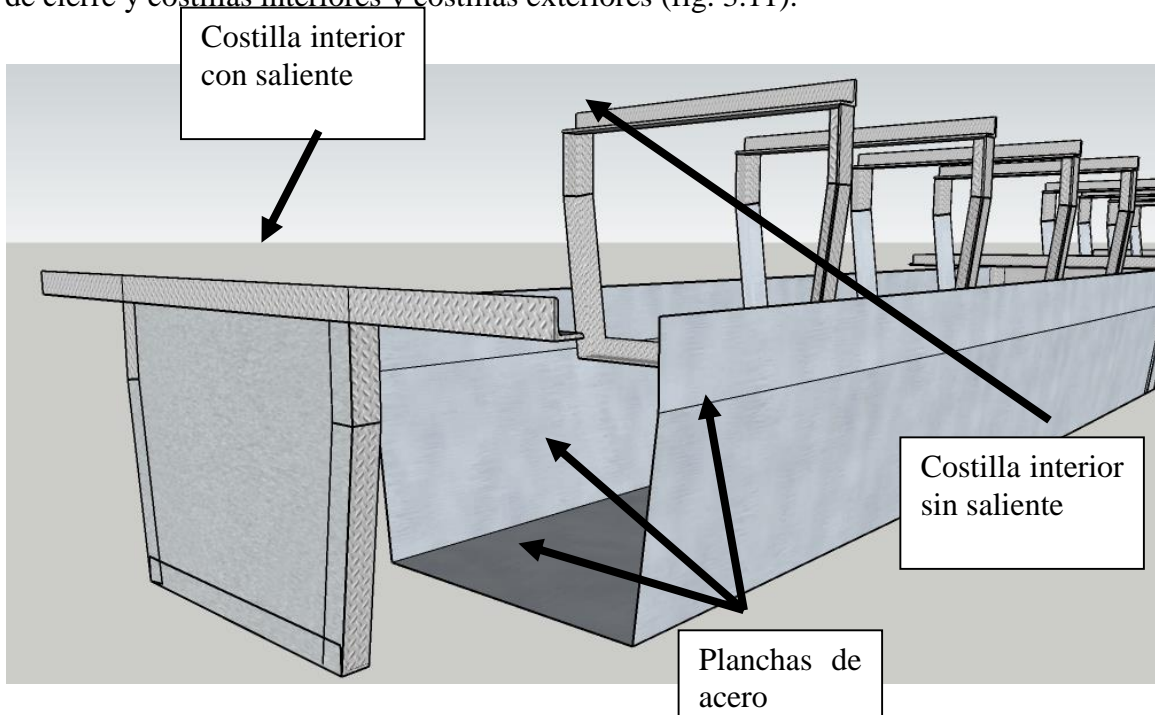


Figura 3.11 Elementos cama superior. Fuente Elaboración propia.

Las costillas interiores sin salientes, estarán adosadas a las láminas de la cama superior a través de soldaduras. Estos elementos de sujeción hacen la misma función que las costillas exteriores de la cama inferior, las cuales ayudan a su rigidez. Los elementos utilizados para conformar el esqueleto de las costillas interiores son perfiles “L”, (fig. 3.12).

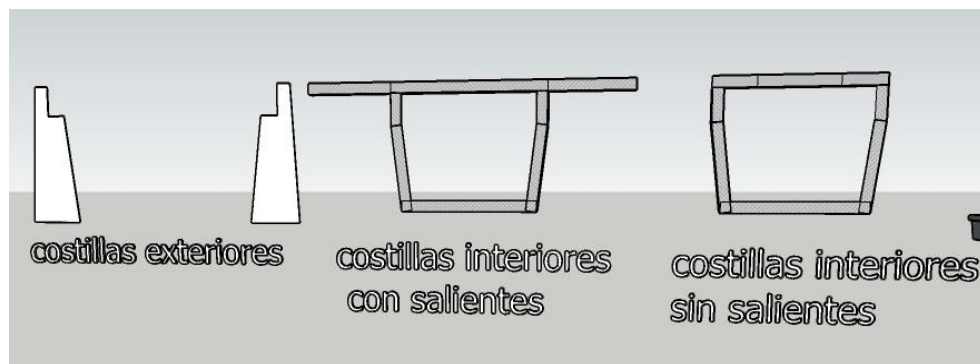


Fig. 3.12 Costillas interiores y exteriores. Fuente: Elaboración propia

Para posibilitar los diafragmas, las camas superiores poseen láminas de acero en sus dos laterales, unidos por soldadura a las costillas interiores con salientes.

Una vez posicionada la cama superior sobre la inferior se utilizan elementos rigidizadores (fig. 3.13) para impedir el movimiento de la misma cuando se vierta el hormigón en la conformación de la viga.

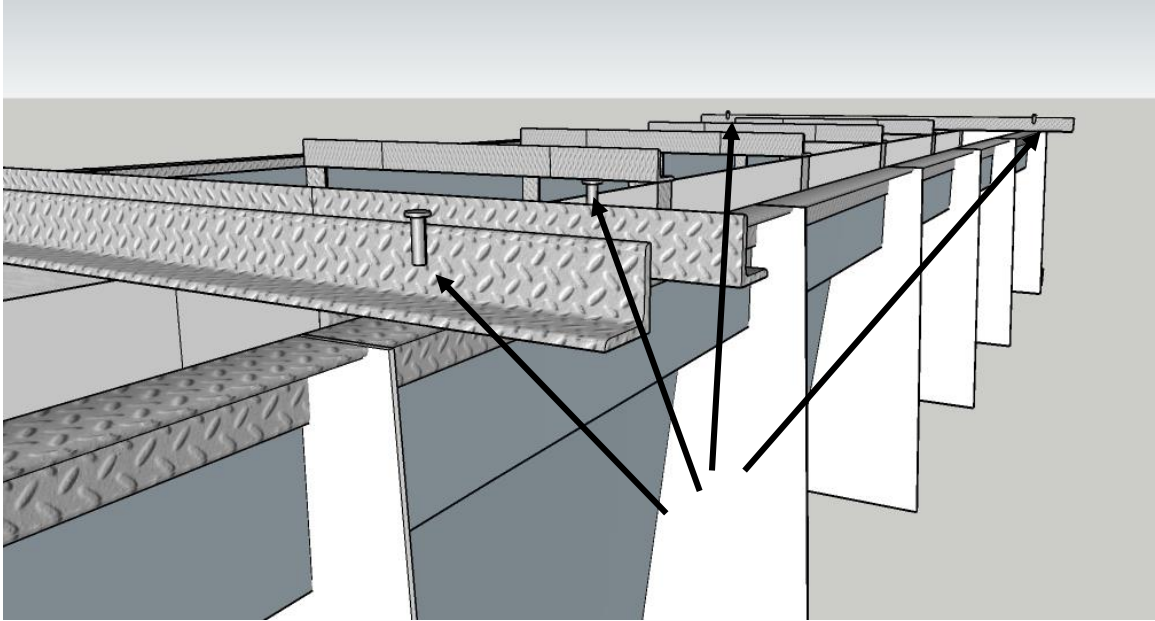


Figura 3.13 Elementos rigidizadores entre las camas de las vigas. Elaboración propia

La disposición de estas costillas (fig. 3.14), tanto en la cama inferior como en la superior, será de forma radial, exceptuando las que dan el cierre a las diferentes camas superiores para conformar los diafragmas. Estas son concebidas de forma tal que puedan proporcionar un espaciamiento entre las camas de 30 cm, para lograr los diafragmas en las vigas curvas.

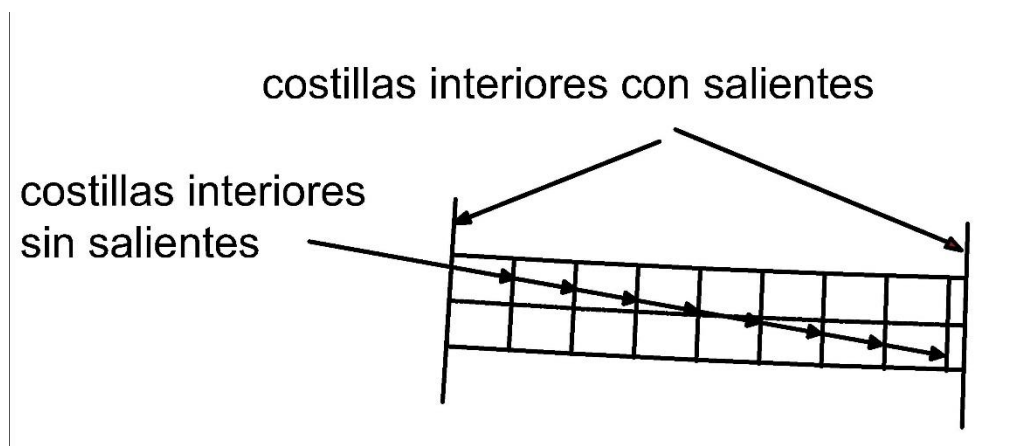


Figura 3.14 Vista en planta de moldes. Fuente: Elaboración propia

En ese caso, la cama superior no será continua, pues las vigas presentan diafragmas en su diseño, por lo que dichas camas serán separadas, la misma estará dada por el espesor normado de los diafragmas.

La fig. 3.15 presenta la distribución de las camas superiores, las camas (C1) son utilizadas en todas las vigas a construir las cuales presentan las mismas dimensiones. El resto de las camas (C2 – C4) disminuyen su longitud para poder concebir que las restantes vigas posean una longitud menor.

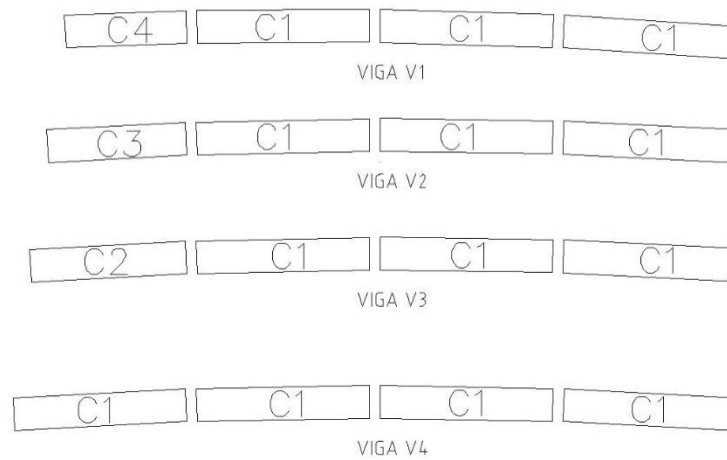


Fig. 3.15 Camas superiores. Fuente elaboración propia

Las dimensiones de las camas concebidas para las vigas de los puentes se observan en el Anexo No. 1.

Las vigas que poseen forma recta su concepción es similar, lo único que varía es la no utilización de diafragmas, por tanto la cama superior es continua y posee para su sujeción con la cama inferior, cinco costillas interiores con salientes (fig. 3.16)

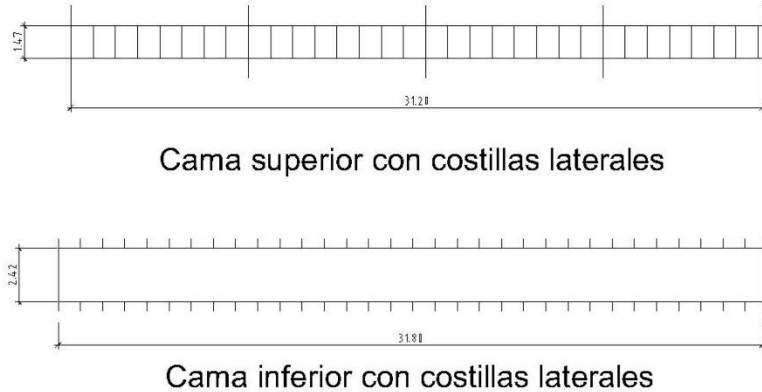


Figura 3.16 Cama inferior y superior para viga recta. Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones de las camas para vigas rectas se contemplan en el Anexo No.1

Concebido el dimensionamiento de las camas para las vigas, se hace necesario la conceptualización de los moldes para las diferentes losas a utilizar.

3.4.2 Construcción de los moldes de losa.

La construcción de los moldes varía en dependencia de las longitudes de las losas. La ejecución de los moldes están concebidos con planchas de 4 mm, perfiles Canal y “L”.

3.4.2.1 Moldes losas con voladizo (exteriores).

En la creación de voladizos en estos puentes, se tomó el sistema híbrido elaborado por el TxDOT, el cual posee diferentes espesores de losa. Para su concepción, el molde posee: plancha de acero base, elementos laterales y cubos, los cuales posibilitan la creación de las cajas para los conectores de cortante.

Las láminas de acero que posibilitan el cierre del molde poseen una curvatura dada por radio que siguen las pre-losas para la conformación del voladizo, los cuales se pueden observar en el Anexo No.1.

Para construir todas las pre-losas que forman el voladizo del puente, se hace necesario la concepción de cuatro moldes a partir de las variaciones de las dimensiones de las pre-losas en la parte curva de los puentes.

El hormigonado de las losas son en un solo paso, independientemente que posean un espesor variable, por lo que estos moldes son desmontables para poder ejercer esta tarea (fig. 3.17).

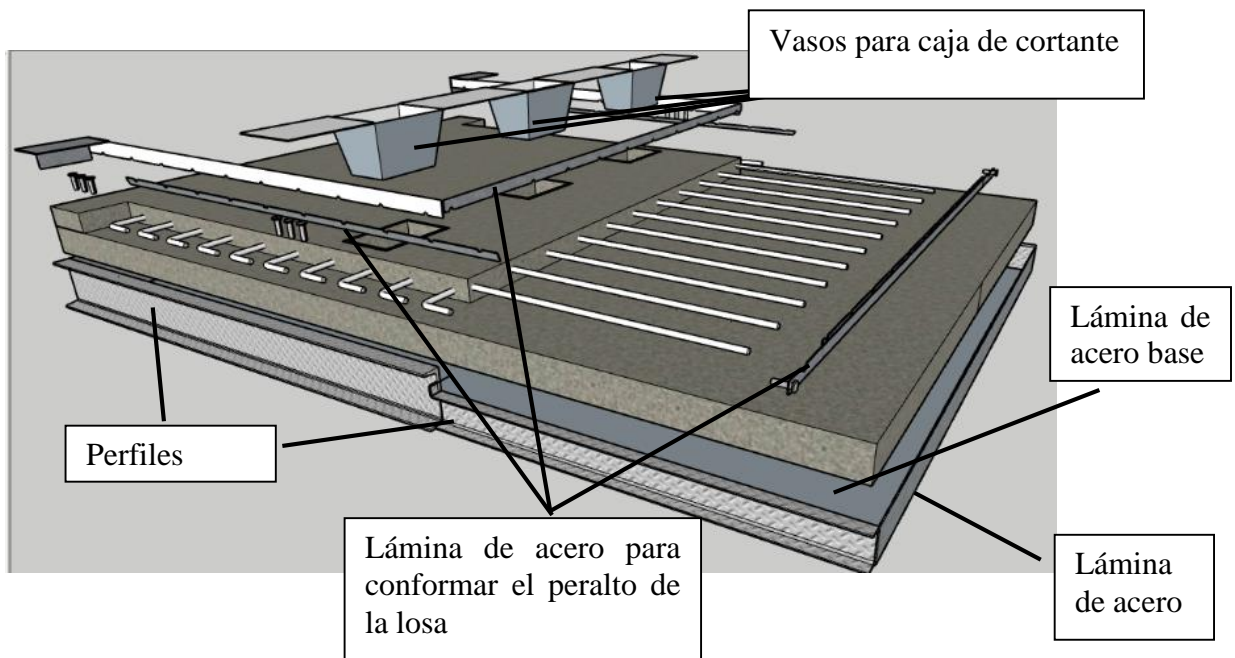


Figura 3.17 Molde para losa de voladizo elementos componentes. Fuente: Elaboración propia.

Este molde presenta diferentes elementos para concebir la losa, como son:

- perfiles canal de diferentes tamaños, los cuales forman parte del marco del molde. Ellos proporcionan el espesor de la losa.
- Láminas de acero que son dobladas para lograr el radio requerido en los extremos de las losas, los cuales conforman el marco del molde.

- Los vasos permiten la creación de las cajas de cortante, estos están unidos por planchas de acero y se fijan a los perfiles adyacentes con elementos rigidizadores.
- Láminas de acero, las cuales facilitan darle a la losa la sección variable, estas poseen oquedades para los aceros de las pre-losa y elementos rigidizadores, los cuales permiten ajustar todos los elementos y conformar el molde.

En las losas rectas con un solo molde es suficiente al no variar sus dimensiones. Estos se conciben de igual forma que los moldes anteriores, sólo que el marco es de forma rectangular. Las medidas del molde están regidas por las dimensiones de las losas expresadas en el Anexo No.1.

3.4.2.2 Moldes losas sin voladizo (interiores).

La creación de los moldes para las losas intermedias posee una lámina de acero base y elementos laterales (fig. 3.18) los cuales pueden ser perfiles de acero para dar forma al mismo y una altura igual a la de la pre-losa a concebir, con el propósito de aportar el nivel requerido de la misma. Sus longitudes varían en dependencia de las áreas de las losas, las que poseen un espesor constante igual al espesor inferior de la pre-losa de voladizo. (Consultar fig. 3.6)

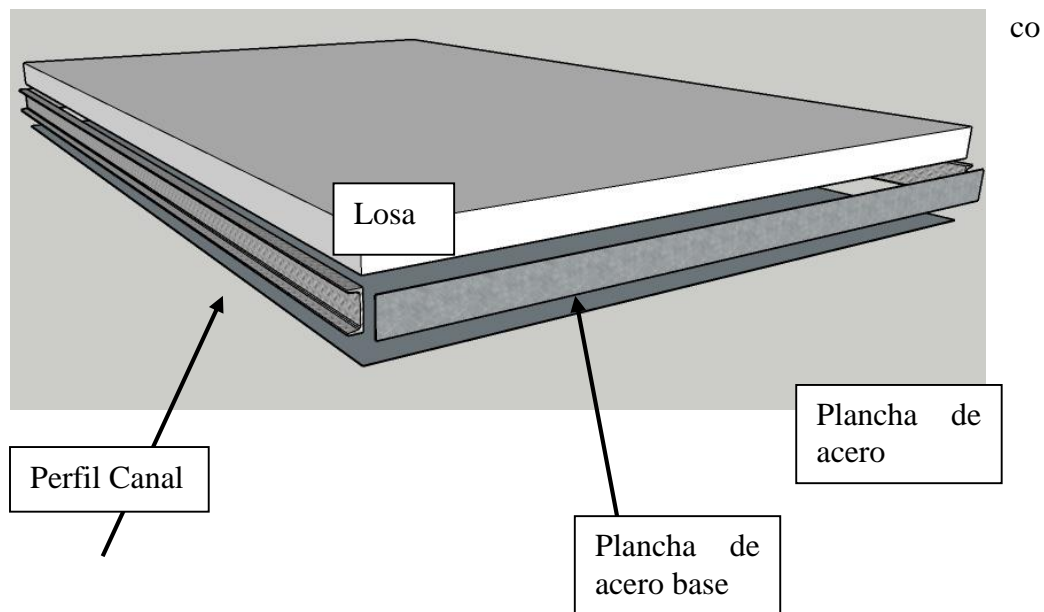


Figura 3.18 Molde para losa sin voladizo. Elementos componentes. Fuente: Elaboración propia.

Se proponen tres moldes para estas pre-losas: dos para la parte curva y uno para la parte recta del proyecto. Las medidas del molde están regidas por las dimensiones de las losas, las cuales se muestran en el Anexo No.1.

Conclusiones Parciales.

Se concibió geoméricamente una propuesta de vigas U postesadas y pre-losas prefabricadas para implementarla en la continuidad y terminación del viaducto de Matanzas, sustentado en los elementos analizados en el Capítulo II.

Se elaboró de forma virtual los moldes para las pre-losas y vigas propuestas, lo que proporciona una primera idea para su construcción.

CONCLUSIONES

1. Se analizó el estado del arte de las vigas U postesadas, las cuales brindan mayor estética y rapidez de construcción, así como una disminución del costo y del número de vigas a utilizar para concebir una sección transversal de un puente.
2. Para la creación de la sección cajón con viga U postesada se utilizó la norma AASTHO LRFD Bridge Design Specifications y para la concepción de las pre-losa prefabricada con voladizo, se escogió el prototipo desarrollado por el Departamento de Transporte de Texas.
3. Se realizó un procedimiento de concepción de las vigas U postensadas para la construcción de puentes que desarrollen una curva con radio continuo, donde los principales elementos de análisis fueron: el radio de la curva y la base del elemento; procedimiento que se implementó conceptualmente en la propuesta del estudiante Junior R. Rodríguez Cepero de continuación y terminación de viaducto de la ciudad de Matanzas.
4. Se desarrolló la forma de concebir los moldes para los diferentes elementos tratados en el presente trabajo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a la EMPAI seguir indagando acerca del desarrollo de vigas U postensadas para su implementación en el país.
2. Proponer a la EMPAI realizar una herramienta para el cálculo del área de acero de las vigas U postensadas con los aspectos tratados en este trabajo para así proporcionar una estructura de trabajo con estas vigas.
3. Proponer a la Universidad de Matanzas continuar realizando investigaciones que permita profundizar en las formas de trabajo de las vigas U postensadas, utilizando herramientas computacionales.

BIBLIOGRAFÍA

<http://megaconstrucciones.net> [Online].

<http://www.ingenierocivilinfo.com> [Online].

http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/lrf/prestressed_concrete_u_beams_types_u40_and_u54.htm.

<http://www.fdot.gov>

<http://www.matanzascity.org/>.

<http://www.ecured.cu>

ANDERSON, B. & NICKAS, W. PCI Spliced Curved U Girders. 2015.

ANTIGUA, J. G. P. 2017. Folleto para la asignatura de Puentes y Alcantarillas en la carrera de ingeniería Civil en la Universidad de Matanzas., Universidad de Matanzas.

BAYRAK, S. P. C. A. O. 2008. BRIDGE DECK OVERHANG CONSTRUCTION. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN.

CATHERINE HOVELL, A. A., ANDREW MOORE, DAVID DUNKMAN, OGUZHAN BAYRAK, AND JAMES JIRSA 2012. Structural Performance of Texas U-Beams at Prestress Transfer and Under Shear-Critical Loads. Texas Department of Transportation.

CHARLES D. NEWHOUSE, S. A. B., W. R. BURKETT, PHILLIP T. NASH, MOSTAFA EL-SHAMI 2009. Proposed Modifications to the LRFD Design of U-Beam Bearings. Texas Tech University.

COSCO, L. A. J. 2014. Proceso constructivo del viaducto de viga cajón postensada de sección variable de tres luces en el cruce Av. Santa Rosa. Universidad Nacional de Ingeniería

FIECHTL, A. L., FENVES, G. L. & FRANK, K. H. 1987. APPROXIMATE ANALYSIS OF HORIZONTALLY CURVED GIRDER

GREGG A. REESE, P. E., PRESIDENT, SUMMIT ENGINEERING GROUP, I. & COMPANY, M. A. M. Development of the Concept in Colorado New Penn DOT U Girder Standards Case Study –JT Butler Expressway, Jacksonville, FL. 2017.

HEREDIA, R. D. 1995. Dirección Integrada de Proyecto-DIP-"Project Management".

INSTITUTE, P. P. C. Spliced U-Girders Typical Bridge Cross Sections PCI Zone 6 (SE Region) U-Girders. In: PCI (ed.).

JOSÉ CALAVERA, A. D. C., DAVID FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ , ANTONELLO GASPERI , JORGE LEY , FRITZ MÖNNIG , PIERRE PASSEMAN , C. QUARTEL , LADISLAV SASEK , GEORGE TOOTELL , ARNOLD VAN ACKER 2004. Precast concrete bridges. International Federation for Structural Concrete.

M.ITANI, A. & L.RENO, M. 2000. Horizontally Curved Bridges.

MAHER K. TADROS, P. E., PH.D. & VRANEK, C. Past, Present and Future of Precast Prestressed Concrete Bridges in the U.S. First Brazilian Meeting on Integration of Research-Design-Production in the Field of Precast Concrete, University of Nebraska

MENTEROLA, J. 1984. Evolución de los puentes en la historia reciente Informes de Construcción 36.

MICHAEL L. MCMULLEN, J. I. E., AND MARK A. LEONARD, COLORADO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION 2008. Long-Span Precast U-Girders in Colorado. PCI

MISH, A. 2018. Southbound Interstate 95 to Eastbound State Road 202 (J. Turner Butler Boulevard) Flyover Bridge. ASPIRE.

MONDEJAR, A. D. 2017. SOLUCIÓN CONCEPTUAL DE INTERSECCIÓN A DESNIVEL TIPO ROTONDA ELEVADA EN EL NUDO DE ENTRADA A VARADERO., Universidad de Matanzas.

NCHRP 2009. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM SYNTHESIS 393.

NICKAS, W. N. & DICK, J. S. 2015. SHARING NEW TECHNOLOGY THROUGH PCI BRIDGE TECHNOQUESTS. ASPIER.

OTERO, A. V. 2010. Puentes.

PATIL, S. R. 2005. DEVELOPMENT OF PRECAST BRIDGE DECK OVERHANG SYSTEM. Shivaji University.

PCI 2011. BRIDGE DESIGN MANUAL 3rd Edition, First Release, November 2011.

PIELSTICK, B. H. & INC., E. R. 2015. Overview of the 2012 ASBI Durability Survey. ASPIRE.

RALLS, M. L., YBANEZ, L. & PANAK, J. J. 1993. The New Texas U-Beam bridges: An aesthetic and economical design solution. PCI

SALMONS, J. R. & KAGAY, W. J. 1971. The composite U-beam bridge superstructure. PCI.

SAMEH S. BADIE, P. D., P.E.; MOUNIR R. KAMEL PH.D., P.E.; MAHER K. TADROS, PH.D., P.E. 1999. Precast Pretensioned Trapezoidal Box Beam for Short Span Bridges. PCI.

STELMACK, T. W., DAVIDSON, T. E., FORARS, K. & PARSONS 2016. SR 417 and Boggy Creek Road Interchange. ASPIRE.

TOMÉ, J. T. 2017. PROPUESTAS DE MEJORAS DEL PROCESO TECNOLÓGICO DE PRODUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS PREFABRICADOS POSTENSADO EN LA PLANTA DE PREFABRICADO DE JOVELLANOS., Universidad de Matanzas.

TRANSPORTATION, A. A. O. S. H. A. 2012. AASTHO LRFD BRIDGE Design specifications.

TRANSPORTATION, T. D. O. 2009. Bridge Design Manual - LRFD.

TYLER LEY, P. D., GHASHGESH, M. & PATIL, S. 2010. Investigations of a Precast Bridge Deck System. Oklahoma Transportation Center.

VASQUEZ, D. A. A. & ALDANA, R. M. H. 2004. Manual de construcción de puentes de concreto. Universidad de El Salvador.

WILLIAM N. NICKAS, P. E. Development of Spliced Precast U Beam Bridge Construction. 2010 Orlando, Florida.

YEN LEI VOO, P. C. A., THOMAS A. J. THAMBOE 2012. DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 50M SINGLE SPAN ULTRAHIGH PERFORMANCE DUCTILE CONCRETE COMPOSITE ROAD BRIDGE. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM) and Concrete Society of Malaysia (CSM).

ANEXOS

Anexo No. 1 Plano Concepción de vigas U. (Ver carpeta de anexos)