



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE PUENTES ABC EN CARRETERAS URBANAS EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOAQUÍN ANDRÉS MORALES MUNITA

PROFESOR GUÍA:

JOSE LUIS SEGUEL RAMIREZ

MIEMBROS DE LA COMISION:

RUBEN BOROSCHEK KRAUSKOPF

MATIAS VALENZUELA SAAVEDRA

SANTIAGO DE CHILE

2023

Resumen.

En los últimos años Chile ha presentado un desarrollo sustancial en las ciudades y actividades que toman lugar en estas, con esto la urbanización ha aumentado generando zonas de importancia en donde una intervención en la ruta es crítica y en ocasiones no viable. Es por esto que se estudia una metodología de construcción de puentes, desde el punto de vista del diseño estructural, que permite minimizar los tiempos de proyecto y por consiguiente la interferencia en las rutas en la construcción de puentes, la metodología de puentes ABC.

Los puentes ABC se definen como aquellos métodos constructivos de puentes en los cuales se usa la combinación más eficiente de innovación, planeación, diseño, materiales y técnicas constructivas para disminuir significativamente los impactos de la construcción.

Mediante el estudio de normativa extranjera se estudian técnicas de diseño de estos puentes. Principalmente se basan en elementos prefabricados los cuales requieren conexiones que cumplan con las exigencias de diseño y aseguren un comportamiento monolítico. Se estudian principalmente las conexiones entre el tablero prefabricado con las vigas prefabricadas, conexión pilote con columna prefabricada, conexión columna prefabricada con cabezal prefabricado y conexión columna prefabricada con zapata de fundación.

En base a lo anterior y considerando los requerimientos de diseño de Chile, se diseña un puente ya existente, Puente San Pablo Antiguo, con esta metodología para luego comparar los resultados obtenidos con los del puente construido con metodología convencional. Para esto se utilizan planillas de Excel y el programa de diseño estructural SAP 2000. También se realiza un estudio en base a supuestos del tiempo de construcción de ambas metodologías.

Luego de la comparación de resultados se obtiene que el puente con diseño ABC tiene un costo superior al con metodología convencional debido a que se genera un aumento en las dimensiones de los elementos por las exigencias de las conexiones. Con respecto al tiempo de construcción se obtiene que, para el caso específico, el puente disminuye su tiempo de construcción en terreno por lo que se considera que el estudio realizado cumple con el objetivo de presentar una nueva alternativa para la construcción de puentes en situaciones donde el tiempo de construcción en terreno o la interferencia de la ruta son críticos.

1. Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivo General.....	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Alcance.....	2
1.5 Metodología.....	2
2. Características de Puentes con Metodología Convencional y ABC.....	3
2.1 Definición de puente.....	3
2.2 Características de los Puentes Chilenos por Estudiar.....	4
2.3 Puentes de Construcción Convencional.....	5
2.4 Accelerated Bridge Construction (ABC).....	7
2.4.1 Beneficios de puentes ABC.....	9
2.4.2 Ejemplos de metodologías de puentes ABC en Chile, Latinoamérica y el mundo....	10
3. Normas y Códigos de Diseño para Puentes.....	15
3.1 Manual de Carreteras Volumen 5. Ministerio de Obras Públicas (2018).....	15
3.1.1 Regulaciones del Tránsito Usuario.....	15
3.1.2 Desarmes y/o Demolición de Puentes Existentes.....	15
3.1.3 Pavimento para Puentes.....	16
3.1.4 Impermeabilización de Tableros de Puentes.....	16
3.1.5 Acero para Armaduras y Alta Resistencia.....	16
3.1.6 Moldajes.....	16
3.1.7 Vigas Hormigón Armado, Vigas Pretensadas y Vigas Postensadas.....	17
3.1.8 Juntas de Dilatación en Puentes y Estructuras Afines.....	17
3.1.9 Anclajes Antisísmicos.....	17
3.1.10 Suministros y Colocación de Sistemas de Apoyos Elatoméricos para Puentes.....	17
3.1.11 Losas de Acceso.....	18
3.1.12 Drenaje en Puentes y Estructuras.....	18
3.1.13 Barreras y Barandas en Puentes.....	18
3.2 Manual de Carreteras Capitulo 3.1000. Ministerio de Obras Públicas (2018).....	18
3.2.1 Aspectos Generales de Diseño.....	19
3.2.1.1 Secciones Transversales Tipo Puente.....	19
3.2.1.2 Cargas.....	19
3.2.1.3 Fundaciones.....	19

3.2.1.4	Hormigón Armado.....	20
3.2.1.5	Hormigón Pretensado.	20
3.2.2	Diseño Sísmico.....	20
3.2.2.1	Métodos de análisis.....	21
3.2.2.2	Factores de Modificación de Respuesta (R).	21
3.2.2.3	Limitaciones del Esfuerzo de Corte Basal.....	21
3.2.2.4	Criterio de Combinación para las Fuerzas Sísmicas Ortogonales.	22
3.2.2.5	Largo Mínimo de Apoyo.	22
3.2.2.6	Puentes de un Tramo.	22
3.2.2.7	Fuerzas Modificadas de Diseño.....	22
3.2.2.8	Definiciones de Diseño de Hormigón Armado.	23
3.2.2.9	Vigas Travesaño en Superestructura.....	23
3.2.2.10	Barras de Anclaje.....	23
3.2.2.11	Topes Transversales.	23
3.2.2.12	Juntas Sísmicas.	24
3.3	Caltrans ABC Manual. Federal Highway Administration(2021).	24
3.3.1	Plan, Tolerancias y Control Geométrico.....	24
3.3.2	Cargas y Factores de Carga.....	25
3.3.3	Condiciones de Carga Provisionales.....	25
3.3.4	Apoyos Temporales.	25
3.3.5	Presencia de Servicios.	25
3.3.6	Capacidad de Carga de Estructuras Existentes.	26
3.3.7	Materiales.	26
3.3.7.1	Hormigón Liviano.	26
3.3.7.2	Hormigón de Resistencia Acelerada (RSC).	26
3.3.7.3	Hormigón de Ultra Desempeño (UHPC).....	27
3.3.8	Elementos Prefabricados de Puentes ABC.	27
3.4	Comentarios análisis bibliográfico.	28
4.	Consideraciones generales para el Diseño de Puentes ABC de acuerdo con la Normativa Extranjera.	29
4.1	Estados Límites.....	29
4.2	Cargas y Combinaciones de Cargas.....	29
4.2.1	Estado Límite de Servicio.	29

4.2.2	Estado Límite de Fatiga y Fractura.	30
4.2.3	Estado Límite de resistencia.	30
4.2.4	Estado Límite de Evento Extremo.	31
4.3	Elementos Prefabricados.	31
4.4	Elementos Superestructura.	31
4.4.1	Vigas pretensadas.	32
4.4.2	Travesaños.	32
4.4.3	Tablero.	32
4.4.3.1	Paneles Prefabricados.	32
4.4.3.2	Diseño Transversal del Tablero.	33
4.4.3.3	Diseño Longitudinal del Tablero.	34
4.4.4	Sistema de Apoyo.	35
4.4.5	Topes Antisísmicos.	35
4.5	Elementos Infraestructura.	36
4.5.1	Estribo.	36
4.5.2	Cabezal (Bent Cap).	36
4.5.3	Columnas.	36
4.5.3.1	Columnas Prefabricadas.	36
4.5.4	Conexión Columna-Cabezal.	37
4.5.4.1	Moldaje y Hormigonado de Agujeros.	38
4.5.4.2	Longitud Mínima de Refuerzo en Conexiones de Bolsillo.	39
4.5.4.3	Espesor del Tubo de Acero Corrugado para Conexiones de Bolsillo.	39
4.5.4.4	Capa de Ajustamiento para Conexiones de Bolsillo.	39
4.5.5	Conexión Columna-Zapata.	40
4.5.5.1	Conexión de Enchufe en Elemento Macizo.	41
4.5.5.2	Conexión de Enchufe de Columna prefabricada y Pila Sobredimensionada.	43
4.5.6	Zapatas.	46
4.5.7	Pilotes.	47
5.	Convalidación con Normas Chilenas.	47
5.1	Cargas y Combinaciones de Carga.	47
5.2	Materiales.	48
5.2.1	Hormigón Armado.	48
5.2.2	Hormigón Pretensado.	48

5.2.3	Métodos de Análisis	48
5.2.4	Factor de Modificación de Respuesta	48
6.	Diseño de Puente Caso Específico.....	50
6.1	Descripción General de la Estructura.....	50
6.2	Diseño Mediante Técnica Convencional.	54
6.3	Diseño Mediante Técnica ABC.	55
6.3.1	Diseño de Superestructura.....	60
6.3.1.1	Vigas Prefabricadas H=1.35m.....	60
6.3.1.2	Tablero Prefabricado.....	60
6.3.1.3	Conexión Tablero Viga.....	67
6.3.2	Diseño Infraestructura.	69
6.3.2.1	Diseño Pilotes.....	69
6.3.2.2	Columna Prefabricada Cepa.....	71
6.3.2.3	Columna Prefabricada Estribo.....	73
6.3.2.4	Cabezal Prefabricado.....	75
6.3.2.5	Conexión Cabezal-Columna.....	78
6.3.2.6	Conexión Columna-Pilote.....	80
6.3.2.7	Conexión Columna-Zapata.	83
7.	Tiempos de Construcción.	86
7.1.1	Construcción con Metodología Convencional.	86
7.1.2	Construcción con Metodología ABC.....	87
8.	Comparación de Resultados.....	89
8.1	Superestructura.....	89
8.2	Infraestructura	89
8.3	Comparación entre Tiempos de Construcción en Terreno.	92
9.	Conclusiones y Comentarios.	93
10.	Bibliografía.	97

1. Introducción.

1.1 Contexto.

Es posible observar en las últimas décadas que en Chile ha habido un aumento sustancial en la cantidad de vehículos que circulan por las calles y un incremento de la infraestructura pública, lo que ha provocado una extensión significativa del tamaño de las ciudades generando un importante aumento de los tiempos de transporte. Este problema se agudiza con nuevas reparaciones, reemplazo de puentes existentes o construcciones de obras, lo cual genera una interferencia parcial o total de las rutas.

A lo anterior, se suma que en las grandes zonas urbanas hay lugares en donde existen limitaciones para construir, sobre todo cuando se tiene una gran cantidad de viviendas o ciertas zonas con una municipalidad exigente en temas constructivos y medioambientales. Esto genera problemas con los horarios de trabajo, intervención en los servicios (agua, gas, luz, etc), desvíos de tránsito, aumento de los tiempos de desplazamientos en la zona, poca superficie de trabajo para la realización de la obra, entre otros.

Para estos casos los puentes carreteros de técnicas tradicionales generan un problema a la hora de llevar a cabo su construcción ya que, por los problemas mencionados anteriormente, se tienen situaciones poco óptimas y de tiempo prolongado para su correcta ejecución. Es por esto que nace la motivación de estudiar una técnica de diseño de puentes que reduzca el tiempo de ejecución mediante una construcción más rápida y efectiva en puntos críticos o de difícil emplazamiento en zonas urbanas.

Específicamente, en este Trabajo de Título se estudiará la aplicación de los puentes ABC (Accelerate Bridge Construction) como un primer acercamiento de esta tecnología al país y así poder impulsar su pronta aplicación a proyectos de puentes carreteros urbanos dentro del territorio nacional.

Según el Caltrans ABC Manual (2021) de la Federal Highway Administration (U.S. Department of Transportation) “los puentes ABC son aquellos proyectos que utiliza una planificación, diseño, materiales y métodos constructivos innovadores de manera segura y rentable para reducir el tiempo de construcción que se produce cuando se construyen puentes nuevos o se reemplazan y rehabilitan puentes existentes” (p.15). Esta metodología mejora la seguridad, la calidad, la durabilidad, los costos sociales y los efectos medioambientales durante la construcción y por lo tanto la implementación a proyectos desde el punto de vista estructural cobra mucha importancia, sobre todo lo relacionado con los criterios de diseño y normas asociadas.

1.2 Objetivo General.

El objetivo de la presente Memoria de Título es proponer la metodología de puentes ABC (Accelerate Bridge Construction) en el diseño de puentes carreteros en zonas urbanas de gran dificultad de emplazamientos o en proyectos donde se requiera una rápida construcción mediante la aplicación de esta metodología en un puente específico en Chile.

1.3 Objetivos específicos.

Los objetivos específicos que persigue la presente memoria de título son los siguientes:

- Estudiar la normativa de diseño estructural para los puentes ABC a través de códigos, manuales y normas extranjeras.
- Adaptar esta normativa a las regulaciones chilenas, ver sus diferencias y analizar que se debe modificar considerando especialmente la condición sísmica de Chile.
- Diseñar detalles constructivos para la unión de los distintos elementos prefabricados y diseño del pos-tensado para los elementos prefabricados del caso estudiado.
- Aplicar la tecnología ABC en el diseño de un puente chileno, comparando con el diseño convencional.

1.4 Alcance

Para la realización de esta memoria de título se aborda el problema de construcción de puentes carreteros urbanos en zonas críticas, es decir, en donde la intervención de las rutas genera un gran impacto en el entorno.

Se tendrá como alcance el diseño estructural de puentes ABC, sin considerar las fundaciones ni los estribos, para puentes carreteros en zonas urbanas en Chile. Esto se realizará a través de cuatro etapas principales de acuerdo con los objetivos específicos definidos.

1.5 Metodología.

Como se dijo anteriormente la investigación se realizará siguiendo cuatro etapas principales las cuales se describirán a continuación.

La primera etapa consta de una revisión bibliográfica tanto de normas extranjeras como chilenas para tener una base fundamentada para el estudio a realizar. Luego se realizará una comparación entre estas normas para así generar un criterio de diseño para la técnica ABC de puentes carreteros urbanos en Chile.

Posteriormente se analizarán los detalles constructivos mediante un estudio bibliográfico y con los criterios obtenidos se realizará el diseño de estos. Por último, se llevará a cabo todo lo estudiado mediante la aplicación del criterio de diseño estructural y los detalles constructivos estudiados a un caso real.

Para finalizar se realizará una comparación entre los resultados del diseño con metodología ABC con respecto al diseño convencional para luego evaluar las diferencias entre los elementos y conexiones entre ambos diseños.

2. Características de Puentes con Metodología Convencional y ABC.

2.1 Definición de puente.

Un puente es una obra civil que se construye para solucionar una discontinuidad en un camino o vía de comunicación, producto de un río, accidente geográfico u otro, cuando los niveles de la vía le impiden desarrollarse por el terreno natura.

Constituye una estructura destinada a soportar las cargas que transitan sobre ella (vehículos, camiones, peatones, etc) y debe ser capaz de resistir las acciones de las fuerzas del agua de un río si lo hay, del viento, de los sismos y del desgaste que este está sometido diariamente.

Según se indica el en el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas, en el Capítulo 3.1000 (2018), en una estructura de puentes se pueden distinguir cuatro partes bien definidas:

1. Superestructura. Es aquella parte del puente que permite la continuidad del camino con su calzada y bermas, sobre un río u otra vía. La superestructura soporta el paso de las cargas móviles las que trasmite a la infraestructura a través de los sistemas de apoyo, y está conformada por uno o más tramos dependiendo de la cantidad de apoyos que la sustenten. La superestructura está constituida por el tablero, su sistema estructural, el sistema de vigas o losas, sistemas de apoyo, anclajes antisísmicos, juntas de expansión y barandas.
2. Infraestructura. Es aquella parte del puente donde se apoya la superestructura y a través de la cual se transmiten las cargas al terreno de fundación. La infraestructura está constituida por los estribos, que son los soportes extremos del puente, y las cepas o pilas, que son los apoyos intermedios de puentes con superestructuras constituidas por más de un tramo.
3. Accesos. Los accesos al puente están constituidos, en general, por las siguientes obras: terraplenes de acceso, estructura de pavimento, bases, bermas y losas de acceso.
4. Obras de Defensa y Seguridad. Las obras de defensas de un puente comprenden los enrocados, bajadas de agua en los terraplenes de acceso y elementos de contención de tierras, tales como muros de contención, pilotes contenedores, muros, jaulas, etc. Las obras de seguridad comprenden las barreras de contención y señalización, sea esta vertical u horizontal.

Un puente se puede clasificar tomando en cuenta diversos criterios, a continuación, se presentarán 6 criterios de clasificación de puentes:

- a. Utilización. De acuerdo con el uso que se le da a la estructura, se pueden agrupar en
 - Puentes peatonales o pasarelas
 - Puentes de ferrocarriles
 - Puentes de carreteras

- Puentes grúas
- b. Objetivo. En relación con su propósito final
 - Puentes rurales
 - Puentes urbanos
 - Puentes provisorios
- c. Tipología estructural
 - Estructuras de vigas
 - Enrejados
 - Celosía o cerchas
 - Arco
 - Colgante
 - Atirantado
- d. Tipo de material
 - Hormigón armado
 - Hormigón pretensado o postensado
 - Acero estructural
 - Puentes mixtos, los cuales se combina el acero y el hormigón
 - Madera
- e. Tipo de sección de la viga
 - Sección I o T de Hormigón armado
 - Losa, puente en donde no existen vigas y el tablero está formado por una losa llena o hueca que resiste las cargas por si misma.
 - cajón
 - Secciones aerodinámicas
 - Vigas artesas
- f. Tipo de tablero
 - Tablero de madera
 - Losas de hormigón armado preparadas in situ
 - Losas prefabricadas de hormigón armado

2.2 Características de los Puentes Chilenos por Estudiar.

De acuerdo con la bibliografía revisada, especialmente con la Tesis Propuesta de Taxonomía en Puentes Chilenos, Aplicación en la Región de Valparaíso (2022) y el Manual de Carreteras Capítulo 3.1000 (2018), se describe a continuación las principales características de los puentes chilenos.

En el presente trabajo de título se abordará el diseño estructural de puentes carreteros urbanos y las estructuras más comunes en Chile corresponden a puentes con vigas pretensadas

simplemente apoyadas, con losa colaborante de hormigón armado, de 1 o más tramos. Estas vigas por lo general son prefabricadas pretensadas, postensadas o vigas de acero.

Los puentes chilenos tienen una luz que varía entre 15 a 48 metros y poseen 1 o más tramos dependiendo de los requerimientos. Con respecto a las vigas longitudinales, estas tienen una separación entre viga de 1.5 a 3.7 metros, el espesor de la losa colaborante tiene un mínimo de 20 centímetros y el pavimento de asfalto un mínimo de 5 centímetros.

Los materiales más comunes a que se utilizan son los siguientes:

- Hormigón losa: G25 NCh 170 ($f'_c=250$ kg/cm²)
- Hormigón Viga: G35-G50 a H55 NCh 170
- Acero pretensado 270 ksi baja relajación ($f_{pu}=18980$ kgf/cm²)
- Acero hormigón armado: A630-420H NCh 204 ($f_y=2400$ kg/cm²)
- Acero estructural: ASTM A36, A572 Gr 50

En esta memoria de título se enfocará más en el diseño de puentes de hormigón ya que más del 95% de los puentes del país son construidos con este material. Se detallará a continuación las características generales de las vigas post y pretensadas. Estas dispuestas en tramos simplemente apoyados y dependiendo de las condiciones de la obra y su facilidad de transporte son construidas en planta o in situ, existen transportes especiales cuando se tienen luces mayores a las permitidas para transportarlas convencionalmente. Las vigas pretensadas poseen secciones transversales predefinidas por los fabricantes por lo que el diseño se debe ajustar a estas.

2.3 Puentes de Construcción Convencional.

Los puentes de construcción convencional son aquellos en los cuales no se reduce significativamente el tiempo de construcción en terreno que se necesita para construir, reemplazar o rehabilitar un solo proyecto de puentes o un grupo de ellos. Los métodos convencionales involucran actividades en terreno que conllevan un tiempo considerable y eso implica tener una dependencia del clima.



Figura 1: Puente Vigas Prefabricadas. Fuente: Propia.

Un ejemplo de construcción convencional incluye la instalación en terreno de los moldajes de subestructura y la superestructura, seguido de la colocación del acero de refuerzo, el concreto y su curado correspondiente, todo esto ocurriendo típicamente de manera secuencial.

En Chile los puentes son construidos principalmente con vigas prefabricadas de hormigón pretensado con una losa hormigonada in-situ mediante moldajes. La infraestructura es construida in situ y para las fundaciones se utilizan mayoritariamente pilotes o zapatas de fundación dependiendo de la calidad de suelo que se disponga. A continuación, se presenta una secuencia de la construcción convencional de puentes en Chile.



Figura 2: Construcción de puentes con metodología Convencional en Chile. Fuente: Análisis comparativo de construcción de puentes, utilizando el método convencional y el método de construcción acelerada para incentivar el uso de este en Chile. (2022)

2.4 Accelerated Bridge Construction (ABC).

En esta sección se citan definiciones de los puentes ABC según variados autores para luego generar una definición definitiva que englobe a las anteriores. Luego se hablará de las ventajas y desventajas de esta metodología con respecto a la convencional. Para finalizar se mostrarán proyectos realizados con metodologías ABC en Sud América para contextualizar el ambiente en donde se está llevando a cabo la investigación.

Caltrans ABC Manual. (2021): “Los puentes ABC corresponden a aquellos métodos constructivos de puentes en los cuales se usa la combinación más eficiente de innovación, planeación, diseño y técnicas constructivas para disminuir significativamente los impactos de la construcción acortando el tiempo de construcción en terreno y/o minimizando las afectaciones al tráfico”.

ABC Manual and Examples Federal Highway. (2011): “ABC es un método de construcción de puentes que usa planeamiento, diseño, materiales y métodos constructivos innovadores de manera segura y rentable para reducir el tiempo de construcción i situ que se produce cuando se construyen puentes nuevos o se reemplazan y rehabilitan puentes existentes.

Los puentes ABC pueden mejorar la construcción en terreno, el tiempo de entrega del proyecto, la calidad y durabilidad del producto final y la seguridad en la zona de trabajo tanto para los peatones como para la gente contratada en obra. Esta metodología reduce el impacto en el tráfico, el tiempo de construcción en terreno y el tiempo perdido por problemas con el clima. Por último, los puentes ABC pueden minimizar los efectos del clima, efectos en las rutas colindantes”.

AASHTO LRFD GSABC. (2018): ABC es un método de construcción de puentes que usa planeamiento, diseño, materiales y métodos constructivos innovadores de manera segura y rentable para reducir el tiempo de construcción in situ que se produce cuando se construyen puentes nuevos o se reemplazan y rehabilitan puentes existentes.

U.S Bridges. (2022): “El uso de la construcción acelerada de puentes en un trabajo significa construir los componentes del puente fuera del sitio y luego transportarlos al sitio de trabajo para su instalación. Este trabajo fuera del sitio permite una finalización más rápida del proyecto. Además, este tiempo de finalización más rápido reduce la cantidad de interrupciones en las áreas circundantes durante la construcción”.

ENERPAC. (2022): “La construcción acelerada de puentes (ABC) es una forma más rápida e inteligente de construir e instalar puentes al minimizar las interrupciones causadas por los cierres de carreteras y vías fluviales.

Además del ahorro de tiempo, la construcción acelerada de puentes también brinda otros beneficios. En comparación con los métodos tradicionales, ABC utiliza métodos de planificación, diseño y adquisición más efectivos. El resultado de esto es una mejor seguridad pública y de los trabajadores, y puentes que duran más sin necesidad de mantenimiento”.

Construcción acelerada de puentes como solución a proyectos en zonas de alta sismicidad en Colombia. J. Benjumea. (2019): “El objetivo principal de la CAP (Construcción Acelerada de Puentes) es el de reducir el tiempo total de construcción en sitio. Esto se logra usando elementos prefabricados que son ensamblados y conectados en el sitio de forma rápida. Los elementos pueden construirse en paralelo con la ejecución de actividades de preparación en sitio. En general, la CAP reduce la exposición del personal de obra y de transeúntes a los riesgos de construcción. Este último grupo también se beneficia de la disminución de afectaciones por desvíos causados por la construcción de puentes. Además, existe un incremento potencial en la durabilidad de puentes construidos con métodos CAP debido a la calidad superior de los elementos prefabricados”.

A partir de las definiciones anteriores, los puentes con metodología ABC se define como: “aquellos métodos constructivos de puentes en los cuales se usa la combinación más eficiente de innovación, planeación, diseño, materiales y técnicas constructivas para disminuir significativamente los impactos de la construcción”.

Los puentes ABC pueden agilizar la construcción en terreno, lo que conlleva a una disminución en el tiempo de entrega del proyecto, la calidad y durabilidad del producto final y la seguridad en la zona de trabajo tanto para los peatones como para la gente contratada en obra. El uso de la construcción acelerada de puentes en un trabajo significa construir los componentes del puente fuera del sitio y luego transportarlos al sitio de trabajo para su instalación o bien construir los elementos prefabricados paralelamente a los trabajos en obra. Este trabajo fuera del sitio permite una finalización más rápida del proyecto. Además, este tiempo de finalización más rápido reduce la cantidad de interrupciones en las áreas circundantes durante la construcción.

Para evaluar si se construirá con metodología ABC o de forma convencional se deben tomar en cuenta los objetivos del proyecto y sus restricciones. Estas consideraciones pueden ser limitaciones por el clima, interferencias de tráfico o empresas locales, restricciones en actividades de construcción en áreas sensibles o mantenimiento de servicios esenciales.

Para medir la efectividad de los puentes ABC se utilizan dos medidas de tiempo. La primera corresponde al tiempo de construcción en terreno, el cual abarca desde el momento en que el contratista altera el sitio de construcción hasta que se elimina toda actividad relacionada con la construcción. La segunda es el tiempo de impacto en la ruta, el cual corresponde al tiempo que la capacidad de las vías estará reducida debido a actividades de construcción en terreno, por ejemplo, el cierre de una vía, cierres temporales, etc.

2.4.1 Beneficios de puentes ABC.

A continuación, se presentan los beneficios que se obtienen mediante la utilización de puentes ABC según el Caltrans ABC Manual. (2021).

1. Acelerar la entrega del proyecto. Método ABC puede quitar el puente de los elementos críticos en el calendario de la construcción reduciendo el tiempo de la construcción en terreno. Esto es bueno cuando se tienen restricciones de tiempo por las estaciones de año, horarios, medioambiente o restricciones económicas.
2. Mejora la seguridad de la zona de trabajo. ABC reduce el riesgo que se produce cuando se encuentran las actividades de construcción y el tráfico urbano. Esto se mejora a través de un buen plan de separación del tráfico de la zona de construcción y/o reduciendo el tiempo de construcción para así tener menos tiempo expuesto al tráfico urbano.
3. Minimizar las interrupciones de tráfico. ABC reduce las congestiones de tráfico minimizando las pistas cerradas, la construcción en terreno, tiempo de montaje. Esto beneficia a las empresas locales, a los servicios esenciales como escuelas, hospitales y bomberos. Reduce la congestión por lo que hay menos contaminación en el aire.
4. Mejora la constructibilidad. ABC provee soluciones para sitios donde hay problemas con la construcción convencional. Sitios con difícil acceso, malas situaciones para trabajar (clima), mucho tráfico y problemas medioambientales los cuales generan un problema para un proyecto convencional.

5. Asegura la calidad. Construir el puente por partes en plantas de prefabricación resulta mejorar la calidad de los elementos debido a que las piezas de los puentes son construidas en ambientes controlados. Las plantas de prefabricación proveen las condiciones óptimas de construcción para asegurar las condiciones requeridas para cada material según la norma que se utilice.
6. Menor mantención del puente. Al ser construido con la utilización de elementos prefabricados estos aseguran una mayor durabilidad, por lo que disminuyen los requisitos de mantención. Esto está relacionado con el punto 5 ya que se tienen elementos prefabricados.
7. Minimizar o evitar efectos en el ambiente. Métodos ABC pueden reducir el tiempo de construcción en terreno adecuando la construcción a diversas situaciones ambientales. Esto elimina los tiempos muertos en la construcción o las situaciones ambientales que pudieran afectar en la calidad de los elementos construidos de manera convencional por ejemplo una zona de construcción con temperaturas extremas o muchas precipitaciones.
8. Reduce el costo del proyecto. Los puentes ABC son más costosos que los métodos convencionales, pero estos pueden disminuir costos en otros aspectos los cuales deben ser considerados a la hora de decidir que método se utilizará. Pocos días de construcción en terreno implica menos requerimientos para controlar el tráfico, menos administración de proyecto y monitoreo del clima. También se debe tomar en cuenta el costo social que conlleva construir un puente en una zona muy transitada ya que se ven afectados los tiempos de transporte de las muchas personas que circulan diariamente por esos sectores.

2.4.2 Ejemplos de metodologías de puentes ABC en Chile, Latinoamérica y el mundo.

Como se ha definido antes, un puente con metodología ABC es aquel que mediante un método constructivo óptimo con prefabricados logra disminuir significativamente el tiempo de construcción en terreno. A continuación, se mencionarán métodos constructivos que siguen esta definición.

En Chile la mayoría de los puentes se construyen con vigas prefabricadas de hormigón las cuales se montan en las cepas y estribos, esto puede ser considerado una práctica de la metodología ABC ya que se está acortando el tiempo con respecto a si las vigas se montaran in situ o se hormigonara completamente el tablero. Esta práctica ya es considerada como convencional ya que es la metodología más usada en el país para construcción de puentes.

En los últimos años se han construido pasarelas prefabricadas en el país, estas se componen principalmente de una viga prefabricada la cual une los tramos y es al mismo tiempo el piso de la pasarela y columnas prefabricadas. Los elementos son unidos por conexiones las cuales generan un comportamiento monolítico entre los elementos. Esto también se considera una implementación de la metodología ABC ya que se tiene una disminución significativa en el

tiempo de construcción producto de la prefabricación de los elementos, esta vez aplicada a pasarelas.



Pasarela Pretam.



Pasarela Preansa.

Figura 3: Pasarelas Prefabricadas. Fuente: Revista EMB Construcción.

De acuerdo con lo investigado, en Latinoamérica no se han llevado a cabo obras bajo la definición de ABC como tal, pero se han construido obras viales con la intención de ahorrar tiempo bajo la utilización de métodos constructivos, materiales y maquinaria innovadora.

Bajo las anteriores características, para esta memoria de título se consideran puentes ABC a todos aquellos que cumplan con la definición antes realizada.

Un ejemplo de esto es el Viaducto del Gran Manglar en de la Ciénaga de la Virgen, Colombia (2018). Este fue terminado 4 meses antes de la fecha estipulada y obtuvo el Premio de Nacional de Ingeniería y el Premio Nacional Ambiental German Gómez Pinilla. La estructura fue construida mediante el método top down, esta tecnología construye el viaducto de arriba abajo mediante maquinaria que va depositando la superestructura prefabricada en las cepas, evitando la interferencia con el entorno. Las cepas son construidas in situ interfiriendo 24 metros cuadrados del entorno. Esto se realiza con una secuencia constructiva secuencial lo cual ayuda a reducir el tiempo de construcción. A continuación, se presentan fotografías de la obra.



Figura 4: Viaducto el Gran Manglar. Fuente: PEDELTA.

Con respecto al contexto global, se observa un avance en introducción de esta metodología en la construcción de puentes, especialmente en Estados Unidos, Canada, China y Japón. Los demás países si bien han implementado nuevas técnicas de construcción como por ejemplo las vigas prefabricadas que se implementan en Chile, aún no se implementan metodologías de puentes ABC de manera reconocida, particularmente en Latinoamérica. A continuación, se describirán 2 puentes construidos con la metodología ABC en países extranjeros.

El 2015 en Pekin, China se sustituyó un puente antiguo en 43 horas, el puente tenía 2 pistas por sentido y una longitud de aproximadamente 20 metros. La metodología que se siguió para realizar esta obra fue primero demoler el puente antiguo, luego comenzar el transporte y posicionamiento de los prefabricados de la infraestructura en la zona de construcción.

Una vez que los prefabricados de la infraestructura estuvieron posicionados y conectados se procedió a instalar el tablero completo en los estribos del puente, esto se realizó con una máquina SPMT (Self-Propelled Modular Transporters) la cual permite realizar el movimiento del tablero. Por último, se procedió a pavimentar el tablero y arreglar los requisitos que debe cumplir el puente para su apertura. A continuación, se muestran imágenes del proceso.

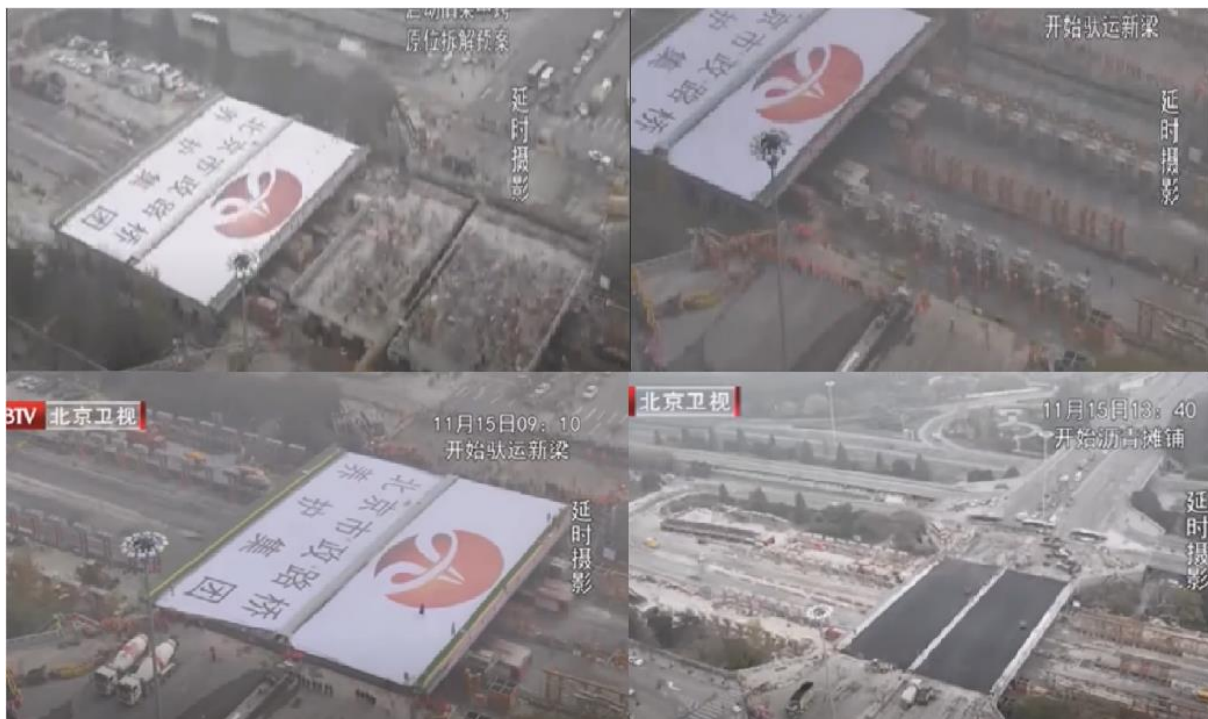


Figura 5: Etapas de construcción Puente Pekin 2015. Fuente: Diario El País.

Otro caso es el puente numero 69071 el cual se encuentra en el estado de Minesota fue construido en el 2010 con metodología ABC. El puente este compuesto por un vano de aproximadamente 15 metros de largo y fue diseñado para tener dos pistas. La construcción se basó en el uso de un tablero prefabricado compuesto por vigas pretensadas y paneles prefabricados. Las vigas tienen llaves de corte para generar la conexión con los paneles prefabricados y estos a su vez tienen agujeros en donde se instalarán las conexiones. Para la unión de estos paneles prefabricados se utilizaron cables postensados.

El tiempo de construcción de este puente fueron 28 días, este tiempo contempla la demolición del puente previamente existente y la construcción en terreno de ambos estribos por lo que

el tiempo en el cual se instaló el tablero y se abrió a tráfico fue de 16 días. A continuación, se presentan fotografías de la construcción del puente con la metodología ABC.



Figura 6: Puente Masatuses ABC. Fuente: Masatuses Department of Transportation.

3. Normas y Códigos de Diseño para Puentes.

3.1 Manual de Carreteras Volumen 5. Ministerio de Obras Públicas (2018).

En esta sección se realiza un resumen del Volumen 5 del Manual de Carreteras rescatando los elementos más importantes cerca de la construcción de puentes carreteros. Este volumen contiene las especificaciones de carácter general para los diferentes componentes requeridos por un proyecto vial. Este resumen se enfoca a las partidas que se relacionen con la construcción de puentes y obras afines.

3.1.1 Regulaciones del Tránsito Usuario.

Cuando los trabajos deban realizarse en caminos de uso público tanto vehicular como peatonal, se deberá controlar y regular de acuerdo con las disposiciones contenidas en el capítulo 5.004.1 y en el proyecto respectivo.

Se considera que la construcción o reparación estructural de un puente se debe realizar cerrando completamente el tránsito en este, es por esto que se debe realizar un desvío de tránsito hacia otra ruta. Para esto el Contratista puede solicitar una autorización para desviar el tránsito hacia una ruta alternativa, esto debe ser previamente aprobado por escrito por el Inspector Fiscal. El desvío debe cumplir los siguientes requerimientos.

- Salvo por razones justificadas, la longitud total del desvío no debe ser mayor a 2.5 veces el desarrollo del tramo de camino que reemplaza.
- Las características del desvío en su totalidad deben tener una velocidad de diseño de al menos un tercio de la velocidad de diseño del tramo que reemplaza, con un mínimo de 20 km/h.
- Dentro del emplazamiento del desvío no deben existir elementos que limiten los pesos máximos límites impuestos al camino que se reemplaza.

3.1.2 Desarmes y/o Demolición de Puentes Existentes.

Los trabajos se deben realizar en general según lo establecido en la sección 5.101.301, Remoción de Estructuras.

Las estructuras del puente deben ser totalmente demolidas o desarmadas, según sea el caso, salvo los elementos que deban conservarse para formar parte del nuevo proyecto. Las estructuras existentes deberán demolerse hasta la cota señalada en los Planos de proyecto, o una mayor, si así lo establece el Inspector Fiscal.

La demolición se realizará cuidando evitar daños a propiedades y construcciones vecinas. El Contratista no iniciará la demolición sin antes constatar que la expropiación del inmueble ha sido realizada. Todo material o producto de la demolición será transportado a depósitos ubicados fuera de la faja, que cumplan las disposiciones municipales. De existir materiales que puedan ser reutilizados, a juicio del Inspector Fiscal, estos se remueven sin dañarlos y se transportan al recinto fiscal más cercano de la Dirección de Vialidad.

3.1.3 Pavimento para Puentes.

Se definen los trabajos de construcción de pavimentos para puentes, se tienen dos tipos, concreto asfáltico y hormigón. En la sección 5.411 se incluye la provisión de materiales, transporte, distribución, compactación, colocación, curado y otros.

En el caso de concreto asfáltico, que es el más utilizado, se aplicará una capa en todo el ancho y largo del puente salvo que los planos y/o especificaciones digan algo diferente. Se llevará un control mediante chequeos topográficos en el caso de espesor y mediciones mediante densímetro en el caso de la densidad. El espesor debe ser el indicado en los planos de proyecto, no menor a 5 centímetros.

3.1.4 Impermeabilización de Tableros de Puentes

Actualmente existen variados sistemas para impermeabilizar los tableros de los puentes, las principales son membrana asfáltica, resinas epóxicas, revestimientos de poliureas, entre otros. Cada uno de estos sistemas presenta diferentes características de durabilidad, metodología de instalación, mantenimiento y precio. También se diferencian en los requisitos climáticos y el tipo de tablero que pueden ser instalados. Para la selección del sistema se debe optimizar los recursos tomando en cuenta la ubicación del proyecto y sus características, los costos a largo plazo y la vida útil.

Los materiales que formen el sistema deben cumplir con las características de los componentes constitutivos de acuerdo con la normativa que rige el producto certificado. En la sección 5.411 se detalla el procedimiento de trabajo para los sistemas de impermeabilización.

3.1.5 Acero para Armaduras y Alta Resistencia.

En la sección 5.503 se refiere al suministro, doblado y colocación de barras y mallas de acero de sección circular para las armaduras de refuerzo de hormigón estructural, ya sea armado o presforzado, en conformidad con lo que diga el proyecto. Las barras y mallas deberán cumplir con la calidad de materiales que indique este capítulo.

Con respecto al acero de alta resistencia, estará constituido por tendones de alta resistencia, por cables de alta resistencia o para algunos elementos postensados, por barras de alta resistencia. Todos los anteriores deben cumplir con el grado, geometría y características especificadas en el proyecto. Los ductos o vainas que se utilicen para colocar el acero deberán ser de calidad tal que se garantice su estanqueidad y geometría bajo las condiciones que impone el peso del hormigón fresco sobre cada elemento.

3.1.6 Moldajes.

La sección 5.504 se refiere al suministro de todos los materiales, faenas de confección y colocación de los moldajes, alzaprimas, andamios, carreras, amarras, fijaciones, desmoldantes y, en general, todo lo necesario para ejecutar los encofrados que servirán para dar forma al hormigón de las estructuras.

Los moldajes pueden ser de madera, acero u otro material. Los moldajes deben ser resistentes, estables y rígidos, y garantizar la estanqueidad de las uniones de los elementos.

3.1.7 Vigas Hormigón Armado, Vigas Pretensadas y Vigas Postensadas.

La sección 5.505 describe el suministro de todos los materiales y la ejecución de todas las faenas de fabricación o construcción, transporte lanzamiento y colocación de los tres tipos de vigas; vigas de hormigón armado, vigas de hormigón pretensado y vigas de hormigón postensado.

Las vigas pretensadas y postensadas, el contratista debe entregar un proyecto de ejecución acabado de la viga donde se indique la forma, dimensiones, geometría, grados y calidad de los materiales. También el sistema de cables a utilizar detallando los elementos complementarios propios del sistema de tensado a aplicar.

3.1.8 Juntas de Dilatación en Puentes y Estructuras Afines.

En la sección 5.512 se describe los materiales, la provisión y colocación de juntas de expansión y contracción de puentes y estructuras afines. En este caso solo se rescatará el contenido relacionado con puentes ya que es el tema de interés de esta memoria.

Las juntas para tableros de puentes se tienen soluciones con materiales elastoméricos y metálicos. Las soluciones metálicas consisten en la provisión y colocación de elementos, tanto para la protección de aristas de estructuras de hormigón, como para la conformación de juntas de dilatación de tableros de puente.

3.1.9 Anclajes Antisísmicos.

La sección 5.513 describe las obras comprendidas que consiste en el suministro, confección y colocación de sistemas de anclajes antisísmicos de conexión entre el tablero y la infraestructura del puente. El sistema de anclaje se basa en barras de acero de grado especificado, el cual cumple con lo establecido en este manual.

3.1.10 Suministros y Colocación de Sistemas de Apoyos Elastoméricos para Puentes.

La sección 5.514 consiste en describir los trabajos de suministros, transportes, almacenaje, manipulación y colocación de sistemas de apoyos para puentes, de la forma, tipo, calidad y dimensiones indicadas en el proyecto.

La especificación está basada en la instalación de apoyos de neopreno o caucho natural ya que son los más comunes en los puentes chilenos. Estos apoyos consisten en capas de neopreno o caucho natural con refuerzo de láminas metálicas.

Los diferentes elementos que componen el sistema de apoyo deben proveerse con las dimensiones, características y calidad de los materiales según se defina en el proyecto. Los procedimientos de trabajo se dividen en el transporte, almacenamiento y manipulación, se describen las principales características del proceso para cada una de las actividades antes mencionada. Se tiene un control de calidad durante y después de la instalación.

3.1.11 Losas de Acceso.

La sección 5.515 se refiere al suministro de todos los materiales y la ejecución de las faenas de construcción de las losas de aproximación de hormigón armado en los accesos a losas y puentes.

El hormigón por utilizar será G25 en las losas de aproximación y G05 en radieres y emplantillados. El acero será A63-42H de acuerdo con los diámetros y dimensiones indicadas en el proyecto.

LA faena de construcción de las losas de acceso se iniciará una vez terminados y aprobados los trabajos de relleno y compactación de trasdos de los estribos. El procedimiento de hormigonado de las losas se llevará a cabo con lo estipulado en la sección de Hormigón.

No se permitirá el tránsito de vehículos o la ejecución de obras en la losa recién construida por 72 horas.

3.1.12 Drenaje en Puentes y Estructuras.

La sección 5.615 explica el suministro, confección y colocación de sistemas de drenajes y saneamiento de aguas lluvias, de acuerdo con lo establecido en el proyecto.

El proyecto de puentes puede considerar el desagüe directo de las aguas lluvia de la calzada a través del tablero y hacia el cause que se atraviesa. Dentro de las obras más comunes dentro de este contexto se encuentran las barbacanas de desagüe de tablero del puente.

3.1.13 Barreras y Barandas en Puentes.

La sección 5.710 contempla los trabajos de suministro, confección, colocación, pintura galvanizada u otro tipo de protección contra la corrosión de las barreras de contención y barandas peatonales para puentes y estructuras afines, del tipo, forma, calidad y dimensiones acordadas en el proyecto.

Los elementos que constituyan la barrera no deben presentar deformaciones tales que afecten la estética del conjunto. Las barreras y barandas del puente serán fabricadas por paños, debiendo contemplar juntas que permitan la libre dilatación y contracción de los elementos.

3.2 Manual de Carreteras Capítulo 3.1000. Ministerio de Obras Públicas (2018).

En esta sección se realiza un resumen del capítulo 3.1000 del Manual de Carreteras rescatando los elementos más relevantes acerca del diseño estructural de puentes carreteros.

Los puentes en Chile se diseñan ciñéndose a las disposiciones de la norma AASHTO LRFD Bridge Design (2017), "Estandar Specification for Highway Bridges, 17th Edition, del año 2002". En las secciones de diseño y diseño sísmico se presentan recomendaciones y criterios que a la práctica chilena ha desarrollado en los últimos años y que han permitido un buen comportamiento de las estructuras frente a los eventos naturales.

El alcance que de los temas que se abordan en la sección de diseño y diseño sísmico, se limitan a puentes, viaductos, pasoso desnivelados y obras afines con tramos con luces libres

no mayores a 70 metros. Tampoco se incluirá puentes con tipologías especiales como puentes arco, atirantados, colgantes, etc. En caso de que se excedan los alcances del Manual de Carreteras, se requiere la participación de un especialista que debe justificar los criterios de diseño y procedimientos empleados.

3.2.1 Aspectos Generales de Diseño.

3.2.1.1 Secciones Transversales Tipo Puente.

En la definición del tipo de puente se deberá tener en cuenta el lugar de emplazamiento, ancho de la plataforma, longitud del puente, categoría del camino y el tránsito previsto para el año horizonte de diseño.

La calzada debe tener un ancho mínimo de 4.5 metros y dependiendo del uso que este destinado el puente puede o no tener más superficie disponible para peatones, ciclovías, etc. Dentro del manual se tiene tablas para determinar el ancho mínimo del puente según la luz y ancho del tablero.

3.2.1.2 Cargas.

En la sección 3 de la norma AASHTO se definen y detallan las cargas que se deben considerar en el diseño de puentes. Se presentan a continuación:

- Cargas permanentes: Peso propio.
- Cargas vivas: cargas móviles y de peatones.
- Efecto dinámico o de impacto de las cargas móviles (Frenado o fuerza centrífuga).
- Cargas sísmicas (Posee cambios a la AASHTO).
- Cargas de viento.
- Presiones Hidrodinámicas.
- Otras.

El dimensionamiento puede hacerse con diseño ASD o LRFD. Todos los diseños son idénticos a los presentados en la AASHTO con excepción del diseño sísmico.

3.2.1.3 Fundaciones.

En la sección 4 de la norma AASHTO se entregan las disposiciones y criterios de diseño para las fundaciones de puentes y obras afines.

En el tópico 3.1002.4 del manual de Carreteras se entregan los requisitos generales del reconocimiento geotécnico para desarrollar el estudio de las fundaciones de los puentes y obras anexas. En lo que no se contradiga con estas disposiciones, regirá lo establecido en el Artículo 4.3 de la Norma AASHTO.

Se distinguen las fundaciones directas(superficiales) y las fundaciones profundas. Las fundaciones directas son aplicables a situaciones en donde el suelo es competente, o el nivel

de socavación esperado se encuentra a una profundidad bajo la superficie del terreno menor a 1 a 2 veces el lado menor de la fundación. En caso de que el suelo no cumpla con lo anterior se debe disponer de fundaciones profundas.

3.2.1.4 Hormigón Armado.

En la Sección 8 de la Norma AASHTO se entregan las disposiciones y criterios de diseño para las obras de hormigón armado de puentes y obras afines. Estas disposiciones pueden ser modificadas o complementadas por los diseños desarrollados en Chile.

Los materiales empleados en la confección de hormigón armado para puentes deberán cumplir las disposiciones establecidas por las normas chilenas y los complementos indicados en el manual de carreteras según el caso.

3.2.1.5 Hormigón Pretensado.

En la Sección 9 de la Norma AASHTO se entregan las disposiciones y criterios de diseño para las obras de hormigón armado de puentes y obras afines. Estas disposiciones pueden ser modificadas o complementadas por los diseños desarrollados en Chile.

El hormigón y el acero de refuerzo deberán cumplir con lo señalado en el numeral 3.1003.701 del manual de Carreteras. El acero de pretensado deberá cumplir con las normas AST A 421-80 y A 416-80. No se aceptará el uso de cables no adheridos.

3.2.2 Diseño Sísmico.

Estas especificaciones establecen las recomendaciones de diseño sísmico de puentes, viaductos, pasos desnivelados y pasarelas peatonales con tramos con luces libres de 70 metros para evitar su daño sísmico.

Las especificaciones que se detallarán a continuación, aplicadas en conjunto con las normas de diseño de cada material, están orientadas a lograr estructuras que:

- Resistan sin daño, en el rango elástico, movimientos sísmicos de intensidad moderada.
- Limiten los daños a elementos no estructurales durante sismos de mediana intensidad.
- Aunque presenten daños deben evitar su colapso total o parcial durante sismos de intensidad excepcionalmente severa.

Las especificaciones son aplicables en todo Chile. El peligro sísmico varía en el país de Norte a Sur, es por esto que por motivos de diseño se han definido tres categorías de comportamiento sísmico en base a la aceleración efectiva máxima del suelo A_0 del lugar y a un coeficiente de importancia del puente.

Para el diseño sísmico de puentes en Chile se debe tener en cuenta una serie de parámetros que definen el comportamiento del suelo según la zona, la importancia del puente, la socavación, entre otros. A continuación, se describirán los parámetros más significativos:

1. Aceleración efectiva máxima del suelo (A_0): Estos valores se encuentran en la tabla 3.1004.302.A(Manual de Carreteras) de acuerdo con la zona sísmica del lugar.
2. Aceleración máxima del suelo (a_0): Estos valores se encuentran en la tabla 3.1004.303.A(Manual de Carreteras) de acuerdo con la zona sísmica del lugar.
3. Zonificación Sísmica: Se distinguen tres zonas sísmicas en el territorio nacional, zona 1, 2 y 3 cuyos valores van en aumento con el peligro sísmico.
4. Clasificación por importancia: Coeficiente de importancia (CI) que será clasificado por la dirección de vialidad.
5. Peligro de Socavación Sísmica (PSS) para el Diseño Sísmico: Nivel de socavación remanente después de ocurrida la socavación máxima, se expresa como % de esta última.
6. Categorías de comportamiento sísmico: Existen 4 categorías de la a a la d, basadas en la aceleración efectiva máxima (A_0), el Peligro de Socavación (PSS) y la Calificación de Importancia (CI). Se encuentra en la tabla 3.1004.307.A del manual.
7. Efecto del suelo: Los coeficientes de suelo (S) permiten incorporar el efecto del suelo en los coeficientes sísmicos y espectros de diseño. Sus valores se indican en la Tabla 3.1004.308.A.

3.2.2.1 Métodos de análisis.

Para determinar las cargas sísmicas a ser utilizadas en el análisis elástico de los efectos sísmicos se tienen cinco métodos: Método del coeficiente sísmico, Método del coeficiente sísmico modificado por la respuesta estructural, Método modal espectral, Método modal espectral con estudio de riesgo sísmico y Método de análisis no lineal en el tiempo.

Los tres primeros métodos se refieren a un análisis sísmico de la estructura de puentes tradicionales constituida por la superestructura e infraestructura sin incluir los estribos, los cuales se toman como apoyos. Se considera que la estructura es libre de vibrar sísmicamente sobre los apoyos elastoméricos o similares de los estribos.

3.2.2.2 Factores de Modificación de Respuesta (R).

Las fuerzas sísmicas de diseño para miembros individuales y conexiones serán obtenidas dividiendo los valores de las fuerzas básicas elásticas por adecuados factores de modificación de respuesta (R) (Hay uno para dirección transversal y otro longitudinal). Se indican en la tabla 3.1004.310.A del manual.

Este factor refleja las características de absorción y disipación de energía de la estructura resistente.

Estos factores serán empleados solo en los métodos del coeficiente sísmico modificado por la respuesta estructural y el método modal espectral.

3.2.2.3 Limitaciones del Esfuerzo de Corte Basal.

El corte basal del puente se define como la suma de las reacciones horizontales elásticas establecidas según los métodos del coeficiente sísmico modificado por la respuesta

estructural y el método modal espectral divididas por el correspondiente factor de modificación de respuesta de las elevaciones. En sección 3.1004.311 se presentan los cortes basales mínimos por método.

3.2.2.4 Criterio de Combinación para las Fuerzas Sísmicas Ortogonales.

Esta combinación se considera para tomar en cuenta tanto la incertidumbre del movimiento sísmico como la ocurrencia simultánea de valores máximos en dos direcciones perpendiculares. E deben considerar los siguientes estados de carga.

- Estado de carga 1: Las fuerzas y momentos sísmicos para cada uno de los miembros en cada eje principal serán obtenidos de la suma del 100 por ciento del valor absoluto de las fuerzas y momentos resultantes del análisis de la dirección transversal del sismo y el 30 por ciento de los resultantes del análisis en la dirección longitudinal.
- Estado de carga 2: Las fuerzas y momentos sísmicos para cada uno de los miembros en cada eje principal serán obtenidos de la suma del 100 por ciento del valor absoluto de las fuerzas y momentos resultantes del análisis de la dirección longitudinal del sismo y el 30 por ciento de los resultantes del análisis en la dirección trasversal.

3.2.2.5 Largo Mínimo de Apoyo.

Independiente de su categoría sísmica, todos los puentes deberán cumplir con los requerimientos de apoyo mínimo en los extremos de las vigas, estos valores se encuentran en la sección 3.1004.315 del manual.

3.2.2.6 Puentes de un Tramo.

Para el diseño de puentes de un tramo se empleará el método del coeficiente sísmico. Las fuerzas se consideran actuando horizontalmente en cada una de las direcciones restringidas. La conexión entre el tablero y el estribo deberá diseñarse para el peso tributario del estribo multiplicado por el coeficiente sísmico. Para este caso no se consideran las disminuciones del factor de modificación de la respuesta.

3.2.2.7 Fuerzas Modificadas de Diseño.

Las fuerzas modificadas de diseño se separan en dos grupos:

1. Para elementos estructurales y conexiones: Las fuerzas de diseño de estos artículos son aplicables a la super estructura, sus juntas de expansión, las conexiones entre la superestructura y la infraestructura, las elevaciones de la infraestructura (sin incluir fundaciones cabezal de pilotes y pilotes) y los componentes que conecten la superestructura al estribo.

Las fuerzas de diseño sísmico serán determinadas dividiendo el estado de carga 1 o 2 del numeral 3.1004.314 por su correspondiente factor de modificación de la respuesta. Las fuerzas sísmicas del estado de carga 1 o 2 serán combinadas con las otras cargas de manera independiente tal y como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\textit{Grupo de carga} = 1.0(D + B + SF + E + EQM)$$

Donde:

D = Peso muerto

B = Boyante

SF = Fuerza debido al escurrimiento

E = Empuje de tierra

EQM = Fuerzas sísmicas elásticas para el estado de carga 1 o 2 modificadas por el factor R

2. Para Fundaciones: Las fuerzas de diseño sísmico para fundaciones serán las fuerzas elásticas obtenidas del estado de carga 1 y 2 del numeral 3.1000.315 dividida por el factor de modificación de la respuesta indicado más abajo. Se detalla la combinación a continuación.

$$\text{Grupo de carga} = 1.0(D + B + SF + E + EQF)$$

Donde

D, B, SF, E son los mismos que anteriormente

EQF = Fuerzas sísmicas elásticas para el estado de carga 1 y 2 dividida por un factor R = 1

3.2.2.8 Definiciones de Diseño de Hormigón Armado.

En la sección 3.1004.6 del manual se encuentran las disposiciones de diseño de hormigón armado las cuales hacen referencia a la Norma AASHTO complementada con las especificaciones chilenas para el diseño. En esta sección se especifican los requisitos para las columnas, cepas, conexiones de columnas, juntas de construcción cepas y columnas, pilotes y las fuerzas resultantes de rotulas plásticas en columnas, cepas y un conjunto de columnas.

3.2.2.9 Vigas Travesaño en Superestructura.

Todos los puentes deben considerar, por cada tramo, travesaños extremos y centrales, independiente de la ubicación o zona sísmica y el tipo de viga del puente. La interacción de los travesaños con los topes sísmicos se debe diseñar con una aceleración A_0 y adicionalmente verificar las cargas de servicio.

3.2.2.10 Barras de Anclaje.

Se deberán calcular considerando una aceleración A_0 . Las barras deberán cumplir con las disposiciones ASTM A706M. Se permite el empleo de acero de refuerzo ASTM A615M, grados 280 y 420, siempre y cuando se cumplan los requisitos explícitos en la sección 3.1004.8 del manual.

3.2.2.11 Topes Transversales.

Los estribos, cepas y pilas deberán considerar topes sísmicos que restrinjan el desplazamiento transversal excesivo de la superestructura sobre las mesas de apoyo. Se deberán considerar además topes intermedios adicionales a los topes de apoyo.

Los topes sísmicos, extremos e intermedios se deben calcular considerando una aceleración A_o . Cada tope debe ser capaz de resistir toda la fuerza transversal del tablero dividida por el número de topes intermedios.

Los topes sísmicos intermedios deberán formar una llave de corte con los travesaños, con el fin de que en probable impacto sobre ellos, debido a un sismo, dañe el travesaño y no las vigas. Se debe considerar como distancia máxima $H(\text{cm})+5(\text{cm})$ para topes intermedios y $H(\text{cm})+7(\text{cm})$ para los topes extremos, con H la altura máxima del apoyo.

En todos los topes se debe considerar un neopreno lateral de bajo espesor, para amortiguar el impacto sobre ellos. El diseño de los toes transversales será lo suficientemente dúctil para evitar la caída del tablero.

3.2.2.12 Juntas Sísmicas.

Se detalla el espaciamiento mínimo entre juntas sísmicas que garantice los desplazamientos sísmicos completos de los apoyos elastoméricos considerados en el diseño. La separación mínima S_j de la junta sísmica queda dada por:

$$S_j \geq 6.25 * \frac{A_o}{g} + S_1 + S_2 [cm]$$

Donde S_1 y S_2 son los desplazamientos sísmicos de cada uno de los apoyos elastoméricos expresados en centímetros.

3.3 Caltrans ABC Manual. Federal Highway Administration(2021).

En este capítulo se realiza un resumen de la sección 4 “Design” para rescatar información acerca del diseño estructural de elementos y secciones para puentes de construcción acelerada bajo la experiencia de la empresa Caltrans en obras de este tipo. El propósito de este manual es proveer una guía para los planes de ejecución, especificaciones técnicas y de diseño para proyectos de puentes de construcción acelerada (ABC). Todo a modo de sugerencia ya que el manual está basado en la experiencia del Departamento de Transporte de California en los proyectos ABC que han ejecutado.

El diseño de proyectos ABC este guiado por las condiciones de construcción, todos los componentes son diseñados para soportar las cargas permanentes y las cargas intermedias como el transporte, levantamiento y ensamblaje de los elementos prefabricados. El encargado de proyecto debe desarrollar un plan de construcción que indique la secuencia y movimientos requeridos para la ejecución del proyecto considerando, de ser necesario, los requerimientos especiales de los elementos.

3.3.1 Plan, Tolerancias y Control Geométrico.

Proyectos ABC tienen desafíos importantes con la prefabricación, es por esto que el planeamiento y las especificaciones deben proveer condiciones realistas para la fabricación,

constructibilidad, tolerancias y conexiones de los elementos. El manual se basa en la AASHTO LRFD GSABC Sección 9 (2021). En esta sección se especifican las tolerancias para cada elemento prefabricado los respectivos monitoreos que se deben aplicar por elementos.

3.3.2 Cargas y Factores de Carga.

El encargado del diseño de proyecto es responsable de diseñar los elementos del puente ABC para las condiciones de carga de la configuración final y de construcción. La norma AASHTO GSABC Sección 2 (2021) detalla las cargas y los factores de carga a aplicar que aplicarán de acuerdo con las especificaciones de diseño de puentes AASHTO LRFD BDS (2017).

3.3.3 Condiciones de Carga Provisionales.

Una condición de carga provisional es una condición de carga para un elemento del puente o sistema de puente que existe previo al estado final de construcción. Esta condición puede incluir cargas actuando en las componentes del puente cuando estas están siendo transportadas, ensambladas o desplazadas a un lugar en específico. Estas son cargas de construcción las cuales son especificadas en AASHTO LRFD BDS (2017). Estas cargas pueden incluir:

- Fuerzas de elevación y fricción: durante desplazamientos laterales y longitudinales. Se requieren fuerzas de elevación para superar tanto la fricción dinámica como estática. Estos casos se generan con el uso de gatos hidráulicos y maquinas transportadoras SMPT
- Puntos críticos donde se levanta el elementos o sistema de puente prefabricados que pueden o no coincidir con el apoyo en la ubicación final. El contratista es responsable de un plan para fabricar, transportar y erguir elementos prefabricados de hormigón sin exceder los esfuerzos o momentos resistentes permisibles, si se aplica o no el pretensado. La factibilidad se confirma durante el diseño mediante el análisis de estos componentes considerando los soportes en ubicaciones de punto de recogida razonables, como se analiza en la sección 2.4.1 AASHTO LRFD GSABC (2021).

3.3.4 Apoyos Temporales.

Los apoyos temporales son requeridos durante el ensamble y durante el movimiento de los elementos o sistemas prefabricados. Estos elementos sirven para la seguridad, estabilidad, resistencia lateral durante movimientos y resistencia lateral para el viento y fuerzas sísmicas.

3.3.5 Presencia de Servicios.

La presencia de servicios, tanto subterráneos como sobre nivel, pueden limitar la factibilidad de utilizar puentes ABC. Las limitaciones por los servicios deben ser evaluada durante toda la zona del proyecto incluyendo el camino donde pasarán los camiones ya que la carga de estos es considerable. La mejor solución es remover o relocalizar los servicios de impacto que se encuentren en la zona de construcción para proveer al contratista con un área de trabajo

limpia. Estos impactos deben identificarse en las etapas tempranas del proyecto de puente ABC.

3.3.6 Capacidad de Carga de Estructuras Existentes.

Proyectos de puentes ABC pueden generar cargas considerables las cuales serán aplicadas a carreteras y estructura ya existentes. Estas cargas pueden sobrepasar las limitaciones legales impuestas por los códigos de cada país (en el caso del estado de California estas limitaciones están especificadas en el California Vehicle Code Division 15). Algunos ejemplos de estos casos son:

- Transporte de elementos prefabricados de gran masa desde el lugar de fabricación hasta el lugar de construcción.
- Transporte de maquinaria SMPT (Self-Propelled Modular Transporters)
- Transporte de equipos de movimiento de tierras a través de estructuras ya existentes

En los casos donde se exceda el límite de peso, generando un sobrepeso en la ruta, el encargado del proyecto de diseño es responsable de determinar si las estructuras por donde se transportaran los elementos prefabricados o materiales son capaces de soportar estas cargas y buscar una ruta segura de transporte que no dañe las estructuras ya existentes.

3.3.7 Materiales.

Hay muchos materiales con propiedades únicas que pueden facilitar el transporte y ensamble de elementos y sistemas prefabricados para puentes ABC. Dentro de estos materiales se incluye el hormigón liviano, hormigón de resistencia acelerada y hormigón de ultra desempeño.

3.3.7.1 Hormigón Liviano.

El peso puede ser un limitante al momento de transportar o ensamblar los elementos prefabricados de un puente ABC. El hormigón liviano permite aumentar el tamaño de las piezas prefabricadas o reducir el tamaño de la maquinaria necesaria para su transporte o ensamble. El uso de este hormigón puede ser estudiado cuando el hormigón convencional se ve limitado.

El hormigón liviano se diseña con los parámetros especificados en la Standar Specifications Section 90-6 (También de Caltrans) el cual incluye disposiciones detallada para la obtención de propiedades específicas del material. Se requieren una serie de ensayos y pruebas para asegurar que estas propiedades se cumplan a la hora de construir.

3.3.7.2 Hormigón de Resistencia Acelerada (RSC).

El tiempo requerido para superar el esfuerzo a compresión requerido para elementos de hormigón y juntas puede ser crítico en el programa de obra para puentes ABC. El hormigón de resistencia acelerada consiste en una mezcla de cemento con aditivos los cuales permiten una resistencia de compresión permisible en horas mientras que el hormigón convencional

tomaría semanas. Esta característica vuelve al RSC un hormigón ideal para componentes de puentes ABC como losas de empalme, tablero del puente, juntas, entre otras.

El uso de RSC requiere mayor planeamiento y testeo. El contratista es responsable de desarrollar un hormigón que cumpla con los parámetros especificados en la Standar Specifications.

Se deben tomar las siguientes consideraciones.

- RSC probablemente será una opción para reducir la ruta crítica en puentes ABC. El contratista debe analizar el riesgo asociado.
- RSC logra resistencias altas a la compresión en un periodo corto de tiempo y genera un calor significativamente mayor al concreto normal en el periodo de fraguado, es por esto que el plan de control térmico debe ser considerado para espesores que superen las 24 pulgadas.

3.3.7.3 Hormigón de Ultra Desempeño (UHPC).

UHPC es una combinación cementosa que exhibe propiedades mecánicas y de durabilidad que lo hacen ideal para los puentes ABC. Alta resistencia a la compresión, alta resistencia a la flexión, unión de interfaz fuerte, longitud de desarrollo más corta, fluidez, durabilidad y estabilidad dimensional se combinan para hacer de UHPC un material favorable para su uso en conexiones coladas en campo de elementos estructurales prefabricados. UHPC se está utilizando en una amplia variedad de aplicaciones de puentes en todo el mundo, tanto para la construcción de puentes nuevos como para la reparación de puentes.

3.3.8 Elementos Prefabricados de Puentes ABC.

En esta sección se presenta información acerca de los elementos y sistemas prefabricados para proveer una guía e identificar recursos para el desarrollo de planes de diseño y especificaciones para puentes ABC. Se basa en la sección 3 del manual de la AASHTO GSABC (2021).

Los elementos prefabricados de un puente son elementos estructurales los cuales son construidos en una planta de prefabricación, transportados a la zona de construcción y finalmente ensamblados en su lugar correspondiente. Los elementos prefabricados tienen la ventaja de quitar la construcción de los elementos del puente de la ruta crítica, sin embargo, se debe tener en consideración la ruta por la cual los elementos serán transportados, las juntas de los elementos, entre otros.

La norma antes mencionada explicita que todos los elementos prefabricados deben ser diseñados y detallados para cumplir los requerimientos de la norma AASHTO LRFD BDS (2017). El diseño de los elementos prefabricados es realizado tomando en cuenta que la estructura es monolítica; al diseñar estructuras con hormigón in situ se realiza a través de elementos individuales que son conectados por conexiones o llaves de corte, estas conexiones deben ser detalladas y verificadas para transmitir las fuerzas entre los elementos adyacentes.

Siguiendo esta idea el diseño de elementos prefabricados puede seguir los procedimientos para el diseño con hormigón in situ.

3.4 Comentarios análisis bibliográfico.

Luego del estudio de la bibliografía se observa que las conexiones de los elementos prefabricados son la partida que más diferencia un puente ABC de uno convencional por lo que al momento de realizar el estudio comparativo se debe poner especial énfasis en el desarrollo de estas para que el puente cumpla con los requisitos exigidos por el Manual de Carreteras o, de ser necesario generar una memoria de cálculo que los justifique.

Para tener una mayor seguridad en las conexiones se modificará el factor de reducción de estas a uno más pequeño que el de los elementos prefabricados, realizando esto se está asegurando que la falla no ocurra en la conexión, sino que ocurra en algún elemento estructural no tan determinante como lo es la conexión entre dos elementos.

También se destaca que los topes antisísmicos son un requisito solo existente en Chile por lo que hay que incluirlo en el diseño del puente ABC y en el caso que se esté conectando elementos prefabricados, se debe dejar el espacio previamente para la posterior instalación de los topes.

En las normas extranjeras se mencionan materiales que en Chile no están normados por un documento oficial. Se debe generar trabajo específico que describa el comportamiento de este y a su vez justifique que el material tiene un comportamiento óptimo y seguro para su utilización en el puente. Un ejemplo de esto es el hormigón autocompactante el cual es mencionado en el Manual Caltrans, este no está normado en Chile por lo tanto si se quiere utilizar se debe hacer lo anteriormente propuesto.

4. Consideraciones generales para el Diseño de Puentes ABC de acuerdo con la Normativa Extranjera.

En esta sección se mostrarán las disposiciones generales para el diseño de puentes ABC basadas en la norma AASHTO LRFD GSABC (2018).

El diseño del puente se realizará con un diseño LRFD teniendo en cuenta que los elementos prefabricados serán izados e instalados mediante grúas las cuales utilizarán cables para levantar los elementos, es por esto que se agregarán nuevas condiciones de carga las cuales aseguren que el elemento este diseñado para el izaje, transporte e instalación.

4.1 Estados Límites.

Un estado límite define las condiciones que una estructura debe satisfacer, cada elemento estructural deberá satisfacer diferentes estados límites los cuales están definidos por la norma AASTHO LRFD BDS Octava Edición (2017), se presentan y describen a continuación.

1. Estado Límite de Servicio: Se debe considerar como restricciones impuestas a las tensiones, deformaciones y anchos de fisura bajo condiciones de servicio regular.
2. Estado Límite de Fatiga y Fractura: Se debe considerar como restricciones impuestas al rango de tensiones que se da como resultado de un único camión de diseño ocurriendo un número anticipado de ciclos del rango de tensión.
3. Estado Límite de Resistencia: Se debe considerar para garantizar que se provee resistencia y estabilidad, tanto local como global, para resistir las combinaciones de carga estadísticamente significativas especificadas que se anticipa que el puente experimentará durante su periodo de diseño.
4. Estado Límite correspondiente a Eventos Extremos: Se debe considerar para garantizar la supervivencia de la estructura durante una inundación o sismo significativo, o cuando es embestido por algún vehículo significativo.

4.2 Cargas y Combinaciones de Cargas.

Los elementos prefabricados deben ser diseñados para cumplir todos los criterios de cargas y combinaciones de cargas según lo establecido por la norma AASHTO LRFD BDS, Octava Edición (2017) las cuales se muestran a continuación.

4.2.1 Estado Límite de Servicio.

1. Servicio 1: Combinación de cargas que representa la operación normal del puente con un viento de 90 (km/h), tomando todas las cargas con sus valores nominales. También se relaciona con el control de las deflexiones de las estructuras metálicas enterradas, revestimientos de túneles y tuberías termoplásticas y con el control del ancho de fisuración de las estructuras de hormigón armado.
2. Servicio 2: Combinación de carga cuya intención es controlar la fluencia de las estructuras de acero y la falla de las conexiones críticas debido a la carga viva vehicular.

3. Servicio 3: Combinación de carga relativa sólo a la tracción en estructuras de hormigón pretensado con el objetivo de controlar el agrietamiento.

Estados Límites	Combinaciones
Servicio 1	DC + DW + EHr + Ev + Es + LL + IM
Servicio 2	DC +DW + EHr + Es + 1.30x(LL + IM)
Servicio 3	DC +DW + EHr + Es + 0.80x(LL + IM)
Servicio 4	DC +DW + EHr + Es

Tabla 1: Combinaciones de carga E.L Servicio. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Estado Límite de Fatiga y Fractura.

Combinación de cargas de fatiga y fractura que se relaciona con la sobrecarga gravitatoria vehicular repetitiva y las respuestas dinámicas bajo un único camión de diseño.

Estados Límites	Combinaciones
Fatiga	0.75x(LL + IM)

Tabla 2: Combinaciones de carga E.L Fatiga. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Estado Límite de resistencia.

1. Resistencia 1: Combinación de cargas básica que representa el uso vehicular normal del puente, sin viento.
2. Resistencia 2: Combinación de cargas que representa el uso del puente por parte de vehículos de diseño especiales especificados por el Propietario, vehículos de circulación restringida, o ambos, sin viento.
3. Resistencia 3: Combinación de cargas que representa el puente expuesto a vientos de velocidades superiores a 90 km/h.
4. Resistencia 4: Combinación de cargas que representa relaciones muy elevadas entre las solicitaciones provocadas por las cargas permanentes y las provocadas por las sobrecargas.

Estados Límites	Combinaciones
Resistencia I	1.25xDC + 1.50xDW + 1.35xEHr + 1.30xEv + 1.50xEs + 1.75x(LL + IM)
	0.90xDC + 0.65xDW + 1.35xEHr + 0.90xEv + 1.50xEs + 1.75x(LL + IM)
	1.25xDC + 1.50xDW + 0.90xEHr + 1.30xEv + 0.75xEs + 1.75x(LL + IM)
Resistencia IV	1.50x(DC + DW) + 1.35xEHr + 1.50xEs

Tabla 3: Combinaciones de carga E.L Resistencia. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Estado Límite de Evento Extremo.

Son aquellas combinaciones de carga que incluyen los sismos.

Estados Límites	Combinaciones
Evento Extremo	$1.25xDC + 1.50xDW + 1.50x(EHa + EHs) + 1.30xEv + 1.00xEQ$
	$0.90xDC + 0.65xDW + 1.50x(EHa + EHs) + 0.90xEv + 1.00xEQ$

Tabla 4: Combinaciones de carga E.L evento Extremo. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Elementos Prefabricados.

Además de las combinaciones descritas anteriormente el diseño debe tener en cuenta que los elementos prefabricados serán transportados, izados e instalados mediante grúas las cuales utilizarán cables para levantar los elementos, es por esto que se agregarán nuevas condiciones de carga las cuales aseguren que el elemento resista estas condiciones. Para ello la norma AASHTO LRFD GSAB (2021) propone las siguientes combinaciones.

Estados Límites	Combinaciones
Servicio I	$y_h DL$
Esfuerzo I	$y_h y_p DL$

Tabla 5: Combinaciones E.L Transporte Izado e Instalación. Fuente: Elaboración propia.

Donde:

DL corresponden a las cargas muertas.

y_h corresponde al factor dinámico de la carga muerta por manipulación de elementos prefabricados.

y_p corresponde al factor de carga muerta como especifica la “AASHTO LRFD BDS”

A continuación, se presentan los valores para y_h que recomienda la norma.

$y_h = 1.2$ para manejo y montaje en obra.

$y_h = 1.5$ para el transporte.

Estos valores para el manejo, montaje y transporte toman en cuenta los efectos dinámicos durante la construcción y deben ser aplicados a elementos prefabricados de cualquier tipo,

4.4 Elementos Superestructura.

Para esta memoria se abordará el diseño de un puente de vigas de 1 o más vanos con una luz menor a 50 metros ya que son los puentes más típicos en Chile. Luego de ya haber introducido

los conceptos y el contexto necesario obtenido del Manual Caltrans y el Manual de Carreteras se procederá a ir diseñando elemento por elemento el puente con las normas extranjeras para luego convalidarlo con las normativas chilenas. El diseño del puente se realizará con un diseño LRFD.

4.4.1 Vigas pretensadas.

El diseño de las vigas pretensadas se realizará de acuerdo con la sección 5.9 de la norma AASHTO LRFD BDS 8th Ed 2017.

Se deben diseñar las conexiones de las vigas con el tablero en caso de ser prefabricado, estas conexiones constarán de llaves de corte (las más comunes son las “V”)

4.4.2 Travesaños.

Los travesaños se ceñirán a lo explícito en el artículo 8.12 de la norma AASHTO LRFD BDS (2017), estos serán construidos in situ.

4.4.3 Tablero.

El diseño del tablero se puede llevar a cabo siguiendo las especificaciones del reporte de PCI State of the Art Report on Full-Depth Precast Concrete Bridge Deck Panels (2011) el cual es citado en la norma AASHTO GSABC (2018) y la norma ABC UTC Guide to FDPC Deck Panels (2019).

De acuerdo con lo especificado en el reporte antes mencionado esta sección se dividirá en tres partes las cuales serán el diseño de los paneles prefabricados independientes, luego el diseño del tablero transversal (perpendicular al flujo de tráfico) y el diseño longitudinal (paralelo al flujo de tráfico).

4.4.3.1 Paneles Prefabricados.

Los paneles se diseñan para la flexión transversal, esto puede realizarse utilizando hormigón armado, postensado, pretensado o una combinación de los anteriores. El refuerzo longitudinal, en la dirección de las vigas, debe detallarse para controlar la contracción, agrietamiento y distribuir la carga viva. Tanto el diseño de armadura transversal como longitudinal deben satisfacer todos los requisitos de la norma AASTHO LRFD BDS (2017).

Se debe detallar el refuerzo de los paneles para el izaje y colocación de los paneles prefabricados como se muestra en la figura 7. Este izaje produce esfuerzos que podría implicar un aumento de la armadura para resistir los esfuerzos producidos por el izaje.

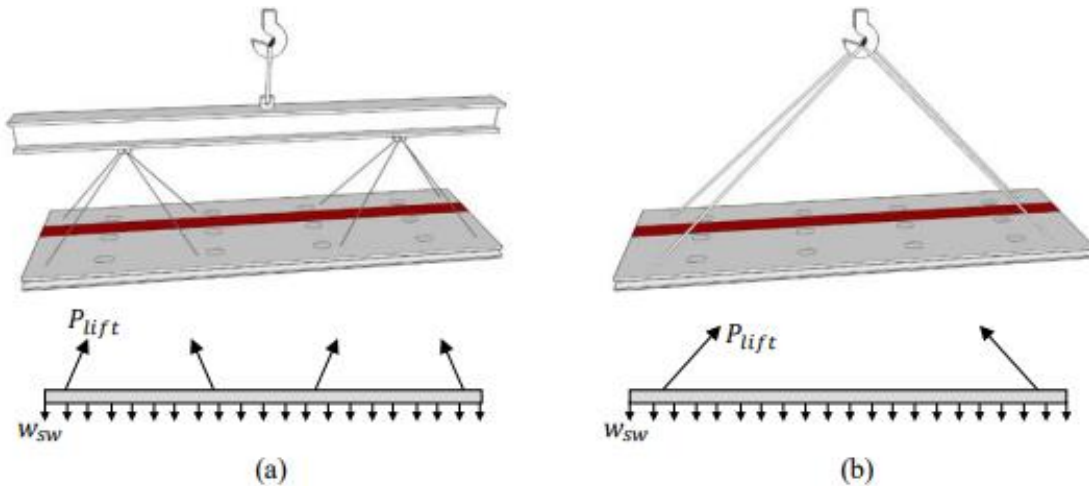


Figura 7: Ejemplo de refuerzos se izaje y colocación. Fuente: ABC UTC Guide to FDPC Deck Panels Article 3.2 (2019).

Según la norma AASTHO LRFD BDS artículo 9.7.5 (2017), se recomienda un espesor mínimo de 18 cm. Sin embargo, normalmente el espesor de la losa es controlado por los recubrimientos de hormigón. Las especificaciones de la norma AASHTO LRFD BDS (2017) requieren una cobertura de 5 cm sobre la capa superior de refuerzo y una cobertura mínima de 2.5 cm en la capa inferior de refuerzo.

Como se está trabajando para puentes típicos el diseño contemplara el diseño de paneles rectangulares los cuales abarquen el largo total del tablero. Se recomienda que el ancho de los prefabricados no supere la mitad de la separación entre vigas.

Al momento de dimensionar los paneles se debe tener en consideración sus tamaño y peso de cada elemento. Los paneles prefabricados tienen que ser transportados de una planta de elementos prefabricados por lo que su transporte será a través de camiones los cuales tienen exigencias de transporte.

4.4.3.2 Diseño Transversal del Tablero.

El procedimiento comúnmente utilizado para el diseño es el método de diseño de franjas que considera una pequeña franja transversal del tablero como una viga continua apoyada sobre las vigas de manera simplemente apoyada, como muestra en la figura 8. El diseño se puede realizar con hormigón armado, pretensado o una combinación de ellos para la dirección transversal.

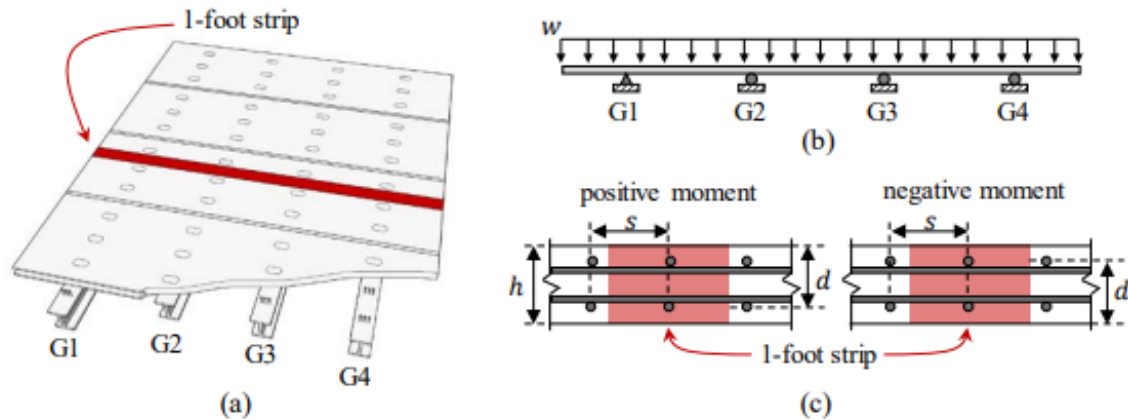


Figura 8: Método de diseño de franjas. Fuente: ABC UTC Guide to FDPC Deck Panels Article 3.2 (2019)).

Una vez que los efectos debido a la carga muerta y viva son determinados se diseña la franja, donde las tensiones de servicio en las secciones críticas son comprobadas contra las tensiones admisibles de la norma AASHTO LRFD BDS (2017).

Se debe utilizar un análisis de viga continua para determinar los efectos debido a los tipos de carga que se dispongan. Entre estas se encuentra la carga del tablero, el pavimento, barreras, entre otras.

El apéndice A-4 de la AASHTO LRFD BDS (2017) proporciona una tabla de efectos de flexión para losas de cubierta que cumplan determinadas condiciones y criterios.

4.4.3.3 Diseño Longitudinal del Tablero.

El refuerzo longitudinal es necesario para distribuir las cargas vivas. El diseño longitudinal incluye la conexión viga panel la cual permitirá al tablero del puente actuar de manera compuesta o no con las vigas.

El refuerzo longitudinal en situaciones convencionales se debe detallar para controlar la contracción, agrietamiento y distribuir la carga viva, sin embargo, se puede optar a utilizar armadura post tensada conforme con la norma AASHTO LRFD BDS sección 9.7.5.3 (2017) para aportar la distribución de la carga viva entre las juntas de los paneles y asegurar junta contra fugas.

El postensado aporta esfuerzo de compresión entre las juntas de los paneles prefabricados. Esta compresión residual genera un control de grietas y estanquidades de agua. Esto se considera un aporte a la durabilidad de la estructura ya que estudios han demostrado que la causa más común de deterioro de puentes con tableros prefabricados son grietas del concreto en las juntas.

El postensado longitudinal proporciona continuidad entre los paneles prefabricados, debe ser ubicado a una profundidad media en los paneles y recorrer todo el largo del puente o entre vanos. El postensado debe transmitir un nivel mínimo de 1.75 MPa después de todas las

pérdidas para vanos simplemente apoyados. Se necesita un tensado adicional para superar la tracción que generan los momentos negativos compuestos por la carga viva y muerta en los tramos continuos.

Se pueden utilizar tres tipos de postensado: varillas roscadas de alta resistencia, mono hebra y tendón plano de varias hebras.

Un aspecto importante para considerar es garantizar que los paneles prefabricados tengan tensión cero en la dirección longitudinal bajo todas las cargas aplicadas, teniendo en cuenta los efectos a largo plazo de la fluencia y la retracción del hormigón. Punto 2.4.3 de la norma antes mencionada.

Como se dijo anteriormente los paneles se pueden conectar a las vigas mediante conexiones compuestas o no compuestas. Se utilizarán conexiones compuestas para tener un comportamiento conjunto entre vigas y tablero. Esto se realizará mediante conectores de corte los cuales deben ser capaces de resistir tanto horizontal como verticalmente el movimiento entre los elementos. La norma AASHTO LRFD BDS (2017) exige una separación máxima de 60 cm entre los conectores de corte, sin embargo, la investigación realizada por PCI ha demostrado que se pueden construir estos tableros con una separación de 120 cm. Adicionalmente “NCHRP Project 12-65 research” también ha verificado este espaciamiento de 120 cm. Para la obtención de la cantidad de conectores de corte necesarios para el diseño se utilizan procedimientos convencionales, los cuales están descritos en la sección 5.8.4 Transferencia de Corte en las Interfases-Corte por Fricción de la norma AASHTO LRFD BDS (2017).

El tablero también se puede diseñar mediante la utilización de prelosas colaborantes las cuales son dispuestas y fijadas entre las vigas para luego hormigonar in-situ el resto del tablero, cabe destacar que para calcular la resistencia en el tablero se debe tomar en cuenta la resistencia de la prelosa ya que esta está diseñada para aportar resistencia al tablero. Esto se realizará siguiendo las disposiciones de

4.4.4 Sistema de Apoyo.

Para el diseño de los sistemas de apoyo se seguirá lo expresado en el artículo 14 de la norma AASHTO LRFD BDS (2017) en la cual se entregan los criterios de diseño y las disposiciones para los apoyos elastoméricos de puentes y oras afines.

4.4.5 Topes Antisísmicos.

En las normativas revisadas no se mencionan los topes antisísmicos, por esto se genera un desafío para el diseño de los puentes ABC en Chile a que se debe prefabricar la barra sísmica en el cabezal. Se propone dejar una perforación durante la prefabricación del cabezal para que se pueda disponer la barra, esto requiere que la barra sea necesariamente recta (sin curvatura) para poder insertarla en el agujero de manera correcta y segura.

De acuerdo con la normativa nacional, se deben disponer topes antisísmicos en los apoyos de las cepas, estribos y topes intermedios en la mitad de los tramos en los casos que se requiera.

4.5 Elementos Infraestructura.

En este capítulo se abordará el diseño de la prefabricación del cabezal y la columna, el estribo se construirá in situ al igual que los pilotes (si tiene pilotes). Esto debido a que el principal objetivo de los puentes ABC es reducir el tiempo de construcción del puente y tanto el estribo como las fundaciones son secciones del puente que necesitan más tiempo para su emplazamiento. En otros países se ha aplicado la tecnología ABC tanto para puentes nuevos como el reemplazo del tablero e infraestructura en puentes. Se abordará el segundo caso antes mencionado tomando en cuenta que ya se encuentran construidas los estribos y pilotes.

4.5.1 Estribo.

Los estribos se realizarán de forma convencional ya que en la mayoría de los puentes ABC que se han construido se utiliza la infraestructura existente para así ahorrar el tiempo de ejecución, de todas maneras, existen métodos constructivos los cuales prefabrican las partes del estribo y luego las van ensamblando.

Se diseñará acorde a lo especificado en la sección 11.6 de la norma AASHTO LRFD BDS (2017).

4.5.2 Cabezal (Bent Cap).

Los cabezales prefabricados se pueden utilizar con columnas prefabricadas o columnas in situ. El diseño se realizará siguiendo las disposiciones de la norma AASHTO LRFD BDS (2017) y las consideraciones del Manual Caltrans (2021).

La conexión entre el cabezal y las columnas puede generar una congestión en el refuerzo. Por esta razón se debe hacer un análisis de la disposición en las armaduras del cabezal y la columna para asegurarse que las barras de refuerzo para la conexión puedan ser dispuestas sin toparse con las armaduras de refuerzo de las secciones.

Se sugiere diseñar un cabezal más ancho que la columna para así tener permitir la disposición de armadura longitudinal afuera de la armadura vertical de la columna.

4.5.3 Columnas.

Las columnas pueden ser diseñadas como prefabricadas, en caso de que se tenga una fundación tipo zapata o hormigonadas in situ en el caso que se tenga una fundación pila pilote.

4.5.3.1 Columnas Prefabricadas.

Las columnas prefabricadas deben ser diseñadas y detalladas para adaptarse a las condiciones de fabricación y entrega, deben contener las conexiones al cabezal y a los cimientos y debe cumplir con las condiciones de carga en la estructura permanente.

Las columnas prefabricadas deben ser diseñadas bajo las dimensiones y pesos sugeridos en la sección 4.9.4.1 del Manual Caltrans(2021) las cuales se adaptan a las condiciones de transporte y levante de Estados Unidos. Se hace la observación de que un agujero en el centro de la columna el cual es relleno con hormigón armado después de su instalación es una buena alternativa para reducir el peso del elemento a la hora de ser transportado y luego levantado para su instalación.

Las columnas prefabricadas se deben diseñar de acuerdo con la norma AASHTO LRFD BDS (2017) la cuales incluye los requisitos de espirales de anclaje y terminación. Los estribos de aro individuales también se encuentran especificados en la norma

El refuerzo de confinamiento no necesita cruzar la junta en la parte inferior o superior de la columna. Es aceptable anclar y terminar el espiral o aro de confinamiento dentro de la columna y continuarlo en el elemento de conexión.

El diseño de las conexiones entre la columna prefabricada con el cabezal y los cimientos es fundamental para la implementación de estas columnas, estos criterios se discuten en la sección 4.9.5.2 del manual Caltrans(2021).

4.5.4 Conexión Columna-Cabezal.

Para el diseño de las conexiones columna cabezal se seguirán las disposiciones de la norma AASHTO LRFD GSABC Sección 3.6.6(2018) la cual recomienda el uso de conexiones de bolsillo.

Las conexiones de bolsillo se pueden usar para conectar elementos de hormigón prefabricado mediante huecos que se utilizan para recibir refuerzos u otros conectores mecánicos que sobresalen del otro elemento.

Las conexiones bolsillo constan de una columna con armadura proyectada y otro elemento, en este caso la zapata o el cabezal, que contiene el hueco en el hormigón. La columna es instalada tal que la armadura proyectada se disponga dentro de los agujeros de los elementos prefabricados, la conexión esta completa cuando se rellena el agujero con hormigón in situ o lechada. Se utiliza una capa entre el extremo de la columna y la base del cabezal o la parte superior de la zapata para acomodar las tolerancias de fabricación y construcción.

La conexión de bolsillo utiliza un tubo de acero corrugado en el borde del agujero en el elemento que recibirá el refuerzo de la columna. Este tubo es puesto entre la armadura longitudinal superior e inferior del miembro receptor y sirve tanto como un lugar de sujeción como un refuerzo transversal de unión. El diámetro del tubo es determinado para que se puedan instalar las armaduras longitudinales proyectadas de la columna mientras que el espesor es determinado para que satisfaga los requerimientos de refuerzo de las conexiones transversales. En la figura 9 se puede observar la disposición de los elementos en la conexión de bolsillo.

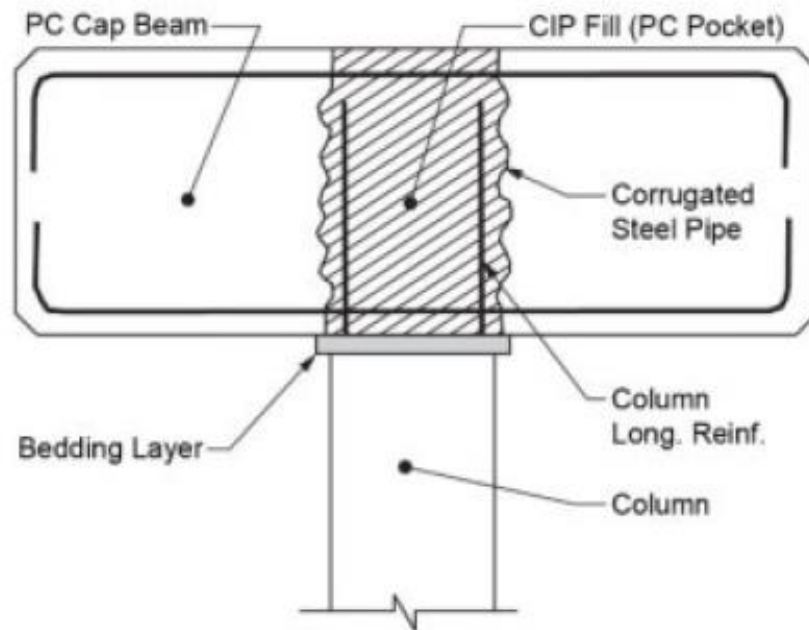


Figura 9: Conexión de bolsillo. Fuente: Norma AASHTO LRFD GSABC (2018).

4.5.4.1 Moldaje y Hormigonado de Agujeros.

Los agujeros deben moldearse utilizando un tubo de metal corrugado helicoidalmente y que tenga una costura de bloqueo continua que se extienda de extremo a extremo en cada uno de los tubos. El tubo metálico debe satisfacer la norma ASTM A760. Los agujeros se deben rellenar con hormigón estándar, hormigón autocompactante o lechada.

Estos tubos metálicos son usados para formar los agujeros en los elementos de hormigón, pueden facilitar la transferencia de las fuerzas entre los miembros en el perímetro del agujero y también sirven como confinamiento en la zona de la conexión. El hormigón de relleno debe ser capaz de salir por los conductos de ventilación en la parte superior de la capa de asiento. (bedding cap).

El tubo de metal corrugado es ubicado entre medio del refuerzo longitudinal superior e inferior del elemento, es por esto que una protección tanto en la parte superior e inferior del tubo puede resultar al momento de hormigonar para que el agujero traspase el elemento con el mismo diámetro que el tubo.

La distancia entre la armadura de refuerzo y el tubo de metal corrugado debe ser al menos 1.5 veces el agregado más grande de la mezcla de hormigón y no más de 10 centímetros.

El volumen dentro del agujero puede ser considerable por lo que el uso de hormigón estándar es permitido, de todas maneras, se recomienda el uso de hormigón autocompactante. El espaciamiento entre barras es consistente con la norma AASHTO LRFD BDS (2017) la que permitirá la circulación del hormigón a través de las barras.

4.5.4.2 Longitud Mínima de Refuerzo en Conexiones de Bolsillo.

El refuerzo longitudinal proyectado de la columna debería extenderse prácticamente hasta el lado opuesto del elemento que se quiera conectar. La longitud de anclaje para el refuerzo longitudinal debe ser la menos 60 veces el diámetro de la barra dentro del elemento conectado también debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$l_d \geq d_{hl} * \frac{f_{ye}}{\sqrt{f'_{cp}}}$$

Donde:

- l_d es el largo de anclaje del refuerzo longitudinal de la columna en el elemento a conectar.
- d_{hl} diámetro nominal del refuerzo de la columna.
- f_{ye} esfuerzo de fluencia esperado del refuerzo longitudinal.
- f'_{cp} esfuerzo nominal de compresión del hormigón de relleno del agujero.

4.5.4.3 Espesor del Tubo de Acero Corrugado para Conexiones de Bolsillo.

El espesor mínimo del tubo de acero corrugado debe cumplir con la relación mínima de refuerzo transversal de la junta especificada en la norma AASHTO Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design (2011).

El espesor mínimo debe cumplir las condiciones exigidas de acuerdo con la categoría de diseño sísmico que depende del tipo de suelo en donde se esté construyendo la estructura, estas ecuaciones se encuentran en la sección 3.3.3.4 de la norma AASTHO LRFD GSABC (2021).

Se ha demostrado bajo estudios experimentales que el uso de un tubo de acero corrugado con costura de bloqueo helicoidal desde el agujero en el miembro prefabricado receptor proporciona confinamiento y elimina la necesidad de aros convencionales y barras en jota en la junta.

Las ecuaciones para determinar el espesor del tubo de acero corrugado en una conexión de bolsillo de tapa se basan en proporcionar una fuerza de aro de confinamiento promedio a la junta aproximadamente igual a la proporcionada por los aros en las juntas hormigonadas en el lugar para las categorías de diseño sísmico C y D de la norma AASHTO Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design (2011). No se requiere la relación mínima de refuerzo transversal de la junta para otras zonas de categorías de diseño sísmico, se proponen las mismas ecuaciones de manera conservadora para permitir estimar el espesor de la tubería de acero corrugado.

4.5.4.4 Capa de Ajustamiento para Conexiones de Bolsillo.

Tal como su nombre lo indica la capa de ajustamiento es una capa de hormigón dispuesta posteriormente en la columna que permite cumplir con las tolerancias de fabricación y

emplazamiento. El refuerzo debe ser el mismo que el refuerzo transversal requerido por la columna cerca de la superficie donde se realizará la conexión y debe colocarse uniformemente a lo largo de la capa de ajustamiento.

El refuerzo transversal alrededor de las barras longitudinales de la columna aporta confinamiento y reducen la longitud sin apoyo de las barras lo que limita su potencial de pandeo durante la articulación plástica de la columna. La colocación del refuerzo en la capa de ajustamiento es esencial para lograr la capacidad esperada de ductilidad del sistema.

El espesor máximo de la capa de ajustamiento debe ser menor o igual el 5% del diámetro de la columna, cuando este es ensamblado con lechada. A continuación, se muestra en la figura 10 la placa de ajustamiento.

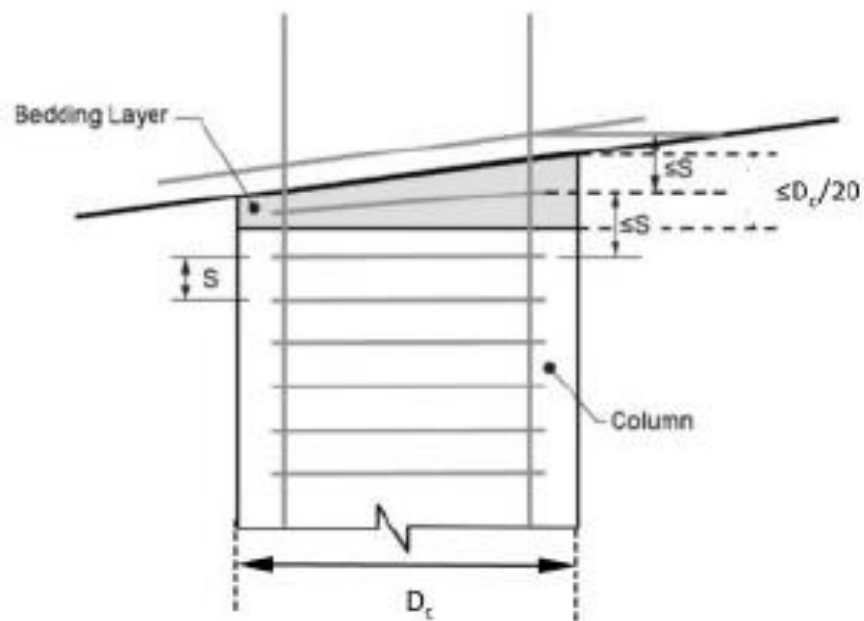


Figura 10: Capa de ajustamiento conexión de bolsillo. Fuente: AASHTO LRFD GSABC (2018).

4.5.5 Conexión Columna-Zapata.

Para el diseño de las conexiones columna zapata se seguirán las disposiciones de la norma AASHTO LRFD GSABC Section 3.6.7 (2021) la cual recomienda el uso de conexiones de enchufe (Socket Connection).

Las conexiones de enchufe se utilizan para conectar elementos prefabricados insertando un elemento en otro el cual tiene un agujero en donde se ubicará el que se desea conectar, en este caso la columna. A continuación, se presenta la figura 11 que representa la conexión.

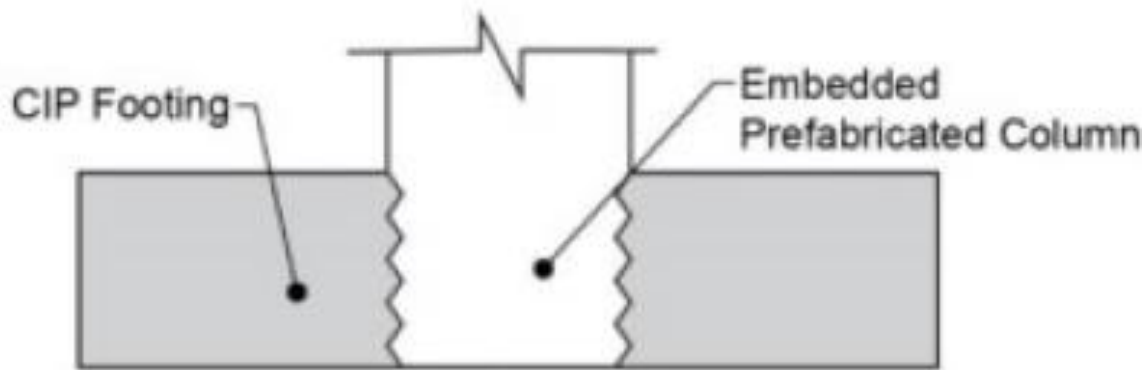


Figura 11: Conexión Enchufe. Fuente: AASHTO LRFD GSABC (2018).

La principal fuente de transferencia de fuerza en la conexión es por esfuerzo de corte y carga axial a través de las superficies de contacto del agujero. La zona de disipación de energía se encuentra entre los elementos que están siendo conectados, la conexión se realiza con hormigón in situ.

Típicamente no se utiliza refuerzo de acero en la interfaz de los elementos a conectar por lo que la rugosidad de las superficies es un factor importante a la hora de diseñar la conexión al corte.

Las conexiones de enchufe se pueden realizar de dos maneras diferentes, la primera es mediante un agujero que se encuentra dentro del elemento que recibirá la estructura prefabricada, sea zapata o cabezal, mientras que en la segunda los elementos se conectan mediante un eje de hormigón moldeado por fuera el cual cumple la función de conexión entre los elementos, este se utiliza al momento de conectar un pilote con una columna. A continuación, se explicarán ambas metodologías de diseño por separado.

4.5.5.1 Conexión de Enchufe en Elemento Macizo.

Esta metodología de diseño es utilizada para conectar una columna prefabricada a una cepa o zapata maciza, es decir, la columna se introduce en un agujero dentro del elemento que la recibirá. Se presenta en la conexión en la figura 12 para un mejor entendimiento.

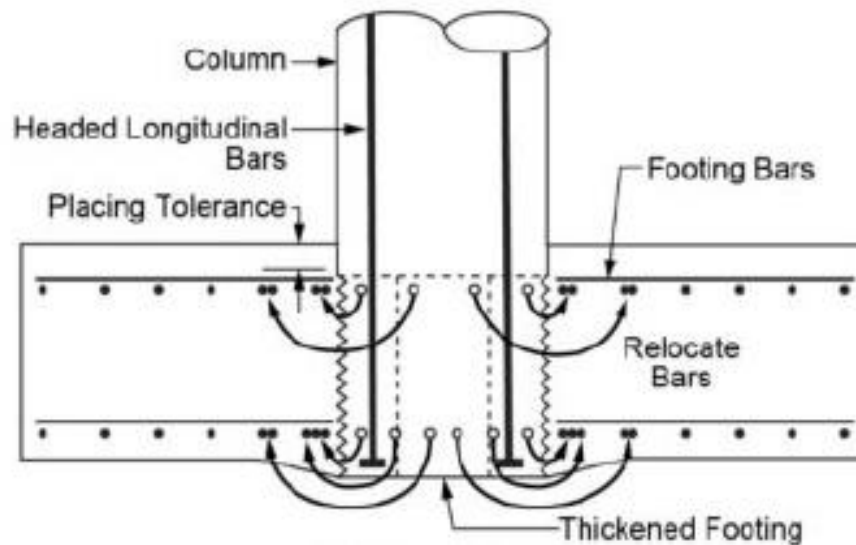


Figura 12: Conexión enchufe en elemento macizo. Fuente: AASHTO LRFD GSABC (2018).

Para mantener la integridad de la interconexión de los elementos a través de la interfaz, el peso propio del elemento empotrado y la carga de construcción asociada deben soportarse hasta que el concreto colocado o la lechada colocada en la interfaz alcancen una resistencia suficiente. Si la columna es dispuesta temporalmente sobre el suelo se debe utilizar una losa de sacrificio para prevenir los asentamientos relativos del suelo.

La longitud de emplazamiento de la columna debe ser al menos mayor que su diámetro. Las barras de refuerzo longitudinal de la columna deben estar completamente ancladas dentro de la profundidad de la zapata o cepa, estas barras deben tener en el extremo anclajes mecánicos capaces de proveer la resistencia requerida. Los anclajes se deben colocar debajo del nivel de la capa inferior de refuerzo de la zapata o debajo de la capa superior del refuerzo de la tapa del pilote.

Para conexiones enchufe con agujeros de profundidad menor a 1.5 veces el diámetro de la columna se debe proveer una rugosidad relativa entre la columna y el elemento donde se conectará de una amplitud no menor que 0.65 cm.

La armadura de la cepa o zapata debe ser distribuida uniformemente por el elemento, pero las barras que tendrán interferencia con la columna deben ser compensadas con el mismo tamaño y número de barras en ambos lados de la columna. Se muestra a continuación se muestra en la figura 13 una ilustración de la armadura.

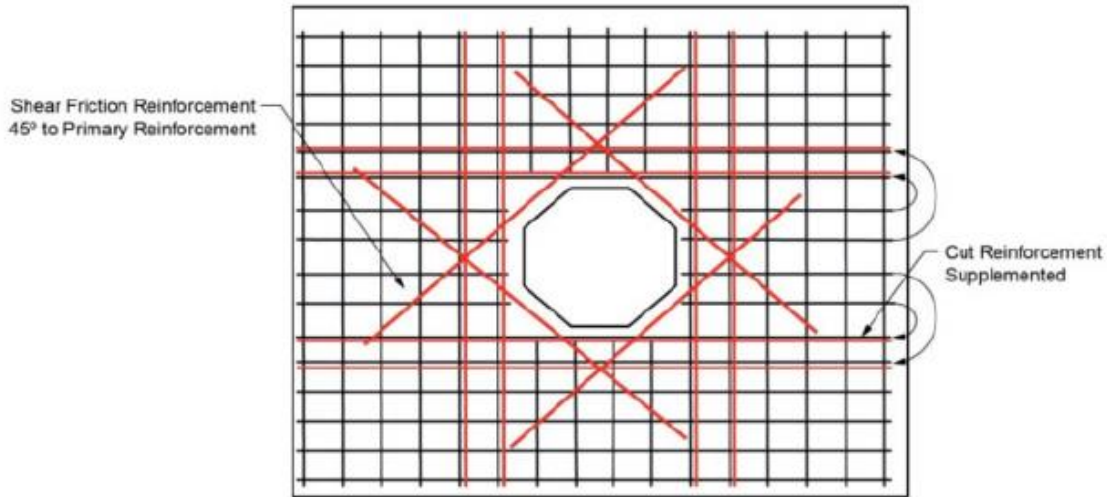


Figura 13: Distribución de la armadura Conexión de enchufe. Fuente: AASHTO LRFD GSABC (2018).

La transferencia de corte en la interfaz de la conexión debe satisfacer los requerimientos de la norma AASHTO LRFD BDS (2017). El factor de cohesión, c , el factor de fricción, m y los factores $K1$ y $K2$ se tomarán como las del hormigón con peso normal colocado sobre una superficie de hormigón limpia excepto para el caso que m no supere los 0.5 cuando la profundidad de empotramiento sea menor a 1.1 veces el diámetro de la columna.

4.5.5.2 Conexión de Enchufe de Columna prefabricada y Pila Sobredimensionada.

Para conexiones de enchufe que tengan una longitud de emplazamiento menor o igual a 1.5 veces el diámetro de la columna, la interfaz de la conexión entre la columna y el shaft debe tener una rugosidad mínima de 0.65 centímetros. La conexión es hormigonada in situ. En la siguiente figura 14 se puede observar un esquema de la conexión enchufe con pila sobredimensionada.

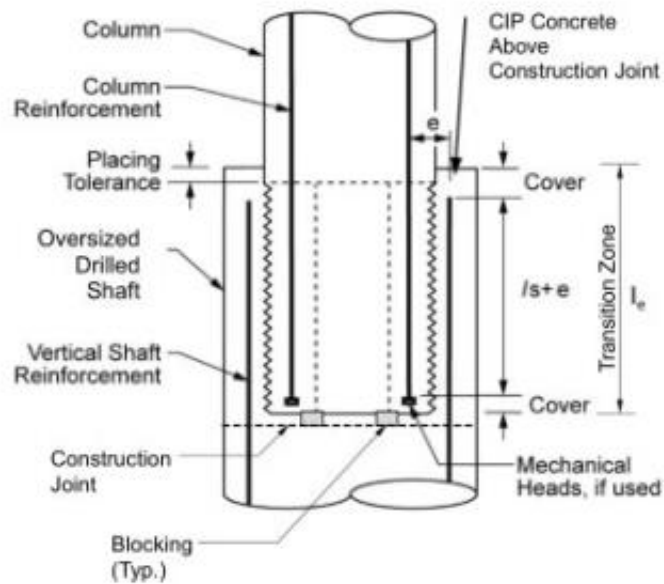


Figura 14: Conexión de enchufe. Fuente: AASHTO LRFD GSABC (2018).

Debajo de la zona de transición se debe colocar concreto con Tremie (Concreto que obtiene sus propiedades de resistencia con la hidratación). La superficie de la junta debe ser limpiada y tapada antes de la construcción de la zona de transición. El concreto en la zona de transición debe ser colocado en seco y vibrado de buena manera.

En un shaft de concreto sobredimensionado la fricción de corte no es necesaria para soportar la fuerza axial de la columna ya que las cargas axiales de compresión pueden ser soportadas por el apoyo final de la columna en el eje. Sin embargo, la fricción de corte es necesaria para transferir cualquier esfuerzo de corte entre la columna y el shaft.

1. Longitud de desarrollo de refuerzo de columna extendido dentro del shaft para conexiones de enchufe.

Las barras de refuerzo de la columna dentro del shaft deben terminar con un anclaje mecánico que debe ser capaz de resistir los esfuerzos de la columna. Las barras deben extenderse en toda la zona de transición del shaft de la pila a una distancia igual a la longitud de empalme determinada por el caso que controle entre las barras de la columna o el shaft. Adicionalmente se debe agregar una longitud de traslape adicional debido a la distancia de las armaduras de la columna y el shaft. La longitud de empotramiento de la columna no debe ser menor que 1 vez el diámetro de la columna y debe cumplir lo siguiente.

$$l_e \geq l_s + e + c$$

Donde:

l_e es la longitud de empotramiento total de la columna en el shaft.

l_s es la longitud de empalme de la barra que controla tomada como $1.7 l_d$ donde l_d es la longitud de desarrollo de la tensión de refuerzo.

e es la mayor distancia desde los centros de las barras de la columna y del shaft.

c es la distancia total del recubrimiento en los extremos de las barras para la columna y el shaft.

Si la comuna prefabricada es construida horizontalmente la longitud de desarrollo debe ser amplificado en 1.4 excepto cuando las barras de la columna incrustadas en el eje sobredimensionado están ancladas con cabezas metálicas.

2. Confinamiento lateral para shaft de pilas sobredimensionadas para conexiones de enchufe.

Se debe proveer un adecuado refuerzo de confinamiento en la zona de la conexión para que los esfuerzos se traspasen debidamente. El refuerzo de confinamiento lateral a lo largo del largo de empotramiento de la columna debe satisfacer lo siguiente.

$$\frac{A_{sh}}{s_{max}} \geq \frac{k * f_{ul} * A_l}{2 * \pi * f_{ytr} * l_s}$$

Donde:

A_{sh} es el área de confinamiento lateral[in].

s_{max} es el espacio entre el confinamiento lateral de acero.

K es factor de eficiencia el cual es 1 sobre la mitad superior de la longitud de empotramiento y 0.5 bajo la mitad.

f_{ul} es el esfuerzo de tracción de las barras longitudinales de la columna [ksi].

A_l es el área total del refuerzo longitudinal [in²].

f_{ytr} es el esfuerzo de fluencia del refuerzo lateral o transversal [ksi].

l_s es la longitud de empalme de la barra que controla tomada como $1.7 l_d$ donde l_d es la longitud de desarrollo de la tensión de refuerzo.

Se realiza la observación que el refuerzo para la mitad superior de la longitud de empotramiento será el doble que la parte inferior. A continuación, se presenta en la figura 15 en donde se explicita la ubicación de los tipos de refuerzo que tendrá el shaft por zonas.

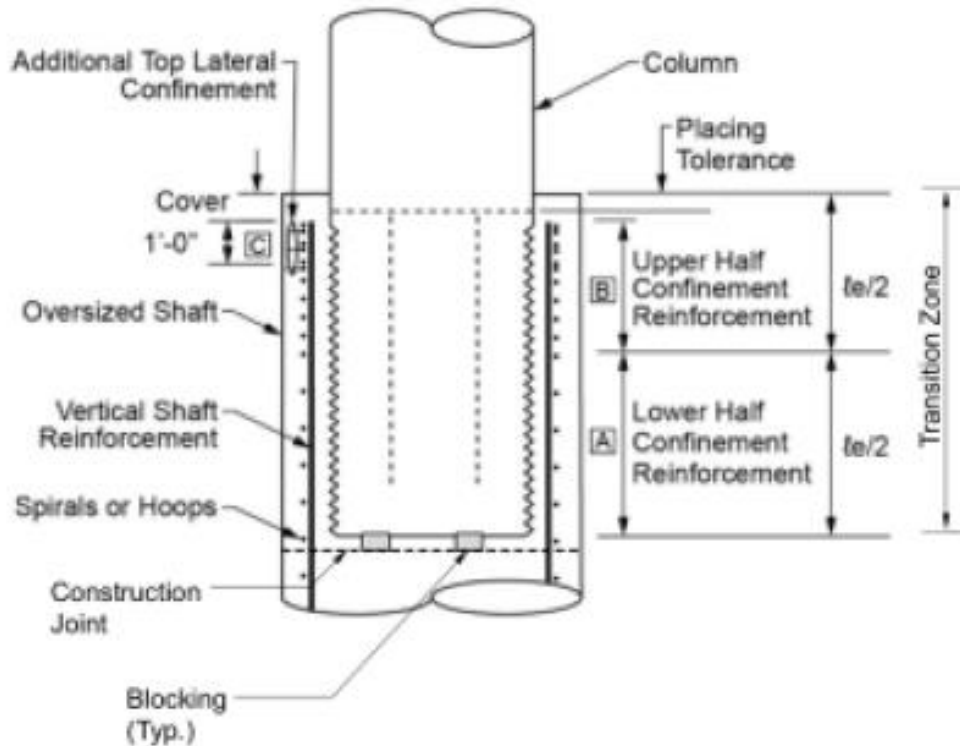


Figura 15: Armadura lateral del shaft. Fuente: AASHTO LRFD GSABC (2018).

En la zona A se tiene un $k=0.5$, en la zona B un $k=1$ y en la zona C la cual tiene como tamaño 30 centímetros tiene un $k=2$. El refuerzo adicional dispuesto en la parte superior del shaft (Zona C), se dispone para proveer el agrietamiento de esta región. La armadura transversal en el shaft requerida para soportar el esfuerzo de corte se debe disponer como espiral o aros alrededor del refuerzo longitudinal del shaft.

4.5.6 Zapatas

Las zapatas prefabricadas de puentes se pueden extender o apoyar sobre los pilotes y se pueden anclar con columnas prefabricadas o elementos de pared de estribo. El tamaño y peso de las zapatas es limitado por los límites establecidos por las normas de cada país para el transporte de carga por carreteras. En caso de exceder estos límites se deben usar extensiones de zapata in-situ, esto tiene como utilidad que la parte prefabricada de la zapata pueda soportar la columna o el segmento de pared para poder permitir la ejecución de las otras etapas de construcción. Una de las soluciones es la colocación in situ y curado posterior de una sección de la zapata diseñada para ser hormigonado después de su ensamble en terreno, todo esto para reducir el peso del prefabricado. (Caltrans).

Las zapatas soportadas por pilotes prefabricados requieren detalles especiales para la conexión entre el pilote y la zapata mediante el uso de una conexión de cavidad o encaje. La disposición del refuerzo en la zapata debe verificarse de acuerdo con el tipo de conexión

elegido (ABC GSABC). Para el montaje de las zapatas prefabricadas se deben usar dispositivos de nivelación para controlar las elevaciones de la base.

4.5.7 Pilotes

Los pilotes se diseñarán de forma convencional de acuerdo con lo expresado en el capítulo 3.1003.303 del Manual de Carreteras (2018) junto con el capítulo 4 de la norma AASHTO LRFD BDS (2017) donde se entregan las disposiciones y criterios para el diseño de fundaciones.

5. Convalidación con Normas Chilenas

Chile es un país que posee una alta actividad sísmica ya que colinda en todo el territorio con la falla de San Ramon, es por esto, que a medida que han tenido lugar sismos de alta magnitud se han creado especificaciones y mejoramiento de normas para las obras de ingeniería. De esta manera el diseño de las estructuras esta actualizado según a las solicitudes que se tendrán debido un futuro evento.

En este capítulo se complementarán los diseños de los elementos propuestos anteriormente con los requerimientos que exige Chile para la construcción de puentes. Los puentes son diseñados siguiendo las disposiciones del Manual de Carreteras Capítulo 3.1000 (2018) en donde se especifican las distintas condiciones que deben cumplir los elementos de la superestructura e infraestructura de acuerdo con la zona sísmica, tipo de suelo y condiciones geográficas que tenga el puente. La mayoría de los diseños de los elementos están basados en la norma AASHTO LRFD BDS (2017) por lo que solo se destacaran los puntos en los cuales el manual hace complementos a dichas normas.

Cabe destacar que se deben agregar todas las consideraciones mencionadas en el capítulo 3.1004 del Manual de Carreteras (2018) el cual corresponde al diseño sísmico de puentes.

A continuación, se presentan las disposiciones que deben complementar a las realizadas anteriormente, para esto se desarrolla un análisis y comparación de los diseños expuestos en la sección anterior y lo mencionado en el Manual de Carreteras.

5.1 Cargas y Combinaciones de Carga.

Con respecto a las cargas, se tienen las siguientes consideraciones:

- Camión de Carga: se debe diseñar los puentes para un camión HS20-44 incrementado un 20%, de no ser así se debe hacer un estudio extra.
- Empuje de tierra: se desarrollan condiciones y alcances para el caso chileno con respecto al diseño en el capítulo 3.1003.4 del manual.
- Fuerzas Sísmicas: En la sección 3.1004 del manual se explicitan las disposiciones que se deben tener en cuenta para respetar el diseño sísmico de las estructuras en Chile. En este capítulo se describen los parámetros, métodos de análisis y los

requerimientos de diseño para los elementos considerando la situación sísmica de Chile.

Se utilizan las mismas combinaciones de cargas que en las descritas en la sección anterior.

5.2 Materiales.

5.2.1 Hormigón Armado.

El hormigón debe cumplir con la norma NCh170 y en particular con lo indicado en la sección 5.501 del manual. Por otro lado, el acero de refuerzo deberá cumplir con la norma NCh204.

Con respecto a los travesaños, se explicita que los travesaños extremos deben ser obligatorios en los puentes emplazados en zona sísmica 3.

5.2.2 Hormigón Pretensado

El hormigón debe cumplir con la norma NCh170 y el acero pretensado deberá cumplir con las normas ASTM A421-80 y A416-80. No se aceptará el uso de cables no adheridos. Al igual que en los requisitos del hormigón armado los travesaños extremos deben ser obligatorios en los puentes emplazados en zona sísmica 3.

5.2.3 Métodos de Análisis

Para determinar las cargas sísmicas para usar en el análisis elástico de los efectos sísmicos se tienen cinco métodos, se encuentran más explicados en el capítulo 3.1004.309 del manual (2018).

- Método del Coeficiente Sísmico.
- Método el Coeficiente Sísmico Modificado por la Respuesta.
- Método Modal Espectral.
- Método Modal Espectral con Estudio de Riesgo Sísmico
- Método de Análisis Lineal o no Lineal en el Tiempo.

Los tres primeros métodos se refieren al análisis sísmico de la superestructura e infraestructura, sin incluir los estribos los cuales son considerados como apoyos. Los métodos de análisis consideran que la superestructura es libre de vibrar sísmicamente sobre los apoyos elastoméricos o similares de los estribos, sin restricciones más que los desplazamientos horizontales, considerando para esto unas juntas de expansión adecuadas.

5.2.4 Factor de Modificación de Respuesta.

Como se dijo anteriormente, el factor de modificación de respuesta divide las fuerzas básicas elásticas por factores de modificación dinámica(R). Estos factores se encuentran tabulados en el Manual de Carreteras Capítulo 3.1000 (2018). Este factor refleja las características de absorción y disipación de energía de la estructura resistente, así como la experiencia sobre el comportamiento sísmico de los elementos a diseñar.

Las conexiones requeridas para los puentes ABC no tiene un alto nivel de experiencia en su ejecución, es más, en Chile no se han realizado proyectos que utilizan de estas conexiones. Es por esto que el factor de modificación de respuesta de las conexiones debe ser menor a todos los anteriores para evitar la formación de rótulas plásticas indeseadas en las conexiones y asegurar que no se produzcan fallas en las conexiones.

6. Diseño de Puente Caso Específico.

En esta sección se desarrolla el diseño del puente San Pablo Antigo mediante el uso de la metodología ABC y convencional. Para ello, se hará una descripción general del puente y luego se generará un diseño mediante la técnica ABC y luego con técnicas convencionales.

6.1 Descripción General de la Estructura.

El Puente San Pablo Antigo perteneciente a la Concesión Américo Vespucio Nor-Poniente está ubicado en la provincia de Santiago, Región Metropolitana. Tiene su entrada del puente en el Dm 0+21,933 y su salida en el Dm 0+66,933 teniendo un largo total de 45 metros. En la figura 16 se muestra la ubicación del puente. Actualmente el puente está en proceso iniciando su proceso de construcción.



Figura 16: Ubicación Puente San Pablo Antigo. Fuente: Google Earth.

El puente San Pablo Antigo se proyecta como una estructura semi integral en donde la superestructura se une con la infraestructura mediante una loseta de continuidad en los estribos, mientras que en su cepa central se une mediante las placas de neopreno.

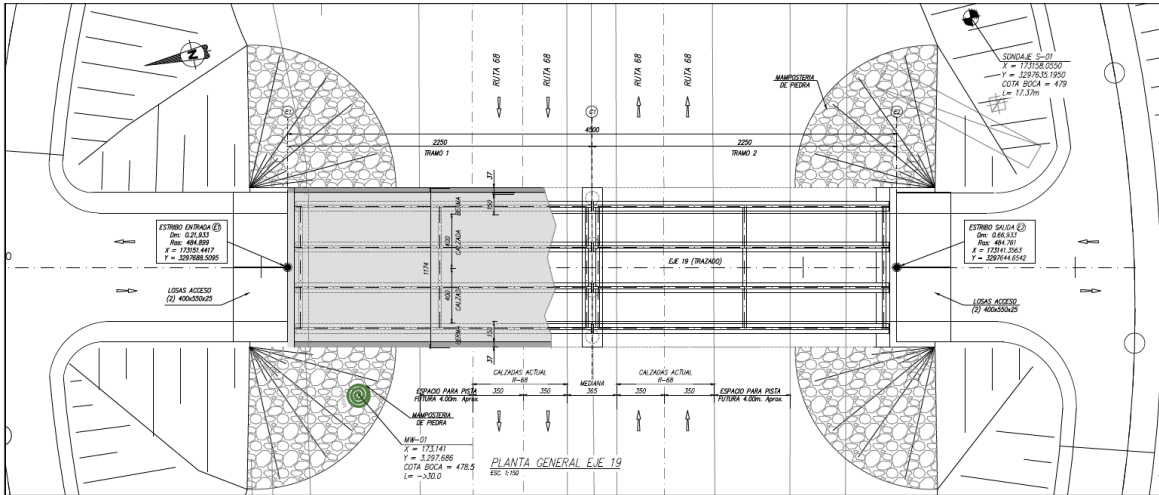


Figura 17: Vista en planta del Puente San Pablo Antigua. Fuente: Planos de Proyecto.

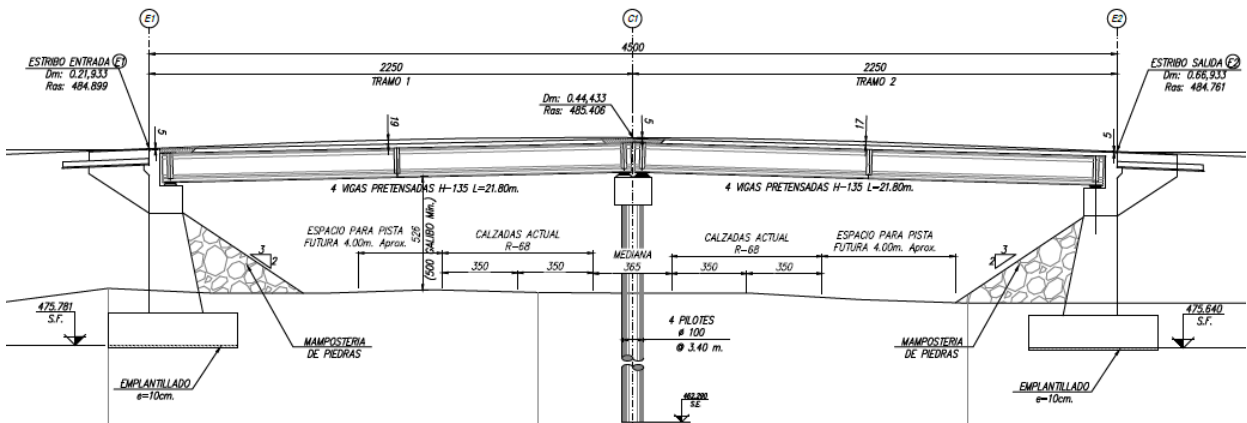


Figura 18: Elevación Longitudinal Puente San Pablo Antigua Fuente: Planos de Proyecto.

La superestructura del puente está constituida por 4 vigas prefabricadas por tramo de 1.35 metros de alto, de 21.8 metros de largo y separadas entre si a 3 metros, las cuales se unen con una losa colaborante de 20 cm.

La estructura tiene un ancho de calzada de 8 metros, bermas a ambos lados de 1.5 metros de ancho y barreras F alta sin pasamanos.

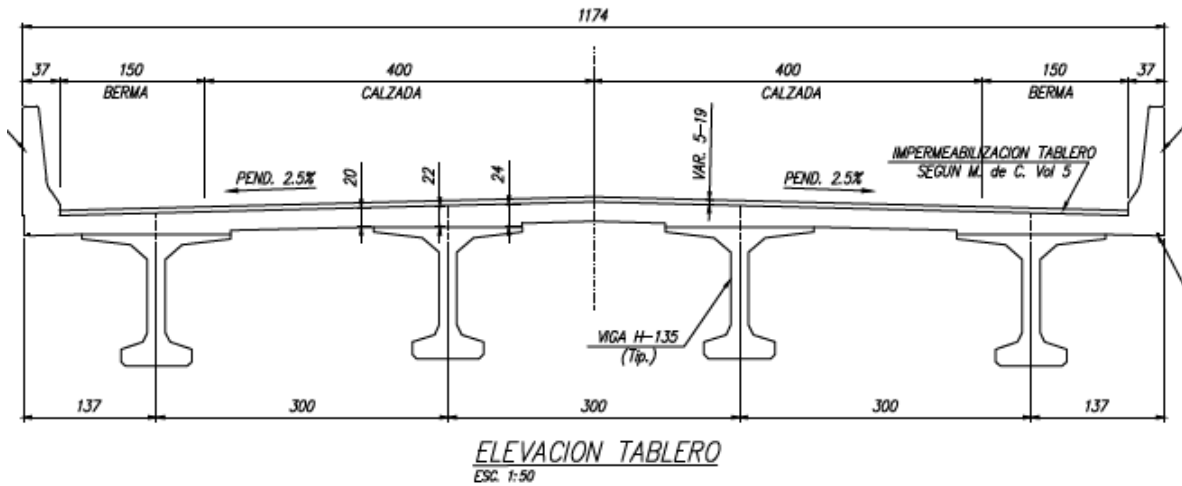
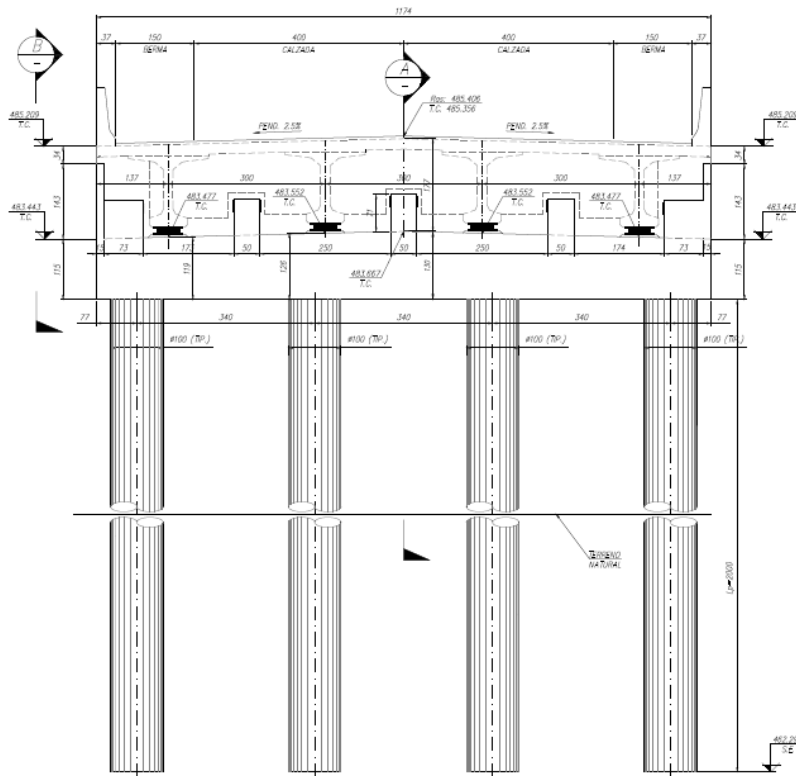


Figura 19: Elevación Tablero Puente San Pablo Antiguo. Fuente: Planos de Proyecto.

La infraestructura del puente se compone de 2 estribos vacíos compuestos por 4 columnas con fundación superficial y una cepa tipo pila pilote constituido por 4 columnas de 1 metro de diámetro espaciadas a 3.4 metros.



ELEVACIÓN CEPA C1
E.C. 1:50

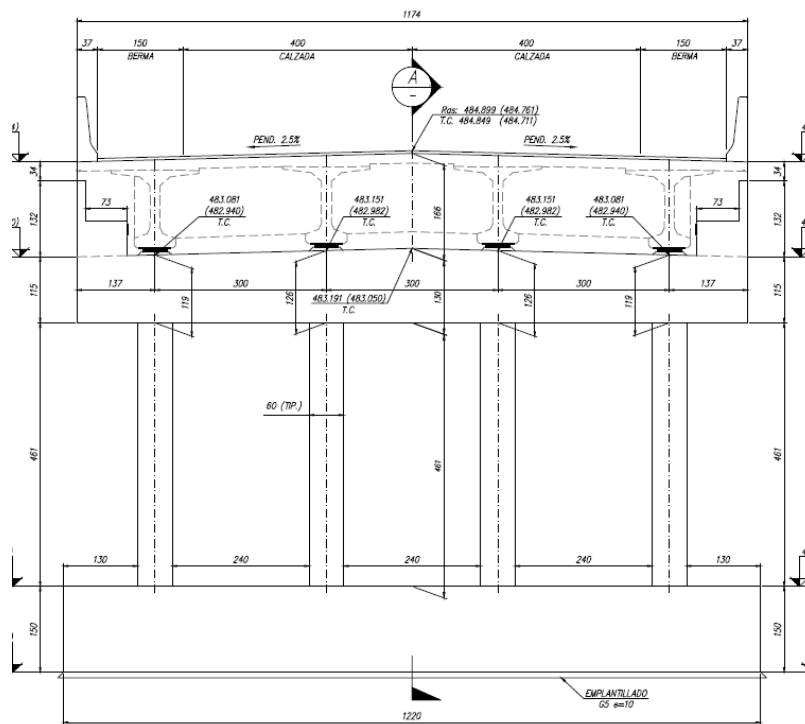


Figura 20: Vista en corte cepa y estribo de Puente San Pablo Antiguo. Fuente: Planos de Proyecto.

6.2 Diseño Mediante Técnica Convencional.

El diseño del puente San Pablo Antiguo fue realizado por la empresa JLS Ingeniería en 2018-2021 siguiendo una metodología tradicional basándose en el hormigonado in situ de los elementos lo que permite tener conexiones húmedas entre los elementos por lo que se evita el diseño de conexiones secas. A continuación, se presenta una explicación de lo realizado por la empresa para luego comparar los diseños previos con los resultados que se obtendrán bajo la utilización de la metodología ABC.

La superestructura estará compuesta por 8 vigas (4 en cada tramo) de hormigón pretensado y una losa hormigonada in situ con la utilización de moldajes. La obtención de los esfuerzos en el caso de la superestructura se obtiene de las cargas de peso muerto, cargas vivas y sobrepesos mediante el uso de las combinaciones de cargas dispuestas por la norma AASHTO LRFD GDS explicitadas anteriormente.

La infraestructura está compuesta por 4 columnas hormigonadas in situ las cuales poseen la misma dimensión que los pilotes, generando una cepa pila-pilote. La cepa también es hormigonada in situ. Para el diseño de esta, se analiza en el sentido longitudinal como una estructura enterrada, donde las solicitaciones estáticas se determinan mediante una teoría de empujes de Coulomb y Rankine (1800 y 1840), mientras que las solicitaciones sísmicas se estiman mediante el modelo cinemático descrito en el Manual de Carreteras (2018). Para las solicitaciones sísmicas en el sentido transversal de la estructura se analizan mediante método modal espectral.

Se utiliza un modelo de elementos finitos, 3D desarrollado en SAP2000 para el análisis estructural en sentido longitudinal a la estructura, mientras que para el análisis estructural en sentido transversal de la estructura se realiza un modelo de elementos finitos, 3D en SAP2000. Ambos modelos se realizan según la geometría mostrada en los planos del proyecto estructural, y planillas de cálculo de elaboración por parte de la empresa JLS Ingeniería donde se incorporan las propiedades de los elementos, geometrías y las cargas estáticas y sísmicas de acuerdo las normativas vigentes.

En el modelo en SAP 2000 todos los elementos se modelan como frame (barras) los que trabajan en dos direcciones principales a flexión, considerando la rigidez axial del elemento.

Debido a que tanto la super e infraestructura son mayoritariamente elemento hormigonados in situ no se necesita realizar el cálculo de conexiones entre los elementos.

La superestructura se une a la infraestructura a través de elementos link, a los que se les asignan las propiedades de las placas de apoyo dispuestas, de esta forma se considera la rigidez vertical y horizontal de estas.

En el anexo 1 se encuentra la memoria de cálculo del puente San Pablo Antiguo la cual contiene el desarrollo del diseño para el puente, los planos oficiales y la mecánica de suelos que se utilizó para llevar a cabo este proyecto.

6.3 Diseño Mediante Técnica ABC.

Los puentes ABC pueden ser construidos mediante muchas técnicas como el uso de maquinaria especial para el transporte de los tableros completamente prefabricados (máquinas SMPT), el uso de gatos hidráulicos para desplazar el tablero nuevo a su posición, mediante la utilización de grúas las cuales ensamblan los elementos prefabricados por medio de uniones, entre otras. Para este caso se utilizarán grúas para el ensamble de los elementos ya que estos contemplan columnas, vigas y secciones del tablero prefabricadas por lo que no es necesario invertir en la maquinaria o pensar en el uso de gatos hidráulicos.

En este diseño solo se abarcarán los elementos descritos en el alcance de esta memoria de título los cuales corresponden a las vigas prefabricadas, tablero prefabricado, columnas prefabricadas, cepas prefabricadas y sus respectivas conexiones. A continuación, se presenta una descripción de cómo se abordará el diseño siguiendo una metodología ABC para el puente San Pablo Antiguo.

La superestructura estará compuesta por 8 vigas (4 en cada tramo) de hormigón pretensado la cual es diseñada de manera convencional y un tablero compuesto por paneles prefabricados. Adicionalmente, se deben agregar llaves de corte en el ala superior para realizar la conexión a corte con el tablero prefabricado mediante *pocket connections* para asegurar el comportamiento monolítico del tablero y las vigas. Los prefabricados del tablero tendrán su mismo largo y como ancho la mitad de la separación entre vigas. Los paneles se deben diseñar para la flexión transversal.

La unión longitudinal entre los prefabricados se ejecutará mediante un postensado, el cual unirá todos los prefabricados del tablero. Se presenta a continuación una figura que destaca los elementos o conexiones que se modificarán del puente para utilizar la metodología ABC en el caso de la superestructura.

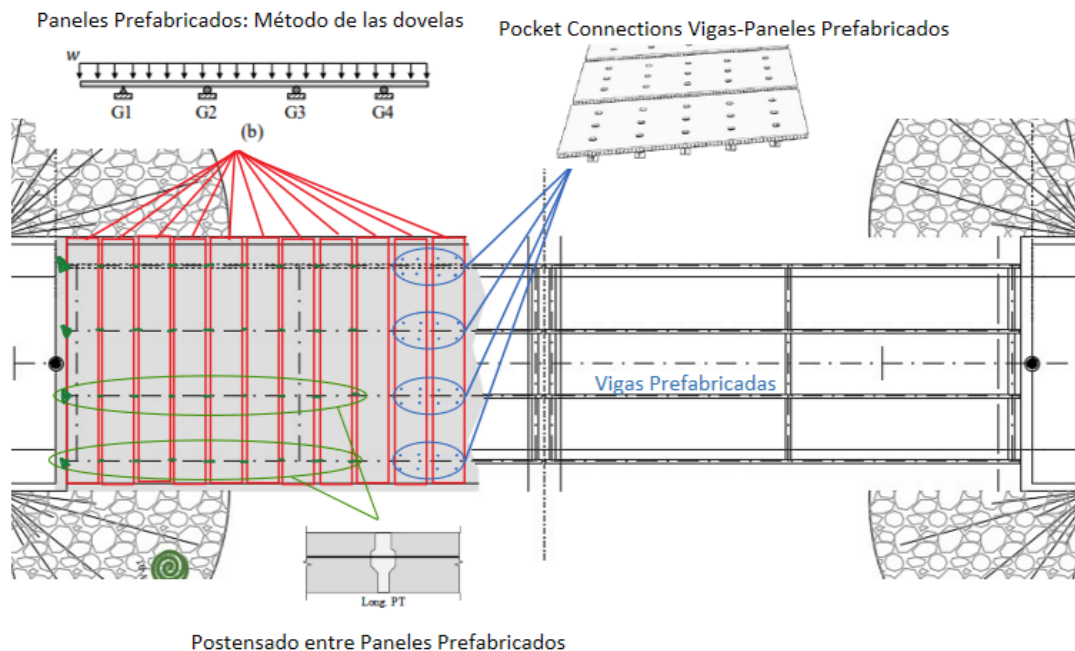


Figura 21: Elementos y conexiones a diseñar superestructura. Fuente: Planos de Proyecto modificados.

Notamos que para diseñar transversalmente el tablero se utilizará el método de las dovelas, el cual considera una sección del tablero como una viga *simplemente apoyada*. El refuerzo longitudinal por otro lado debe ser suficiente para distribuir las cargas vivas, este diseño incluye las conexiones de corte viga-tablero el cual debe cumplir un comportamiento compuesto entre estos elementos. Los esfuerzos en el caso de la superestructura se obtienen de las cargas de peso muerto, cargas vivas y sobrepesos mediante el uso de las combinaciones de cargas dispuestas por la norma AASHTO LRFD GSABC 2021 explicitadas anteriormente.

Por su parte, la infraestructura que se diseñará contempla las columnas del estribo y cepa, el cabezal y las conexiones. Las columnas se prefabricarán para luego ser conectadas con los pilotes y el cabezal prefabricado en el caso de la cepa. Esto se realizará mediante conexiones de enchufe para el caso de los pilotes y conexión de bolsillo para conectar con el cabezal. Adicionalmente, para el caso del estribo se utilizarán conexiones de enchufe para unir las columnas con la fundación. Ambas uniones se diseñan para traspasar la flexión, esfuerzo de corte y compresión. Se presenta a continuación una figura que destaca los elementos y conexiones que se modificarán del puente para utilizar la metodología ABC en el caso de la cepa y estribo.

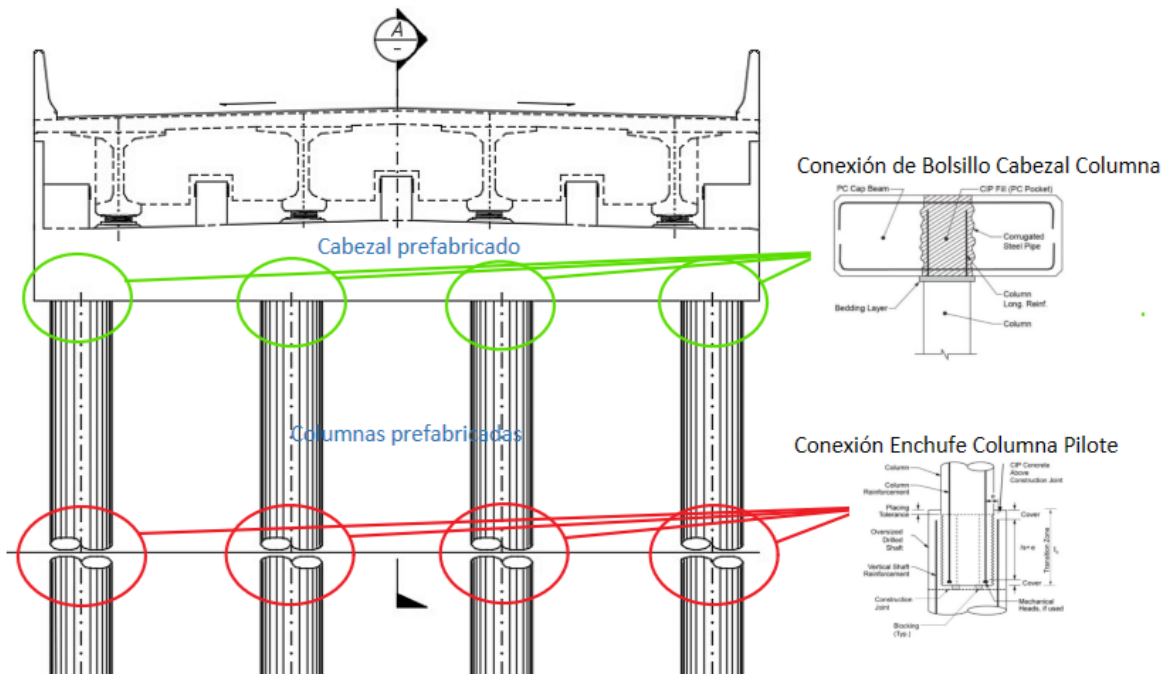


Figura 22: Elementos y conexiones a diseñar cepa. Fuente: Planos de Proyecto modificados.

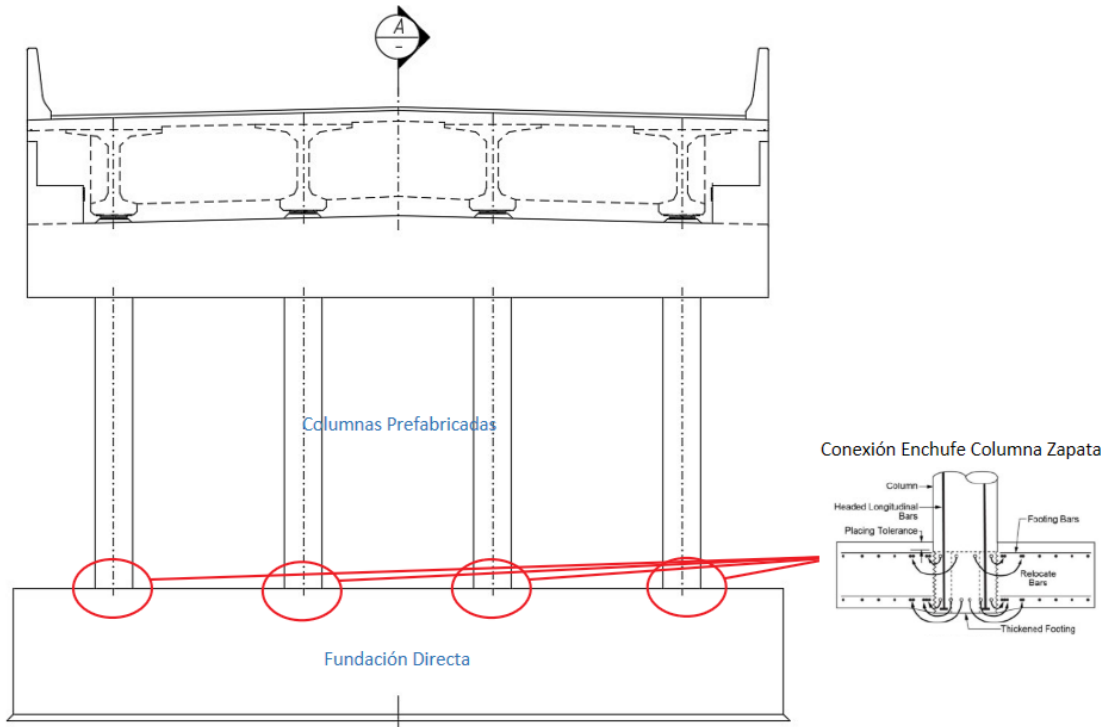
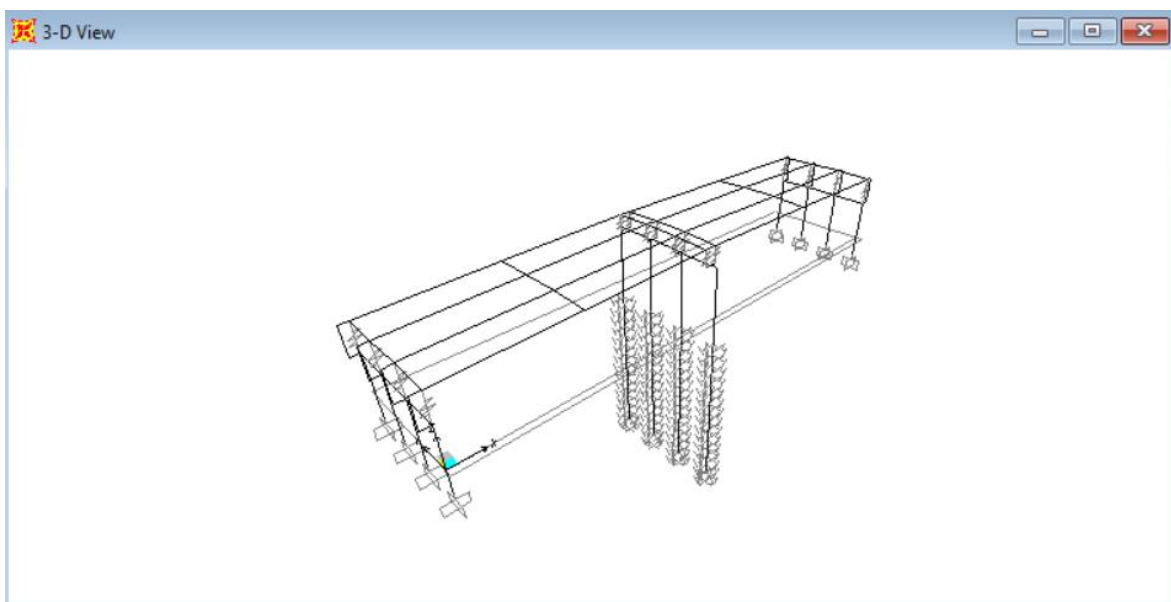


Figura 23: Elementos y conexiones a diseñar estribo. Fuente: Planos de Proyecto modificados.

Notamos que para realizar la conexión columna pilote se debe contar con que estos sean de un diámetro mayor a la columna, ya que debe empotrarse en el pilote quedando con una longitud de desarrollo de 1.5 veces el diámetro de la columna. Paralelamente, en la conexión cepa columna se debe tener un especial cuidado al momento de diseñar los fierros de anclaje en la conexión de bolsillo, ya que debe tener una longitud de emplazamiento de al menos 60 veces el diámetro y la distancia entre la armadura de la columna. Además, el tubo corrugado debe ser mayor que 1.5 veces del agregado más grande.

La obtención de los esfuerzos para el diseño de los elementos y las conexiones de la infraestructura se realiza mediante la utilización del programa de análisis estructural SAP2000. En el modelo se representan como frames los elementos que trabajen en dos direcciones principales a flexión considerando la rigidez axial del elemento. La superestructura se une a la infraestructura a través de elementos link, a los que se les asignan las propiedades de las placas de apoyo dispuestas, de esta forma se considera la rigidez vertical y horizontal de estas. Se muestra a continuación el modelo realizado en SAP2000 para su mejor entendimiento.



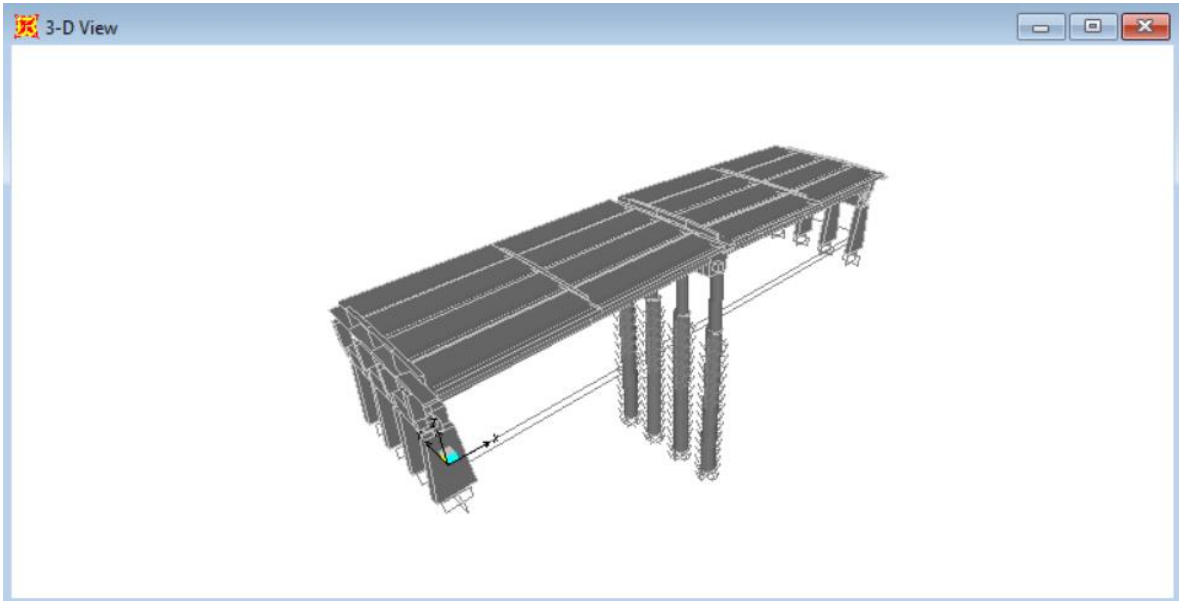


Figura 24: Modelo SAP2000.

6.3.1 Diseño de Superestructura.

6.3.1.1 Vigas Prefabricadas H=1.35m.

Las vigas prefabricadas serán de igual dimensión, material y tamaño que la del método de construcción convencional con la diferencia que se debe agragar el refuerzo de las llaves de corte que unirán el tablero con la viga y permitirá un comportamiento monolítico de estos.

6.3.1.2 Tablero Prefabricado.

Como se mencionó anteriormente el tablero estará compuesto por paneles prefabricados, los cuales tendrán un largo de 11.75 metros (ancho del tablero) y un ancho igual a la mitad de la separación entre vigas igual a 1.5 metros. Para el diseño transversal se utilizará el método de las dovelas, el cual consiste en diseñar una sección del panel prefabricado con un ancho de 30 centímetros *simplemente apoyado en las vigas*. Este diseño considera tanto la carga y metodología de izaje como las combinaciones de carga de servicio, se debe tener en cuenta la inclinación que tenga el prefabricado, ya que este debe tener una pendiente de 2.5% desde el centro al borde del tablero.

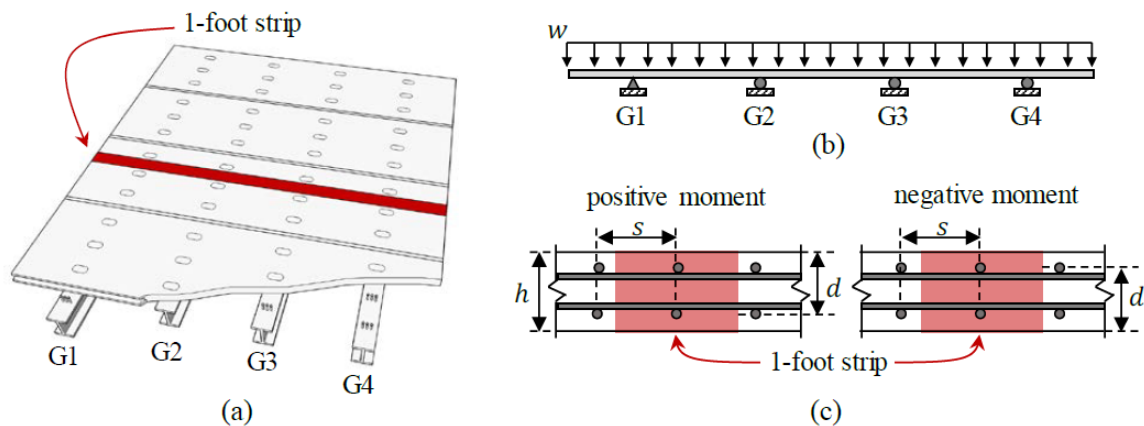


Figura 25: Paneles prefabricados y método de las dovelas. Fuente: ABC UTC Guide to FDPC Decks Panels (2019).

Para el diseño de los paneles prefabricados se considera la combinación de carga correspondiente al izaje de los elementos, estas combinaciones se encuentran mencionadas en la tabla 5 del presente documento mencionada en la norma AASHTO LRFD GSABC (2021), estas combinaciones se encuentran mencionadas en la tabla 5 del presente documento. Esta se presenta en el estado de construcción que no está presente cuando el puente se encuentra en el estado de servicio. Se muestran los coeficientes utilizados para estas combinaciones de carga.

Estados Límites	Combinaciones
Servicio I	$\gamma_h DL$
Esfuerzo I	$\gamma_h \gamma_p DL$

Donde:

DL corresponden a las cargas muertas.

y_h corresponde al factor dinámico de la carga muerta por manipulación de elementos prefabricados.

y_p corresponde al factor de carga muerta como especifica la “AASHTO LRFD BDS”

A continuación, se presentan los valores de los coeficientes que recomienda la norma.

$y_h = 1.2$ para manejo y montaje en obra.

$y_h = 1.5$ para el transporte.

$y_p = 1.25$ según la tabla 3.4.1.1 de la norma AASHTO LRFD BDS.

Considerando estos factores de carga se procede a modelar los tableros en el programa SAP2000 utilizando el método de las dovelas. Se muestra el desarrollo a continuación.

Cálculo Paneles Prefabricados:

Espesor Losa:	e	0.20 m
Espesor Losa Equivalente:	eq	0.20 m
Espesor Pavimento:	ep	0.10 m
Separacion entre vigas, S:	s	3.00 m
Ancho ala superior viga, $b_{superior}$:	bsuperior	0.50 m
Separacion efectiva viga, S_o :	So	2.75 m
Peso Hormigon:	ρ_h	2.50 ton/m ³
Peso Pavimento:	ρ_p	2.40 ton/m ³
Tensión fluencia de la armadura	f_y	Mpa
Resistencia especificaa del hormig f'c		25 MPa

Largo prefabricado:	L1	11.75 m
Ancho prefabricado:	L2	1.5 m

Diseño armadura transversal: Método de las dovelas ancho de 1 pie

Ancho de diseño	a	0.3 m
Largo de diseño	b	11.74 m

Peso baranda: 0.625 ton/m

Cargas Muertas

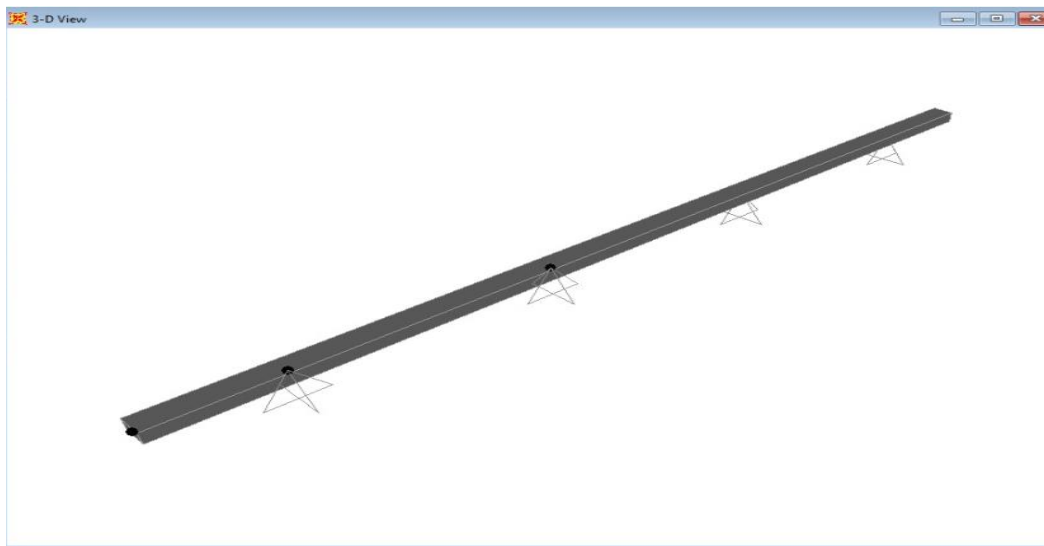
Peso Hormigón	DC	0.15 ton/m
Peso Pavimento	DW	0.072 ton/m
Peso Barreras	DB	0.1875 ton por lado

Cargas Vivas

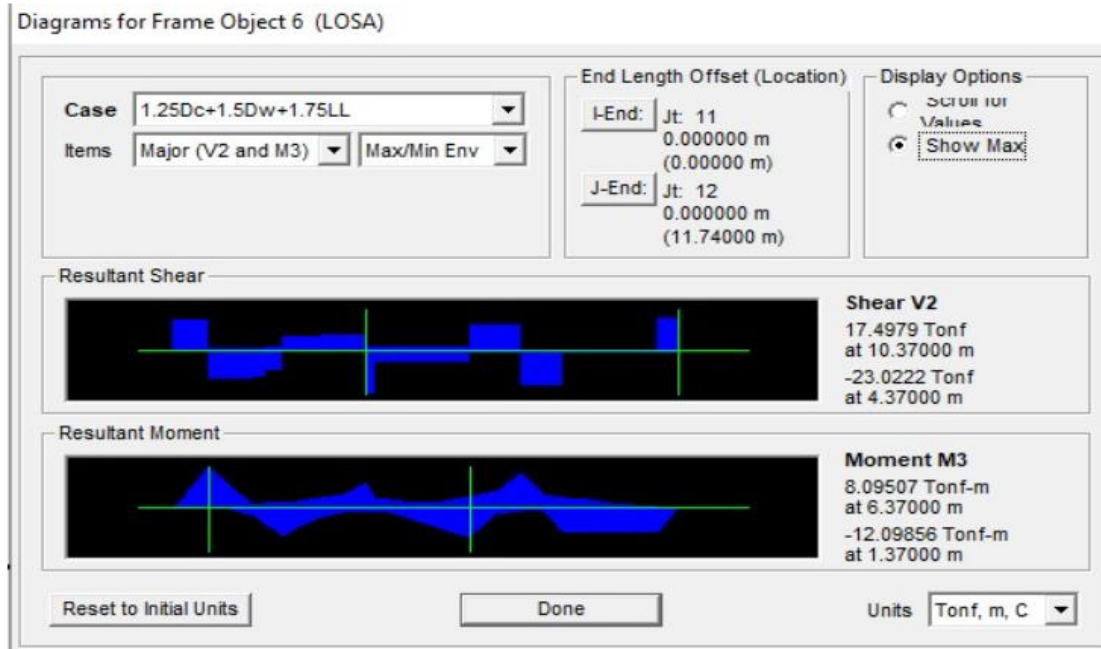
Camión HL-93

Se trabajó en SAP2000 para obtener las solicitaciones

Modelo 3D



Esfuerzos producto de la combinación de carga crítica $\mu = 1.25*DC+1.5*DW+1.75*(LL+IM)$



ARMADURA TRANSVERSAL

	Momento Positivo	Momento Negativo
$\mu = 1.25*DC+1.5*DW+1.75*(LL+IM)$	8.09 ton m	12.09 ton m
f'_c , G35:	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²
F_y A630-420H:	4200 kg/cm ²	4200 kg/cm ²
b:	60 cm	60 cm
r:	2.5 cm	2.5 cm
d:	17.5 cm	17.5 cm
$A_{calculada}$:	14.10 cm ²	23.45 cm ²
A_{min}	1.89 cm ²	1.89 cm ²
$A_{requerida}$	14.10 cm ²	23.45 cm ²
Usar	Φ 16 @ 15 cm +S Φ 16 @ 15 cm	Φ 20 @ 15 cm +S Φ 18 @ 15 cm
	16.08 cm ²	22.75 cm ²

OK!, Cumple \pm 5%

OK!, Cumple \pm 5%

Se obtiene una armadura transversal de barras de 16 milímetros espaciadas a 15 centímetros junto suples de las mismas características para el momento positivo y barras de 20 milímetros de diámetro espaciadas a 15 centímetros sumado a suple de barras de 18 milímetros espaciados a 15 centímetros para resistir el momento negativo. Se comenta que las combinaciones de carga de izaje no son dominantes por lo que no se mencionan en el diseño.

Adicionalmente, el diseño longitudinal del tablero se realizará mediante un postensado el cual conectará todos los paneles prefabricados que componen el puente. Para el diseño se considera que el postensado pasa por la línea neutra del tablero por lo que no tiene excentricidad, solo produce cargas de compresión. Siguiendo las disposiciones de la Norma

AASHTO GSABC (2021), se debe tener una tensión mínima de 1.75 MPa después de la ocurrencia de las pérdidas instantáneas y perdidas en el tiempo.

Se consideran que las perdidas corresponden al 25% de la tensión final del cable por lo que se dispondrá una tensión de 2.2 MPa en un inicio para que la tensión después de las pérdidas sea la indicada por la norma. Se utilizan cables A continuación se presenta una planilla con el desarrollo y los cálculos del postensado del tablero.

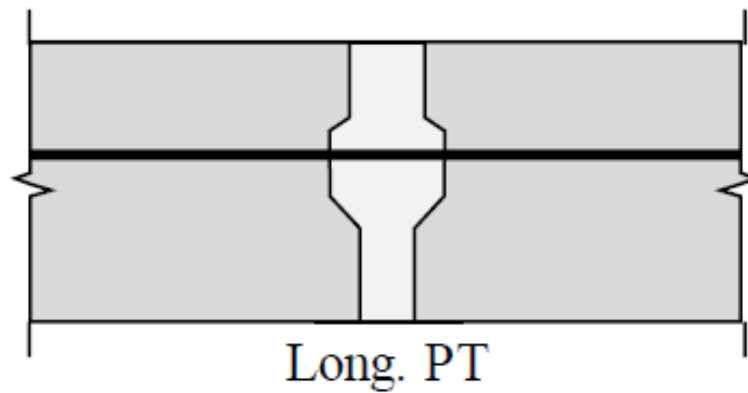


Figura 26: Postensado Longitudinal Paneles Prefabricados. Fuente: ABC UTC Guide to FDPC Decks Panels (2019).

Cálculo Postensado Paneles Prefabricados Tablero:

Dimensiones Tablero

Largo prefabricado	L1	11.75 m
Ancho prefabricado	L2	1.5 m
Espesor prefabricado	e	0.2 m

Cables baja relajación 270 ksi

Diámetro	D	12.7 mm
Area	Ac	0.987 cm ²
Tensión Rotura	fr	18982.9 kg/cm ²
Tensión de Diseño	fy	14237.2 kg/cm ²

Datos Diseño

Tensión Mínima Postensado	fmin	18 kg/cm ²
Factor por Perdida	b	1.3
Tensión Postensado Final	fe	23.4 kg/cm ²
N°Ramas Postensado	N	6
Largo por rama	Ls	2.0 m
Seccion por rama	S	0.39 m ²

Fuerza por rama

Fuerza requerida	P	91650 kg
Area Cables por Sección	Acs	6.44 cm ²
N°Cables por Sección	Ns	7

Se obtiene que debe haber ramas de 6 cables de acero 270 ksi de baja relajación de 0.5" de diámetro espaciados a 2 metros longitudinalmente en los paneles prefabricados. Esto tomando en cuenta los efectos de perdidas instantáneas y en el tiempo como un 30% de manera conservadora.

Los paneles prefabricados tendrán en sus extremos la enfierradura de las barreras dispuestas para luego hormigonarlas in situ. Para el hormigonado de estas, luego de la instalación de los paneles y su postensado, se instalará la enfierradura faltante para luego disponer el moldaje y realizar el -hormigonado. Se presentan imágenes ilustrativas a continuación.

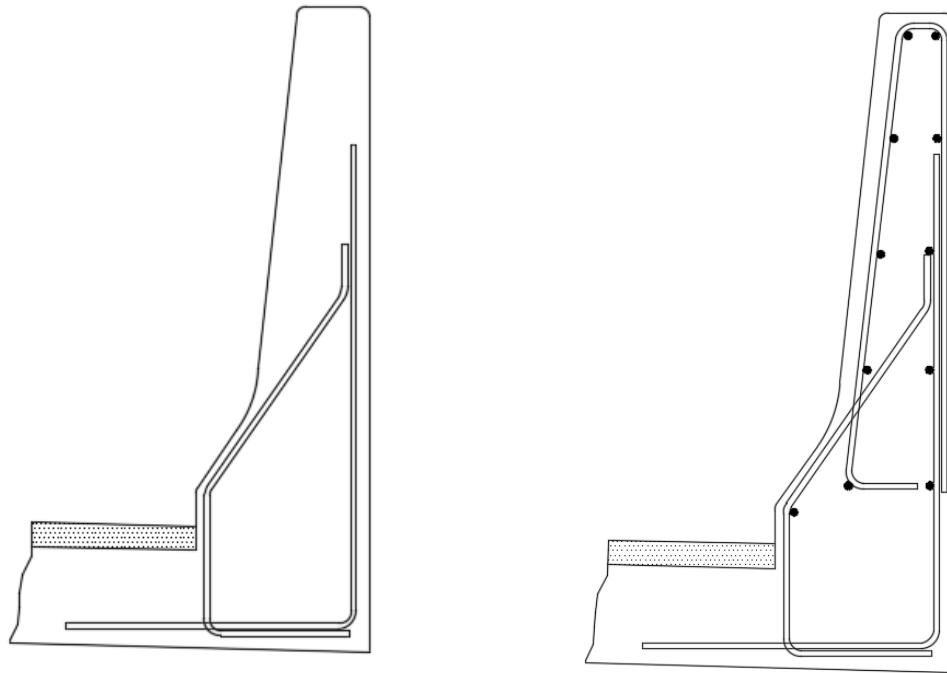


Figura 27: Construcción Barreras. Fuente: Elaboración Propia.

En la figura de la izquierda se encuentran los fierros dispuestos en los paneles prefabricados, como se dijo anteriormente, luego de la instalación de los paneles prefabricados en el tablero, se instala la armadura restante en la barrera, la mostrada en la figura de la derecha, para luego realizar el hormigonado de estas.

Con respecto a la forma de levantar e instalar los paneles prefabricados, se realizará con la utilización de grúas, estas tendrán anclada una barra de acero muy rígida (para que no se deforme) anclada al gancho automático. A partir de esta barra se dispondrán cables para levantar el tablero, los cuales deben simular la misma forma del diagrama de momento del panel en servicio, por lo que se anclará el panel en la zona por donde se encontrarán las vigas. Para esto se debe calcular esta nueva combinación de carga expresada en la AASHTO LRFD GSABC (2021). A continuación, se presenta un diagrama explicativo.

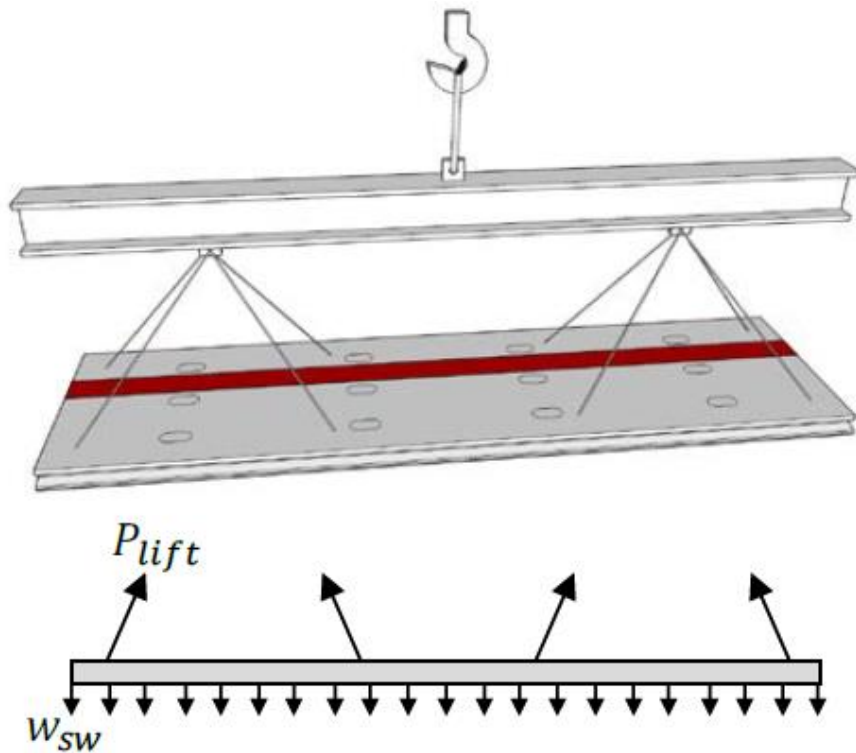


Figura 28: Metodología de izaje de Paneles Prefabricados. Fuente: ABC UTC Guide to FDPC Decks Panels (2019).

6.3.1.3 Conexión Tablero Viga.

Las vigas y los prefabricados del tablero se unirán mediante conexiones de corte para generar un comportamiento conjunto de ambos elementos. Estas deben resistir el movimiento vertical y horizontal entre las secciones. Por ende, se diseñará utilizando la sección 5.8.4 de la Norma AASHTO LRFD BDS (2017). A continuación, se presenta el desarrollo en una planilla.

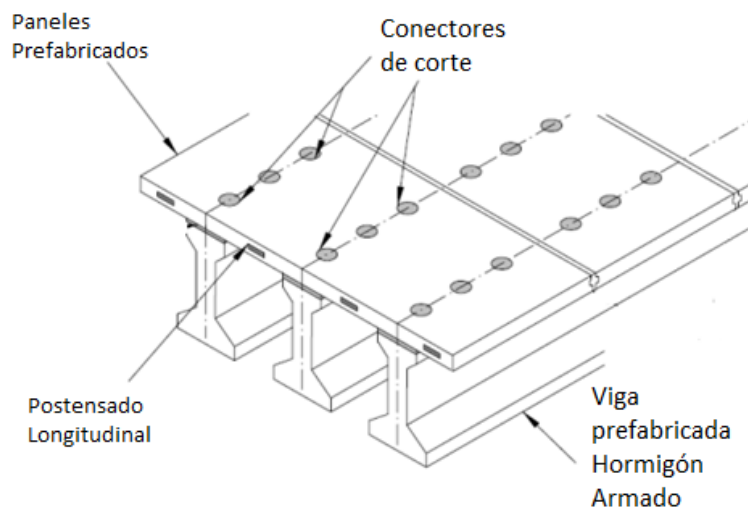


Figura 29: Conectores de Corte para Paneles Prefabricados. Fuente: Recommendations for the Connection Between Full-Depth Precast Bridge Deck Panel Systems and Precast I-Beams (2007).

Cálculo conexiones de corte Panel-Viga:

Solicitaciones

Esfuerzo de corte entregado por SAP2000	V	150000 N
---	---	----------

Largo prefabricado	L1	11.75 m
Ancho prefabricado	L2	1.5 m
Espesor prefabricado	e	0.2 m

Largo agujero de conexión	l1	20 cm
Ancho agujero de conexión	l2	20 cm
Separación entre agujeros	d	45 cm

Enfierradura a corte

Diámetro	D	16 mm
Cantidad	N	4

Area del hormigón que participa	Acv	40000 mm ²
Area armadura corte que atraviesa plano	Avf	804.2477 mm ²
Tensión fluencia de la armadura	fy	411 MPa
Lambda	l	1
Factor de cohesión	c	0.52 MPa
Coefficiente de fricción	mu	0.6 -
Fuerza de compresión permanente neta normal al plano de corte	Pc	0 N
Resistencia Hormigón	f'c	30 MPa
	bv	200 mm

Condicion de resistencia al corte	Vnr	220000 N
Resistencia nominal al corte del plano de interface	Vn	219127.5 N

Factor de utilización	FU	0.684533 Cumple con 1.05%
-----------------------	----	---------------------------

Se obtiene que los conectores de corte deben estar separados a 45 centímetros en el eje longitudinal de las vigas, deben tener dimensiones de 20x20 centímetros y 4 barras de acero de 16 milímetros de diámetro en cada conexión de corte. Estas conexiones se deben hormigonar previamente a la pavimentación del tablero, una vez que los paneles prefabricados estén instalados.

6.3.2 Diseño Infraestructura.

6.3.2.1 Diseño Pilotes.

Los pilotes deben tener un sobredimensionamiento para que se pueda aplicar la conexión de enchufe con las columnas de la cepa. Se modificará el diámetro del diseño convencional y se tendrán pilotes de 1.5 metros, con esto se está considerando que el shaft que recibirá a la columna tendrá un espesor de 23 centímetros.

Para calcular esto se indica que el espesor del shaft debe ser mayor a la siguiente expresión:

$$e = 2 * rec + d_{barras} + 2 * a$$

Donde:

e es el espesor del shaft.

rec es el recubrimiento exigido por el Manual de Carreteras (2018) para los pilotes.

a corresponde al diámetro del agregado más grande del hormigón que se utiliza para la junta.

Tomando en cuenta que se está aumentando la sección, de manera conservadora se utiliza la misma armadura longitudinal y transversal del diseño con métodos convencionales siempre y cuando se tenga una cuantía mayor al 1%. Se muestra a continuación la cuantía obtenida con la misma armadura que el diseño convencional.

Cálculo Pilotes:

Materiales

Hormigón

Grado del Hormigón	G 25	-
Resistencia cilíndrica	250	kg/cm ²
Factor de reducción	0.85	ACI318
Modulo de elasticidad, E _c	235,000	kg/cm ²

Acero

Calidad	A630-420H	-
Tensión de fluencia, F _y	4,200	kg/cm ²
Modulo de elasticidad, E _s	2,100,000	kg/cm ²

Geometría de la sección

Diámetro de la sección	1.50	m
Recubrimiento	7.50	cm
Tamra del arido	20	mm

Armadura longitudinal

Primera capa

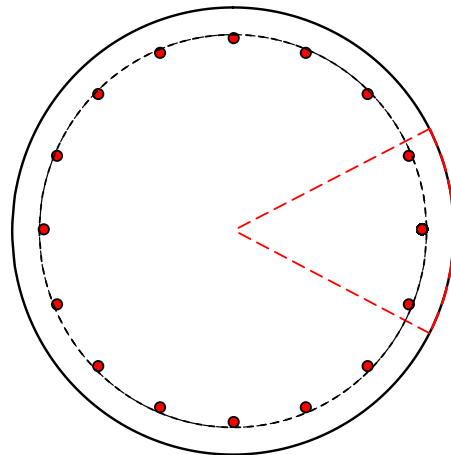
Cantidad de barras	16	-
Diámetro	Φ25	-
Separación libre	23	cm
Separación libre en traslape	20	cm

Segunda capa

Separación 1ra-2da capa	7.5	cm
Cantidad	0	-
Diametro	Φ40	-
Separacion entre 1ra-2da	6.5	cm
Sep. libre entre barras		cm
Sep. libre en traslape		cm

Cuantía de la sección	0.45	%
-----------------------	------	---

Se dispone: 1ra capa 16 Φ 25



Se observa que al aumentar la sección la cuantía se reduce a 0.45% por lo que es necesario aumentar la armadura para cumplir con la cuantía mínima de acero. Se presenta a continuación la nueva armadura para los pilotes.

Cálculo Pilotes:

Materiales

Hormigón

Grado del Hormigón	G 25	-
Resistencia cilíndrica	250	kg/cm ²
Factor de reducción	0.85	ACI318
Modulo de elasticidad, E _c	235,000	kg/cm ²

Acero

Calidad	A630-420H	-
Tensión de fluencia, F _y	4,200	kg/cm ²
Modulo de elasticidad, E _s	2,100,000	kg/cm ²

Geometría de la sección

Diámetro de la sección	1.50	m
Recubrimiento	7.50	cm
Tamra del arido	20	mm

Armadura longitudinal

Primera capa

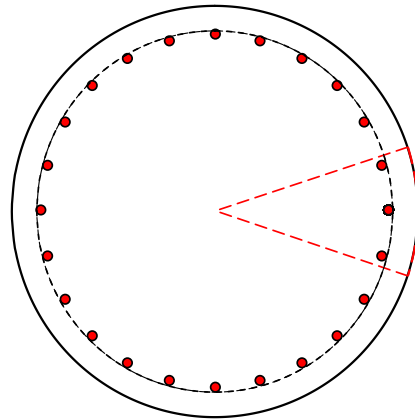
Cantidad de barras	24	-
Diámetro	Φ32	-
Separación libre	15	cm
Separación libre en traslape	10	cm

Segunda capa

Separación 1ra-2da capa	7.5	cm
Cantidad	0	-
Diametro	Φ40	-
Separacion entre 1ra-2da	6.5	cm
Sep. libre entre barras		cm
Sep. libre en traslape		cm

Cuantía de la sección	1.10	%
-----------------------	------	---

Se dispone: 1ra capa 24 Φ 32



Se obtiene una armadura longitudinal de 24 barras de 32 milímetros de diámetro para obtener una cuantía mayor al 1%. Se mantiene la armadura transversal ya que se tienen las mismas sollicitaciones que en el diseño convencional.

6.3.2.2 Columna Prefabricada Cepa.

El diseño de la columna prefabricada se realiza mediante el uso de las curvas de interacción con una planilla, para esto se consideran las sollicitaciones de tanto el modelo estático como el dinámico. Se obtiene la misma armadura longitudinal y de corte que con el diseño convencional. Se presenta a continuación una planilla que contiene los refuerzos de corte y confinamiento de la columna.

Cálculo Columna Prefabricada:

Solicitaciones máximas SAP2000

Momento:	23.04 Ton m /pilote
Corte:	36.15 Ton /pilote
Compresión:	139.48 Ton /pilote

Materiales

Hormión

Calidad del Hormigón	G25
Resistencia cilíndrica, $f'c$	25 MPa

Acero de refuerzo

Calidad del acero	A630-420
Tensión de fluencia, F_y	420 MPa

Geometría

Longitud libre del Pilote:	417 cm
Diámetro Pilote, D:	100 cm
Recubrimiento, rec:	7.5 cm
Diámetro Exterior, De:	77 cm
Area de la sección, Ag:	7854 cm ²
Area confinada, Ac:	4663 cm ²
As min:	79 cm ²
Armadura dispuesta:	1ra capa 16 Φ 25
Cuantía	1.00 %

Corte

Armadura longitudinal:	Φ 25 -
Nº de Barras:	16 -
Dr:	80 cm
de:	75
dv:	68 cm
bv:	100 cm
Vc:	57 Ton
Φ Vc:	51 Ton
Vu:	36 Ton

Disponer Armadura de Confinamiento

Armadura de Confinamiento

Longitud de rotula plástica:	100 cm
ρ min. en rotula plástica:	0.71% -
Espaciamiento vertical max :	7.5 cm
Armadura estribos:	Φ 12
Espaciamiento estribos:	7.5 cm
ρ en rotula plástica:	0.77% Cumple
Armadura a disponer:	Φ12 @ 7.5

Armadura Fuera de la Rótula Plástica

Espaciamiento vertical max :	15 cm
Espaciamiento estribos:	15 cm
Av/s min:	1.48 cm ²
Armadura estribos:	12 Φ
Armadura a disponer:	Φ12 @ 15 Armadura Ok

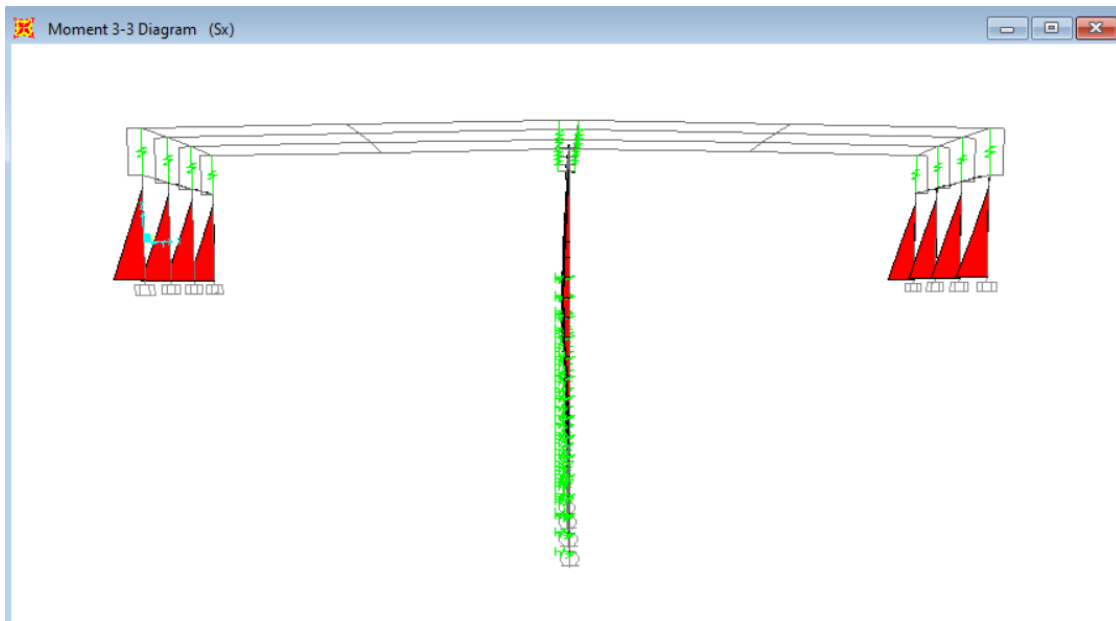
En el resto del pilote cumple con la armadura dispuesta de $\varnothing 12@15$

Armadura estribos:	$\varnothing 12$
s	15 cm
Vs	50.7 Ton
$\varnothing(Vc+Vs)$:	105.9 Ton
Vu:	36.15 Ton
FU	34 %

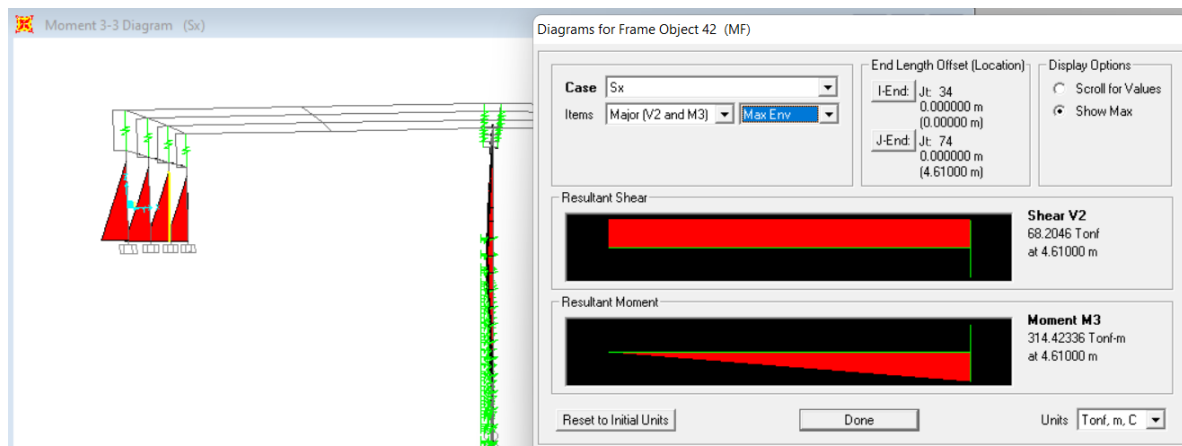
Cumple Corte

6.3.2.3 Columna Prefabricada Estribo.

Para el diseño de la columna se utilizan las solicitaciones del modelo cinemático ya que corresponde a la situación más desfavorable. Debido al tipo de conexión que se utilizará la columna prefabricada debe tener el tamaño suficiente para insertarse en la zapata de fundación del estribo. A continuación, se presenta un diagrama con los esfuerzos del modelo cinemático.



Luego, las solicitaciones máximas se encuentran en las columnas centrales de los estribos.



Considerando que se tiene una sección no homogénea y que la columna se encuentra sometida a esfuerzo de flexión y compresión se analiza la sección en el software CSI Col versión 10.

COLUMN INFORMATION

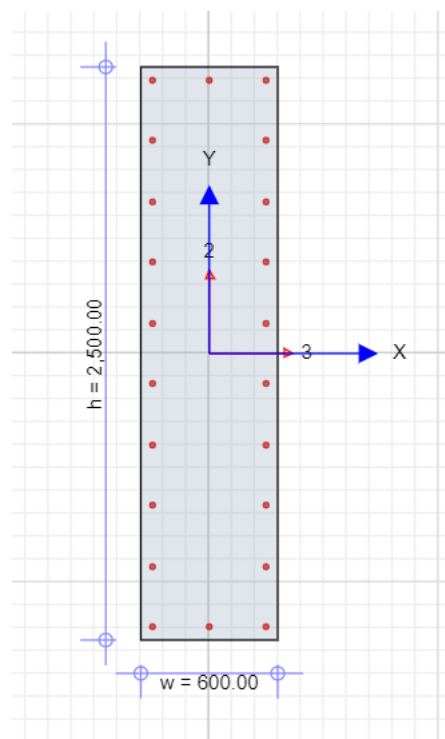
Name	Columna
Code	ACI 318-19
Shape	Rectangle
Consider Slenderness	No

SHAPE

Name	Concrete Rectangle 1
Material	G25
Stress-Strain Curve	Mander, Unconfined

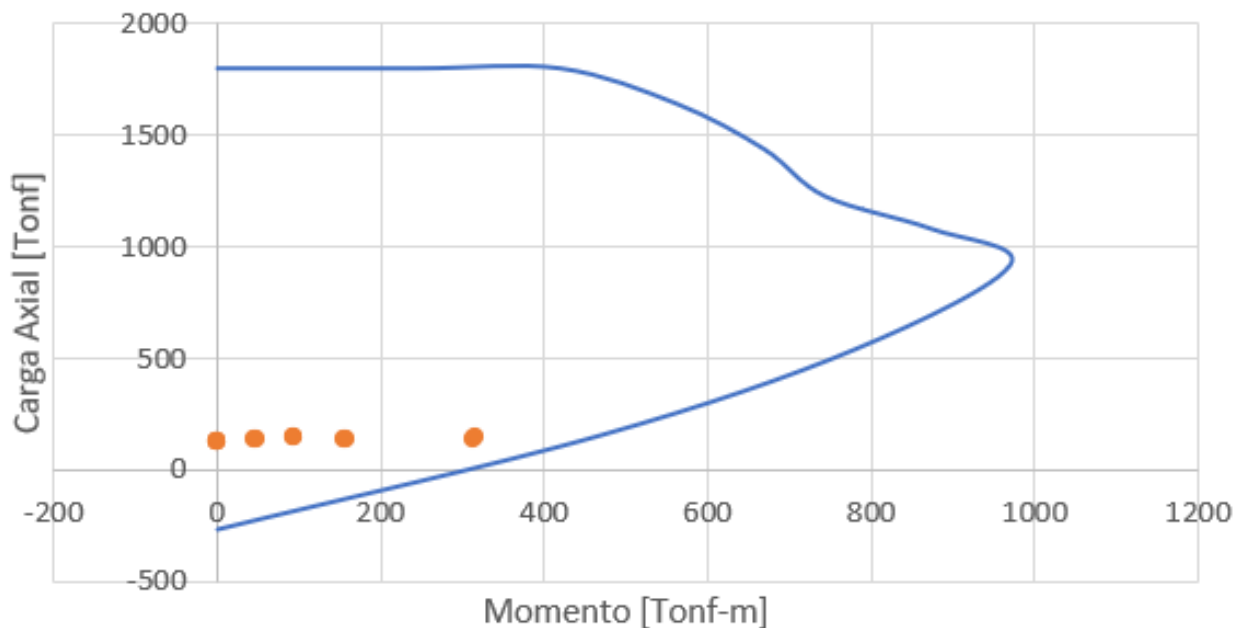
SECTION PROPERTIES

Total Width, W_{total}	600.00 (mm)
Total Height, H_{total}	2500.00 (mm)
Area, A	1,500,000.00 (mm ²)
Inertia, I_{22}	4.50e+10 (mm ⁴)
Inertia, I_{33}	7.81e+11 (mm ⁴)
Centroid, \bar{x}	300.00 (mm)
Centroid, \bar{y}	1,250.00 (mm)



Luego, se obtiene la curva de interacción para las combinaciones de carga más desfavorables.

Curva de Interacción



Como se muestra en la curva de interacción anterior, las solicitaciones últimas en la estructura se encuentran dentro de la curva de interacción, por lo que la sección indicada cumple con las condiciones de resistencia de acuerdo con la normativa. Se disponen 22 barras de 25 milímetros de diámetro con la disposición mostrada anteriormente.

6.3.2.4 Cabezal Prefabricado.

El cabezal prefabricado se diseña a flexión como una viga ancha. Para esto se utiliza la norma AASHTO LRFD BDS (2017). Se tiene en cuenta que el cabezal se conecta con la columna prefabricada mediante una conexión de bolsillo la cual requiere un largo de emplazamiento igual a 60 veces el diámetro de la barra longitudinal de la columna, para obtener la altura necesaria que debe tener el cabezal se utiliza la siguiente expresión. Esta considera que la conexión no interfiere con la armadura superior del cabezal, no así con la inferior la cual debe ser acomodada tal que no haya interferencias entre la armadura de la columna y la armadura del cabezal.

$$H \geq L_d + rec + d_{barra}$$

Donde:

H es la altura del cabezal.

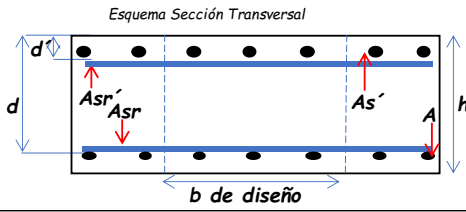
L_d es el largo de emplazamiento de la columna en el cabezal.

En este caso se tiene una altura mínima de la sección de 160 centímetros, todo de acuerdo con la expresión anterior. Los esfuerzos que se utilizaron para realizar el diseño son obtenidos mediante los modelos estático y dinámico. A continuación, se presenta el desarrollo del diseño presentado en una planilla.

Cálculo Cabezal:

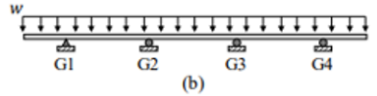
1. GEOMETRIA			
b :	100 [cm]		
h :	160 [cm]		
Recubrimiento As Vert.:	5.0 [cm]		
Recubrimiento As Horiz.:	5.0 [cm]		
d' :	6.1 [cm]		
d :	153.9 [cm]		

d y d' se obtienen en función de refuerzo dispuesto



2. MATERIALES			
Hormigón Nch 170	G 25	ξ max	0.4286
f'c Hormigón:	250 [Kg/cm ²]	u max	0.2979
Acero A630-420H, fy:	4200 [Kg/cm ²]	U c M+	3270375.0 [Kg]
$\beta 1$	0.85	U c M-	3270375.0 [Kg]

3. SOLICITACIONES		
M11+	80.50 [ton m]	
M11 -	78.00 [ton m]	
V u	67.00 [ton]	



4. DISEÑO A FLEXION M11 + (ARMADO SENTIDO TRANSVERSAL)				
ϕ Iterado	0.82	ACI318-05	u	0.018
u	0.020	$u < u$ max	δ'	0.040
ϕ ACI318-05	0.90		ω	0.018
As Calculado	13.96 [cm ² /m]			
As Mínimo	51.30 [cm ² /m]			
As Requerido	18.62 [cm ² /m]			

Refuerzo Dispuesto	Barras	Espaciamiento	Área de Acero	
As	$\phi 22 @ 20.0$	19.00	[cm ² /m]	
+Suple		0.00	[cm ² /m]	
As Total		19.00	[cm ² /m]	Refuerzo OK +/- 5%

5. DISEÑO A FLEXION M11 -

\emptyset Iterado	0.82	ACI318-05	u	0.017
u	0.019	$u < u_{max}$	δ'	0.040
\emptyset ACI318-05	0.90		ω	0.017

As Calculado	13.53 [cm ² /m]
As Mínimo	51.30 [cm ² /m]
As Requerido	18.03 [cm ² /m]

Refuerzo Dispuesto	Barras	Espaciamiento	Área de Acero	
As'	$\emptyset 22 @ 20.0$	19.00	[cm ² /m]	
+Suple As'		0.00	[cm ² /m]	
As' Total		19.00	[cm ² /m]	Refuerzo OK +/- 5%

8. VERIFICACIÓN AL CORTE

Vc	128.97 [Ton]	$Vc = 0.53 * \text{raiz}(f'c) * bw * d$
\emptyset ACI318-05	0.75	
$Vs = Vu / \phi - Vc$:	0.0 [Ton]	$Vs < (2/3) * \text{raiz}(f'c) * b * d$ Sección Ok
s:	100 [cm]	2 ramas = 1 estribo simple (E.S.)
Av = $Vs s / fy d$:	0.00 [cm ² /m]	3 ramas = 1 estribo + 1 traba (E.S.+T.)
Numero de ramas, Nr:	4 E.D.	4 ramas = estribo doble (E.D.)
Av Calculado	0.00 [cm ² /m/rama]	No necesita A corte
Av Mínimo	0.59 [cm ² /m/rama]	
Av Requerido	0.59 [cm ² /m/rama]	

Refuerzo dispuesto

	Diámetro	Espaciamiento
Av	$\emptyset 22 @ 20.0$	19.00 [cm ² /m/rama]
		Refuerzo Dispuesto OK +/- 5%

Verificación Espaciamento

S max	60.00 [cm]
Espaciamiento Ok	

6.3.2.5 Conexión Cabezal-Columna.

Las columnas se conectarán con el cabezal mediante una conexión de bolsillo. Esto se realizará siguiendo las disposiciones de la sección 3.6.6 de la AASHTO LRFD GSABC (2018).

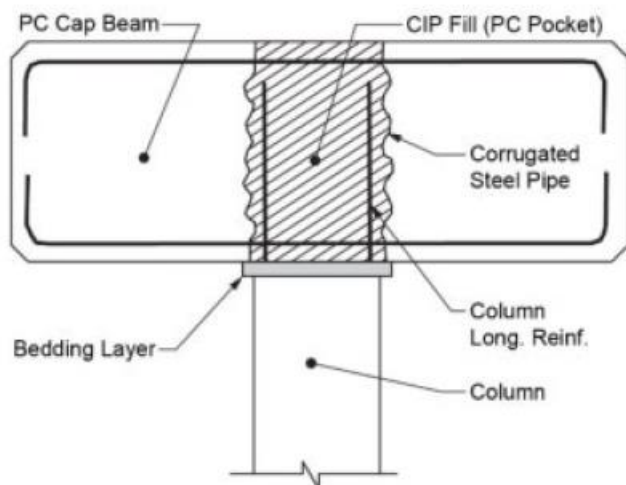


Figura 30: Conexión de bolsillo. Fuente: AASHTO LRFD GSABC (2018).

Para el diseño de esta conexión se contará con un cabezal prefabricado que tendrá huecos de un tamaño similar al diámetro de la columna con el objetivo de que reciba la armadura proyectada de la columna. La conexión requiere una capa entre el extremo de la columna y la base del cabezal para acomodar las tolerancias de fabricación y construcción.

El diámetro del tubo corrugado está dado por la siguiente expresión:

$$D'_{cp} = D_c - 2 * rec - 2 * a$$

Donde:

D'_{cp} es el diámetro del tubo corrugado y por tanto el diámetro del agujero de la conexión.

D_c es el diámetro de la columna.

rec es el recubrimiento de la armadura longitudinal de la columna.

a es el diámetro del agregado más grande.

Se presenta a continuación la planilla en la cual se obtuvo el largo de emplazamiento, diámetro del tubo de acero corrugado, su espesor y la fuerza de confinamiento que este aporta a la conexión. La altura del cabezal se obtiene bajo el supuesto que la armadura longitudinal de la columna no se encuentre con la armadura superior y así evitar el cálculo de esta interferencia.

Cálculo Conexión Columna Cabezal:

Materiales

Resistencia Hormigón	f'c	25 MPa
Tensión de Fluencia de la Armadura	fy	420 MPa

Largo de desarrollo refuerzo columna

Diámetro de la barra	D	25 mm
Diámetro Columna	Dc	1 m
Diámetro de la barra	D	0.984252 in
Resistencia Hormigón Coneccion	f'cp	3.62595 ksi
Tensión de Fluencia de la Armadura Long	fye	60.91596 ksi
Largo de desarrollo refuerzo columna	Ld	59.05512 in
Largo de desarrollo refuerzo columna	Ld	150 cm

Espesor Tubo de Acero Corrugado

Cantidad de barras refuerzo longitudinal	N	16
Area total del refuerzo de empalme de la columna	Ast	12.1737 in ²
Volumetric ratio of transverse reinforcement	ros	0.003439
Diámetro arido mas grande del hormigón	Dh	2 cm
Diámetro interno tubo acero	D'cp	35.03937 in
Diámetro interno tubo acero	D'cp	89 cm
Tensión de fluencia armadura transversal conexión	fyh	60.91596 ksi
Tensión de fluencia tubo acero corrugado	fypipe	60 ksi
Ángulo del corrugado	alpha	30 grados
Espesor del tubo de acero corrugado	tpipe	0.198253 in
Espesor mínimo del tubo de acero corrugado	tpipe	0.5 cm

Fuerza de confinamiento por unidad de largo del tubo corrugado obtenido conervadoramente

Fuerza de confinamiento por unidad de largo de tubo	Fph	4.660512 N/in
Fuerza de confinamiento por unidad de largo de tubo	Fph	1.834847 N/cm
Fuerza de confinamiento conexión	Fcc	163.3014 N

La fuerza de confinamiento de la conexión esta dada por la siguiente ecuación:

$$F_{ph} = f_{ypipe} * t_{pipe} * \cos(\alpha)$$

Cabe destacar que en esta conexión se debe tener especial cuidado con la disposición de las armaduras ya que no se deben producir interferencias entre la armadura inferior del cabezal con la armadura longitudinal de la columna, no así con la armadura superior ya que la altura del cabezal se obtiene bajo el supuesto que la armadura longitudinal de la columna no se encuentre con la armadura superior y así evitar el cálculo de esta interferencia.

Se propone la siguiente distribución de armadura para evitar la interferencia en la parte inferior del cabezal:

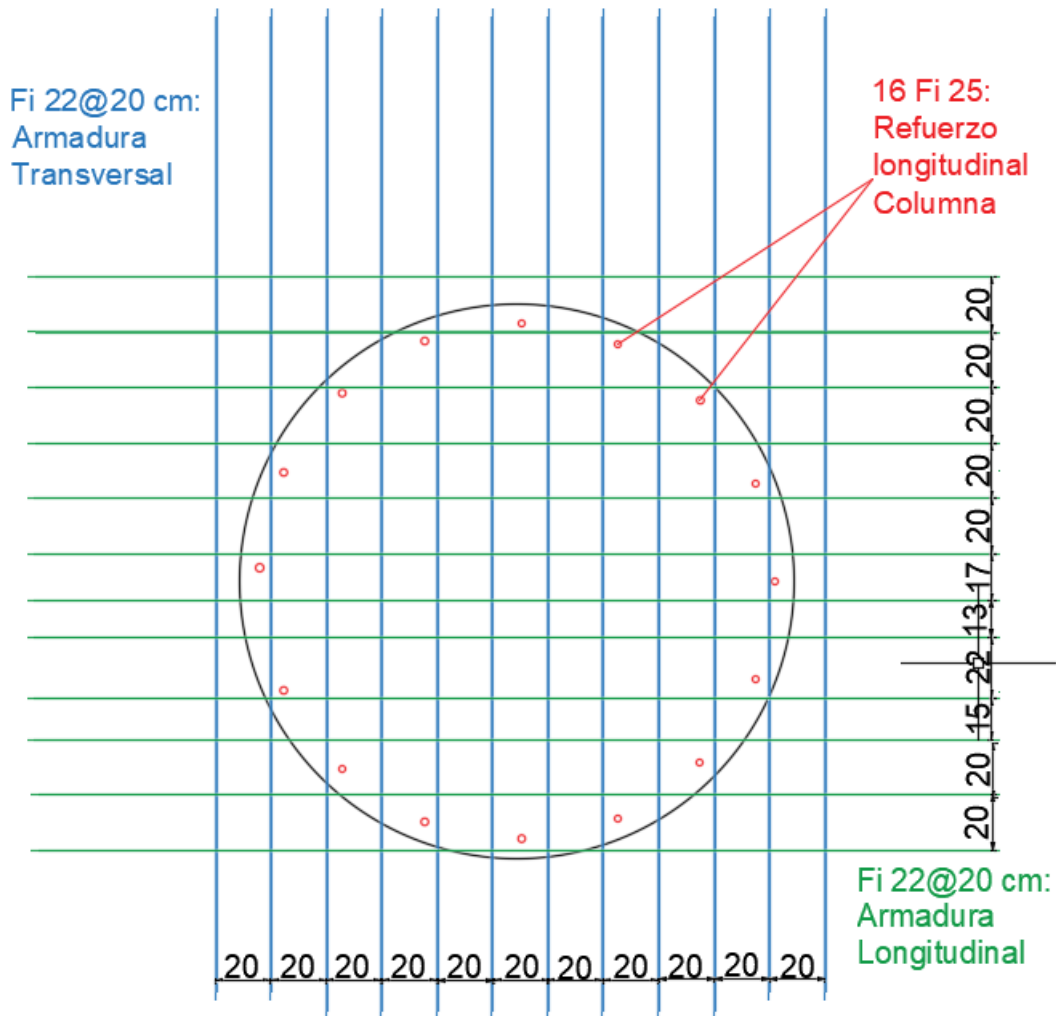


Figura 31: Disposición Armadura en la Conexión. Fuente: Elaboración Propia.

6.3.2.6 Conexión Columna-Pilote.

Las columnas se conectarán con los pilotes mediante una conexión de enchufe. La cual se realizará siguiendo las disposiciones de la sección 3.6.6 de la AASHTO LRFD GSABC (2018).

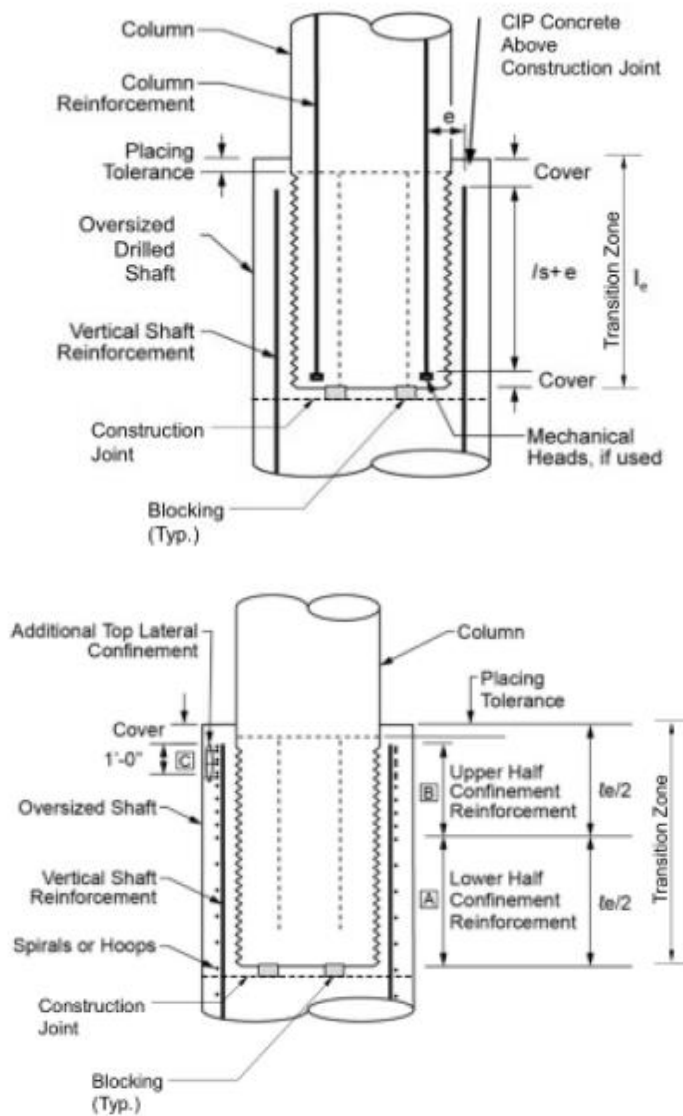


Figura 32: Conexión de enchufe. Fuente: AASHTO LRFD GSABC (2018).

La conexión consta de la inserción de la columna prefabricada en los pilotes ya fundados, para ello se necesita que los pilotes estén lo suficientemente sobredimensionados para permitir un espesor del shaft de conexión suficiente, en este shaft se empotrará la columna. La conexión de enchufe posee dos zonas que requieren un diferente tipo de hormigonado. Primero está la zona de la junta en el eje vertical (zona donde se topa la columna con el pilote) en donde se debe utilizar hormigón Tremie y luego, en la zona de transición (largo de empotramiento de la columna en el pilote) se debe utilizar hormigón in situ.

La principal fuente de transferencia en la conexión es por esfuerzo de corte y carga axial. La rugosidad de la superficie de conexión es un factor que se debe tomar en cuenta a la hora de diseñar por esfuerzo de corte, ya que aporta significativamente a este. A continuación, se presenta el diseño de la conexión con la utilización de una planilla.

Cálculo Conexión Columna-Pilotes:

Datos

Diámetro Armadura Longitudinal Columna	D1	25 mm
Diámetro Armadura Longitudinal Pilote	D2	32 mm
Diámetro Columna	Dc	1 mm

Largo de desarrollo refuerzo columna y largo zona de transición

Diámetro de la barra	D	1.259843 in
Resistencia Hormigón Coneccion	f'cp	3.63 ksi
Tensión de Fluencia de la Armadura Long	fye	60 ksi
Largo de desarrollo refuerzo columna	Ld	75.59055 in
Diámetro columna	Dc	39.37008 in
Distancia máxima armaduras columna y shaft	e	7.027559 in
Recubrimiento total de las armaduras long(cover)	c	2.952756 in
Largo de empotramiento columna	le	85.57087 in
Largo de empotramiento columna	le	2.2 m

Confinamiento lateral para el shaft

Espaciamiento entre el confinamiento lateral	smax	20 cm
Espaciamiento entre el confinamiento lateral	smax	7.874016 in
Diámetro acero de refuerzo lateral	Dl	12 mm
Diámetro acero de refuerzo lateral	Dl	0.472441 in
Area de la armadura de confinamiento	Ash	0.350602 in ²
Tensión de fluencia acero longitudinal	ful	60 ksi
Cantidd de barras de la columna	N	16
Area total del refuerzo longirudinal de la columna	Al	19.94538 in ²
Tensión de fluencia acero transversal	fytr	60 ksi
Longitud de empalme de barra que controla	ls	151.1811 in
Factor de eficiencia zona A	ka	0.5
Factor de eficiencia zona B	kb	1
Factor de eficiencia zona C	kc	2
Criterio de armadura de confinamiento		Cumple

Resumen Para Zona A

Largo de empotramiento columna	le	2.2 m
Espaciamiento entre el confinamiento lateral	smax	20 cm
Diámetro acero de refuerzo lateral	Dl	12 mm

Resumen Para Zona B

Largo de empotramiento columna	le	2.2 m
Espaciamiento entre el confinamiento lateral	smax	10 cm
Diámetro acero de refuerzo lateral	Dl	12 mm

Resumen Para Zona C

Largo de empotramiento columna	le	2.2 m
Espaciamiento entre el confinamiento lateral	smax	5 cm
Diámetro acero de refuerzo lateral	Dl	12 mm

El criterio de armadura de confinamiento de la conexión esta dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{A_{sh}}{S_{max}} \geq \frac{k * f_{ul} * A_l}{2 * \rho_i * f_{ytr} * l_s}$$

Se destaca que se obtienen refuerzos para cada una de las zonas de la conexión A, B y C en donde lo que varía es el factor de eficiencia mencionado en la norma utilizada.

6.3.2.7 Conexión Columna-Zapata.

Las columnas se conectarán con la zapata de fundación mediante una conexión de enchufe. La cual se realizará siguiendo las disposiciones de la sección 3.6.6 de la AASHTO LRFD GSABC (2018).

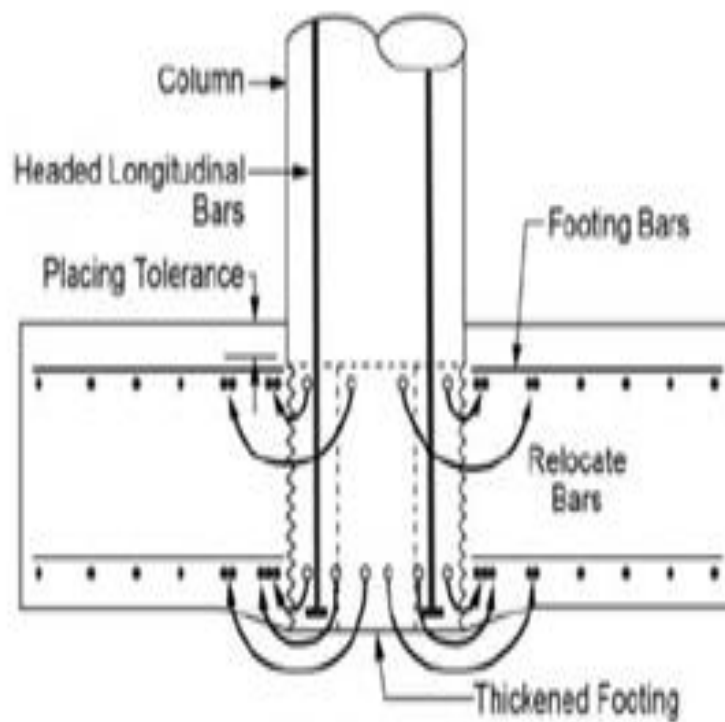
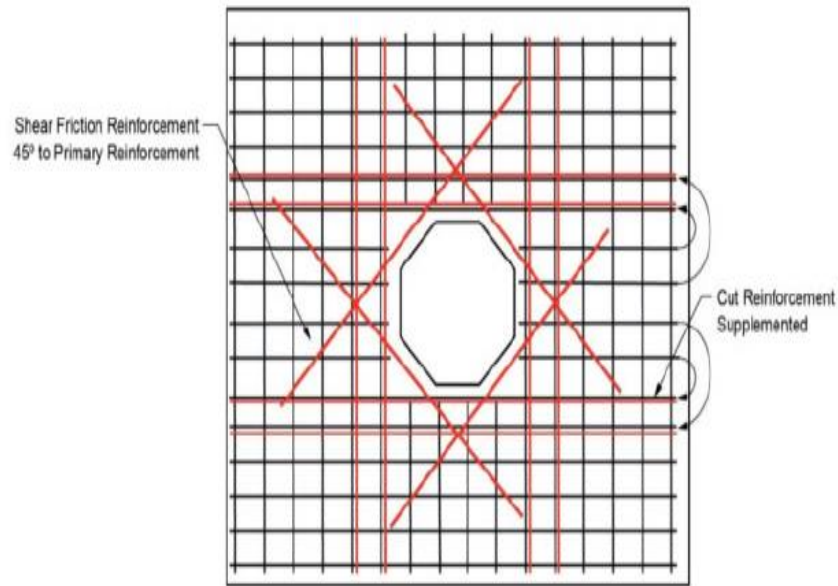


Figura 33: Conexión Columna Zapata. Fuente: AASHTO LRFD GSABC (2018).

Para mantener la integridad en la interfaz de la conexión, el peso propio de la columna empotrada y la carga de construcción asociada deben ser soportados hasta que el hormigón o lechada utilizado alcance una resistencia suficiente, esto se puede llevar a cabo mediante el uso de alzaprimado. Se debe tener en cuenta una capa de sacrificio debajo de la zapata para que la columna no quede apoyada directamente en el suelo.

Cálculo Conexión Zapata Columna.

Solicitaciones

Esfuerzo de corte entregado por SAP2000	V	7140 N
---	---	--------

Ancho Sección	Ac	2.5 m
Largo Sección	Lc	0.6 m
Diámetro refuerzo longitudinal columna	D	25 mm
Diámetro Columna	Dc	61.02362 in
Diámetro refuerzo longitudinal columna	D	0.984252 in

Longitud de empotramiento columna

Longitud mínima de empotramiento	Lmin	61.02362 in
Longitu de empotramiento	L	91.53543 in
Longitu de empotramiento	L	232.5 cm

Resistencia al corte de la conexión

Area del hormigón que participa	Acv	1500000 mm2
Espaciamiento Refuerzo lateral	Sl	15 cm
Diámetro Refuerzo lateral	DI	12 mm
Area armadura corte que atraviesa plano	Avf	3506.017 mm2
Tensión fluencia de la armadura	fy	420 Mpa
Factor de cohesión	c	0.52 MPa
Coeficiente de fricción	mu	0.5 -
Fuerza de compresión permanente neta normal al plano de corte	Pc	0 N
Tensión de rotura hormigón	f'c	25 MPa
Ancho de la interface	bv	N/A mm

Condicion de resistencia al corte	Vnr	7500000 N
Resistencia nominal al corte del plano de interface	Vn	1516.264 Ton
Factor Utilización	FU	0.470894

La resistencia nominal al corte en el plano de interface de la conexión está dada por la siguiente ecuación:

$$V_n = c * A_{cv} + \mu[A_{vf} * f_y + P_c]$$

Con esto se obtiene que la conexión requiere un largo de emplazamiento de 2.32 metros, esto implica que la zapata debe tener 2.32 metros o más de espesor. También se dispondrá de refuerzo de confinamiento de 12 milímetros de diámetro cada 15 centímetros de separación en la columna.

7. Tiempos de Construcción.

Se realiza una cuantificación del tiempo en el cual se lleva a cabo la construcción tanto con metodología convencional como con metodología ABC. Este cálculo se realiza desde el inicio de la construcción de las columnas de la cepa hasta la pavimentación del tablero. No se cuantificará el tiempo de construcción de los estribos y pilotes ya que se trabaja bajo el supuesto que en ambos casos se tiene la misma fundación y estribos ya que no se adentró en el diseño de estos.

7.1.1 Construcción con Metodología Convencional.

Para la estimación del tiempo de construcción con metodología convencional se tomarán los siguientes supuestos:

- Tiempo de fraguado del hormigón: 28 días.
- Tiempo de encofrado y enfierradura de las columnas: 2 día.
- Tiempo de hormigonado columnas: 1 día.
- Tiempo encofrado y enfierradura cabezal: 2 días.
- Instalación de vigas prefabricadas: 2 días (1 por tramo).
- Tiempo de encofrado y enfierradura tablero: 4 días.
- Tiempo de hormigonado tablero: 2 días.
- Tiempo de encofrado y enfierradura barreras: 2 día.
- Tiempo hormigonado barreras: 1 día.
- Tiempo pavimentación tablero: 2 días.

Con lo anterior se realiza una carta Gantt con la secuencia de construcción, se realiza la línea de construcción como; primero el encofrado y hormigonado de las columnas, mientras se están fraguando las columnas se realiza el encofrado de la cepa y luego su hormigonado. A continuación, se procede a instalar las vigas prefabricadas para luego realizar el encofrado y posterior hormigonado del tablero. Para finalizar se realiza el encofrado y hormigonado de las columnas y se termina con la pavimentación del tablero.

Partida/Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Encofrado y Enfierradura Columna	■												
Hormigonado Columna	■												
Fraguado Columna	■	■	■	■									
Encofrado y Enfierradura Cabezal			■										
Hormigonado Cabezal			■	■									
Fraguado Cabezal			■	■	■	■							
Instalación Vigas							■						
Encofrado y Enfierradura Tablero							■						
Hormigonado Tablero								■					
Fraguado Tablero								■	■	■	■		
Encofrado y Enfierradura Barreras										■			
Hormigonado Barreras											■		
Fraguado Barreras											■	■	■
Pavimentación Tablero													■

Figura 34: Carta Gantt Construcción con Metodología Convencional. Fuente: Elaboración Propia.

7.1.2 Construcción con Metodología ABC.

Para la estimación del tiempo de construcción con metodología ABC se tomarán los siguientes supuestos:

- Tiempo fraguado hormigón conexiones: 3 días.
- Tiempo de encofrado y enfierradura del shaft conexión pilote-columna: 1 día.
- Tiempo hormigonado shaft conexión pilote-columna: 1 día.
- Tiempo instalación columnas prefabricadas y hormigonado de la conexión: 2 días.
- Tiempo instalación cabezal prefabricado y hormigonado de la conexión: 2 días.
- Tiempo instalación de vigas prefabricadas: 2 días (1 por tramo).
- Tiempo instalación de paneles prefabricados: 2 días.
- Tiempo postensado tablero: 1 día.
- Tiempo encofrado y enfierradura barreras: 1 día.
- Tiempo hormigonado conexiones de corte tablero: 1 día.
- Tiempo hormigonado barreras 2 días.
- Tiempo pavimentación de tablero: 2 días.

Con lo anterior se realiza una carta Gantt con la secuencia de construcción, se realiza la línea de construcción como; primero el encofrado, enfierrado y posterior hormigonado del shaft del pilote para su conexión con la columna prefabricada, luego se realiza la conexión con las columnas. A continuación, se conecta el cabezal con las columnas antes mencionadas. Luego se disponen las vigas prefabricadas en los tramos para posteriormente ubicar los paneles prefabricados en su lugar. Una vez que todos los paneles están en su lugar se realiza un postensado de estos. Por último, se construyen las barreras y se finaliza con la pavimentación del tablero.

Partida/Día	1	2	3	4
Encofrado y Enfierradura de Shaft	■			
Hormigonado del Shaft	■			
Fraguado del Shaft	■			
Instalación y Hormigonado Conexión Columna-Pilote	■			
Fraguado Conexión	■			
Instalación y Hormigonado Conexión Columna Cabezal		■		
Fraguado Conexión		■		
Instalación de Vigas Prefabricadas		■		
Instalación Paneles Prefabricados			■	
Postensado Paneles			■	
Encofrado y Enfierradura de las Barreras			■	
Hormigonado Conexiones de Corte Tablero			■	
Hormigonado Barreras			■	
Pavimentación del Tablero				■

Figura 35: Carta Gantt Construcción con Metodología ABC. Fuente: Elaboración Propia.

Se puede observar que la carta Gantt no detalla el orden de las actividades, esto ocurre ya que el puente construido con la metodología ABC cuenta con actividades de corta duración, del orden de días. Es por esto que se muestra a continuación la carta Gantt en días de la construcción con metodología convencional.

Partida/Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Encofrado y Enfierradura de Shaft	■																						
Hormigonado del Shaft		■																					
Fraguado del Shaft			■	■	■																		
Instalación y Hormigonado Conexión Columna-Pilote				■	■																		
Fraguado Conexión					■	■	■																
Instalación y Hormigonado Conexión Columna Cabezal								■	■														
Fraguado Conexión									■	■	■												
Instalación de Vigas Prefabricadas												■	■										
Instalación Paneles Prefabricados														■	■								
Postensado Paneles																■							
Encofrado y Enfierradura de las Barreras																	■						
Hormigonado Conexiones de Corte Tablero																		■					
Hormigonado Barreras																			■	■			
Pavimentación del Tablero																						■	■

Figura 36: Carta Gantt Construcción con Metodología ABC. Fuente: Elaboración Propia.

8. Comparación de Resultados

En esta sección se compararán los elementos que se diseñaron con la metodología ABC con el diseño convencional para observar cómo varían los diseños. Principalmente se observará si cambian las cantidades de armadura por elemento, las dimensiones y los materiales.

Para esto se realizará una comparación de elemento por elemento para observar específicamente en cuanto varía cada uno. Se comienza con la superestructura para finalizar con la infraestructura. Se finalizará con la comparación de los tiempos de construcción en terreno estimados anteriormente.

8.1 Superestructura.

Con respecto a la metodología convencional solo se modificó el tablero ya que se diseñó para ser construido por paneles prefabricados los cuales son conectados a las vigas prefabricadas mediante llaves de corte que permiten el comportamiento colaborante viga-tablero.

La armadura que se le debe disponer transversalmente a los prefabricados es idéntica a la del diseño convencional. El espesor en los paneles prefabricados es de 25 centímetros (5 centímetros de asfalto) mientras que en el diseño convencional se tiene un espesor promedio de 22 centímetros, se debe tener en consideración que las vigas deben tener el resalte para permitir instalar los paneles que tienen una pendiente de 2.5%.

Para el diseño de la armadura longitudinal se utiliza un postensado de 6 cables de acero 270 ksi de baja relajación por rama separadas a 2 metros mientras que en el diseño convencional es una malla de barras de 12 milímetros de diámetro a 15 centímetros de separación. Por último, se debe tener en cuenta la enfierradura de las llaves de corte ya que cada agujero debe tener 4 barras de 16 milímetros de diámetro como armadura de corte, esta debe venir dispuesta en las vigas longitudinales para luego ser encajada en las conexiones de corte del tablero.

8.2 Infraestructura

En la infraestructura se modificaron, con respecto al diseño convencional, las columnas de la cepa y estribo, el cabezal y los pilotes. En el nuevo diseño las columnas de la cepa y el cabezal son elementos prefabricados, al igual que las columnas del estribo. Es por esto que se genera la necesidad de utilizar conexiones entre estos elementos las cuales fueron calculadas en la sección anterior.

Para que la conexión pilote columna fuera factible se aumentó en 50 centímetros el diámetro de los pilotes quedando pilotes de 1.5 metros de diámetro. En el diseño convencional los pilotes se diseñaron con armadura de cuantía mínima (cuantía de 1%) por lo que al agrandar la sección se tuvo que aumentar también la armadura a 24 barras de 32 milímetros de diámetro para que se cumpla este criterio de diseño.

Diseño	Convencional	ABC
Profundidad[m]	15.82	15.82
Diámetro[m]	1	1.5
Volumen Hormigón[m3]	12	28
N° Barras	16	24
D. Barras[mm]	25	32
Kg Acero[kg]	393	965
Relación Volumen Hormigón		2.25
Relación Kg Acero		2.46

Tabla 6: Comparación Pilotes.

Como se observa en la tabla se tiene un aumento del 125% en la cantidad de volumen de hormigón en los pilotes, esto se traduce en la utilización de 64 metros cúbicos de hormigón extra tomando en cuenta los 4 pilotes. Así mismo se tiene un aumento del 146% en los kilogramos de acero necesarios pasando de 16 barras de 25 milímetros a 24 barras de 32 milímetros por pilote.

Las columnas de la cepa tienen las mismas dimensiones y armaduras con los diseños de ambos métodos dando como diseño final una columna de 1 metro de diámetro con 16 barras de 25 milímetros de espesor como armadura longitudinal. La diferencia que se presenta es que bajo el diseño ABC se tienen columnas prefabricadas mientras que en el diseño convencional corresponden a columnas hormigonadas in-situ.

Con respecto al cabezal, se aumenta su altura 30 centímetros con respecto al diseño convencional con el objetivo de cumplir los requisitos de la conexión de bolsillo (Cabezal-Columna). Por su parte, la armadura superior e inferior se ve disminuida en el nuevo diseño por el aumento de altura de la sección. Es importante destacar la importancia de la distribución de la armadura tanto de la columna como del cabezal ya que se debe realizar como se mostró anteriormente para evitar la interferencia de enfierradura en la conexión.

Diseño	Convencional	ABC
Altura[m]	1.3	1.6
Largo[m]	11.74	11.74
Ancho[m]	1.9	1.9
Volumen Hormigón[m ³]	29	36
Espaciamiento[cm]	20	20
D. Barras[mm]	25	22
Kg Acero[mm ³]	123	95

Relación Volumen Hormigón	1.23
Relación Kg Acero	0.77

Tabla 7: Comparación Cabezal Cepa.

Como es posible observar en la tabla, se tiene un aumento del 23% en el volumen de hormigón de la cepa, esto se traduce en la utilización de 7 metros cúbicos de hormigón más comparado con el diseño original. Por otro lado, se tiene una disminución del 13% de la armadura longitudinal ya que en el diseño original se disponen de barras de 25 milímetros espaciadas a 20 centímetros mientras que en diseño ABC barras de 22 milímetros espaciadas también a 20 centímetros. La armadura de corte se mantiene igual.

Por último, se destaca que en el diseño con metodología ABC se deben aplicar conexiones de enchufe y de bolsillo en la infraestructura para obtener una condición de empotramiento entre las columnas con el cabezal por la parte superior y con los pilotes por la parte inferior en el caso de la cepa y para los estribos se utiliza la conexión de bolsillo con elemento macizo para conectar las columnas con la zapata de fundación.

La conexión de bolsillo requiere el uso de un tubo de acero corrugado de 5 milímetros de espesor y 89 centímetros de diámetro el cual viene insertado en los agujeros del cabezal. Adicionalmente en la conexión de enchufe se tiene el shaft de espesor 23 centímetros en el cual se dispone armadura de corte en las zonas A, B y C con armadura de refuerzo de 12 milímetros de diámetro y con separación de 20, 10 y 5 centímetros respectivamente.

La conexión de enchufe para conectar las columnas prefabricada del estribo con la zapata de fundación requiere un largo de empotramiento de 2.13 metros. Esto implica que la zapata de fundación debe aumentar su altura en 60 centímetros lo que genera un aumento en la cantidad de hormigón a utilizar en la zapata de fundación.

Con lo anterior se puede notar que el proyecto con metodología ABC requiere una inversión de ingeniería mayor que el diseño convencional ya que se deben calcular conexiones, cargas y metodologías de construcción que no son requeridas en un diseño convencional.

8.3 Comparación entre Tiempos de Construcción en Terreno.

En esta sección se comparan los resultados obtenidos luego de estimación de los tiempos de construcción del puente con metodología ABC y convencional. Esta estimación se realiza bajo supuestos en base a la experiencia y a datos estudiados acerca del tiempo de fraguado del hormigón, el tiempo de montaje de los elementos, la enfierradura tanto de las conexiones como de los elementos para el caso convencional, el tiempo de pavimentación y en la fabricación in situ de las barreras.

Para el puente construido con metodología convencional, es decir, tablero hormigonado in situ apoyado en vigas prefabricadas de hormigón armado y con columnas, cabezal y pilotes hormigonados in situ se obtiene un tiempo de construcción en terreno de 13 semanas, esto tomando en cuenta la superestructura, las columnas y el cabezal.

Por su lado, el puente construido con metodología ABC, en base a elementos prefabricados y conexiones, se obtiene un tiempo de construcción en terreno de 22 días, tomando en cuenta la construcción de los mismos elementos. Con esto se obtiene, en base a los supuestos y a los cálculos realizados, que el puente con metodología ABC permite reducir el tiempo de construcción en terreno en aproximadamente 8 semanas, reduciendo el tiempo de las actividades que se tomaron en cuenta un 75%.

9. Conclusiones y Comentarios.

En esta sección se realizan las conclusiones obtenidas luego de la realización de esta Memoria de Título. Estas serán enfocadas, al igual que la memoria, al diseño estructural de los elementos diseñados con la metodología ABC y sus respectivas conexiones. También se llevará a cabo una reflexión acerca de la importancia que puede llegar a tener esta tecnología en el país mediante una estimación de los tiempos de construcción que se están ahorrando al aplicar esta metodología en el puente específico.

Se cumplieron los objetivos específicos ya que, se estudió normativa de diseño estructural para puentes ABC a través de códigos, manuales y normas extranjeras. Luego se realiza una adaptación de estas a las regulaciones que legislan el diseño estructural en Chile mediante un análisis que consideró especialmente la condición sísmica del país.

Con respecto a lo anterior se concluye que la guía de la AASHTO para puentes ABC (AASHTO LRFD GSABC) se puede utilizar para diseñar puentes ABC en Chile mediante las consideraciones para los elementos prefabricados y conexiones que en esta se presentan. Para esto se debe utilizar los espectros normados en Chile según la clasificación sísmica y tipo de suelo que se encuentre la obra a diseñar.

Luego del estudio previamente descrito se diseñaron los detalles constructivos para el ensamblaje de los distintos elementos prefabricados y el diseño del postensado para la unión de los paneles prefabricados del tablero. Por último, se aplica, en un puente chileno, el diseño con metodología ABC para la superestructura e infraestructura y se comparan los resultados obtenidos con el diseño previamente realizado para el puente con metodología de diseño convencional.

En consecuencia, de la investigación bibliográfica de los puentes ABC se obtiene la siguiente definición: “Los puentes ABC se definen como aquellos métodos constructivos de puentes en los cuales se usa la combinación más eficiente de innovación, planeación, diseño, materiales y técnicas constructivas para disminuir significativamente los impactos de la construcción”. Esta definición complementa todas las revisadas para la obtención de una definición que engloba todos los aspectos destacables de los puentes ABC de los autores que se revisaron.

Con respecto al diseño de la estructura, se obtiene que el puente con metodología ABC se basa en elementos prefabricados que se unen entre ellos mediante conexiones estructurales. La principal diferencia entre un puente prefabricado y un puente ABC es la planificación del proyecto para permitir una disminución del tiempo de construcción in situ, para esto es necesario trabajar con materiales que lo permitan como es el hormigón de fraguado rápido que se utilizó en el diseño de las conexiones.

Se trabajó principalmente con 3 conexiones, para las llaves de corte que unen al tablero con las vigas la distribución de los agujeros, su tamaño y la cantidad de refuerzo que se asigna

son determinantes para poder satisfacer un comportamiento monolítico entre el tablero y la viga y así lograr que el tablero y las vigas tengan deformaciones iguales actuando conjuntamente.

Por su lado, las conexiones de enchufe y de bolsillo las cuales conectan las columnas prefabricadas con los pilotes y el cabezal respectivamente presentan un punto crítico en el largo de empotramiento de la conexión ya que se obtienen largos de 2.2 metros en el caso de la conexión columna-pilote, 1.5 metros en el caso de cabezal-columna y 2.3 metros en el caso de la conexión columna zapata de fundación.

También se destaca que las conexiones deben tener un factor de reducción menor al de todos los elementos para proteger esta misma, debe ser menor a 0.8 ya que este es el factor de reducción (R) asignado en el Manual de Carreteras (2018) para uniones. Todo esto se realiza para evitar que las fallas se concentren en las conexiones debido a que es una zona en donde se producen discontinuidades en los elementos estructurales.

Es importante notar que, como se dijo anteriormente, los puentes ABC son constituidos principalmente por elementos prefabricados, es por esto que se destaca la importancia de las conexiones. La gran parte de las uniones de los elementos son a través de conexiones en segunda fase, es decir, conexiones entre elementos prefabricados ya fraguados, es por esta razón que las conexiones deben asegurar un comportamiento monolítico entre los elementos prefabricados

De acuerdo con el diseño realizado del puente seleccionado, Puente San Pablo Antiguo, se obtiene que con metodología ABC requiere una mayor cantidad de materiales ya que las dimensiones de los elementos aumentan debido a los requerimientos de las conexiones, el cabezal aumenta 30 centímetros su altura, la zapata de fundación aumenta en 60 centímetros su altura, los pilotes aumentan 50 centímetros su diámetro y aumento su armadura ya que el pilote fue diseñado con cuantía mínima en el diseño convencional.

Esto producen un impacto negativo en los costos de la obra ya que se deben satisfacer las dimensiones del diseño lo que implica tener un gasto mayor en la cantidad de hormigón y acero. Asimismo, el hecho de que los elementos sean prefabricados implica que deben ser transportados y colocados en su respectiva posición definitiva. Esta acción requiere de maquinaria capaz de levantar y transportar los prefabricados la cual es un costo adicional con respecto al método convencional.

Se rescata que el tener que desarrollar conexiones de elementos prefabricados alterando el factor de reducción, diseñar las condiciones de carga de izaje y por consiguiente los refuerzos necesarios para soportar estos, la coordinación de la maquinaria para disponer los elementos, el transporte de elementos prefabricados, entre otros. Esto implica un trabajo ingenieril mayor que la construcción de un método ingenieril, por lo que se obtiene que la metodología ABC implica una inversión en ingeniería de anteproyecto mayor que el puente convencional.

Por otro lado, se observa que hay una disminución importante en el tiempo de construcción cuando se diseña con metodología ABC, disminuye el tiempo de 13 semanas a 22 días la construcción de la superestructura, cabezal y columnas, esto es un beneficio importante para la construcción de puentes ABC. Se obtiene que la metodología ABC permite reducir el tiempo de construcción en terreno en aproximadamente 8 semanas, reduciendo el tiempo de las actividades que se tomaron en cuenta un 75%. Se destaca que esto fue obtenido mediante el uso de supuestos, ya que el enfoque principal de esta Memoria de Título es el diseño estructural.

La disminución del tiempo de proyecto obtenido implica un beneficio de la técnica ABC por sobre la convencional y arrastra consigo una serie de ventajas que serán explicitados a continuación. Se mejora la seguridad en la zona de trabajo tanto para los trabajadores como para el tráfico urbano, esto se asocia con la utilización de los elementos prefabricados y con la disminución del tiempo de construcción en terreno. Asimismo, se disminuye el tiempo de interrupción del tráfico y se mejora la constructibilidad.

También, al ser elementos prefabricados, se asegura la calidad de los elementos ya que son construidos en plantas de prefabricación en donde se tienen las condiciones ideales y un ambiente controlado. Esto también permite disminuir el costo de vida del puente ya que, al tener elementos de una calidad asegurada por la planta de prefabricación, los controles de calidad y monitoreo se pueden realizar en intervalos de tiempo más extensos.

Con todo lo anterior se concluye que se cumplió el objetivo principal de la Memoria de Título ya que se propone una nueva metodología de construcción de puentes la cual permite su construcción en Chile de puentes carreteros urbanos de gran dificultad de emplazamiento, ya sea por su ubicación o por la importancia de la ruta en el que se encuentra. Por lo tanto, se afirma que es posible aplicar la tecnología ABC en Chile, todo esto en base de que existe normativa extranjera la cual se puede utilizar para diseñar los elementos y conexiones que requieren los puentes ABC.

Es importante notar que las conexiones y metodologías de diseño utilizadas en esta Memoria de Título son una selección de técnicas de diseño para el caso específico seleccionado y que existen variadas metodologías más potentes en el ámbito de la tecnología y la reducción de tiempo para construir un puente ABC como la utilización de gatos hidráulicos para trasladar el tablero del puente construido al costado del que se desea reemplazar, la utilización de las máquinas SPTM (Self-Propelled Modular Transporter) para transportar un tablero completamente prefabricado o la utilización de otro tipo de conexiones para unir los distintos elementos prefabricados.

Se destaca que los puentes ABC son una alternativa viable cuando se tiene una combinación de requisitos que permita amortiguar los costos que implica esta metodología. Dentro de los requisitos a considerar se encuentra la importancia y cantidad de tráfico que circula por la ruta en donde se construirá el puente, la situación climática de la zona en donde de lleve a

cabo la construcción, las restricciones comunales de construcción ya sea por horario de trabajo, horarios en que se permite hacer ruido, entre otros. También se considera la dificultad de emplazamiento que tiene el proyecto y la urgencia que este necesita. Todo esto estos factores están relacionados con la reducción del tiempo de construcción en terreno del puente.

Todo el trabajo realizado en esta Memoria de Título fue enfocado en el diseño estructural de la tecnología ABC por lo que no se abordaron temas relevantes a un nivel de detalle profundo como el costo, la influencia en el entorno, la factibilidad, el tiempo, entre otros. A continuación, se propondrán líneas de investigación futuras que se pueden realizar para complementar el estudio realizado.

Como se mencione anteriormente, la principal diferencia de los puentes ABC con respecto a los convencionales es el tiempo de construcción en terreno, esta reducción del tiempo se logra bajo una planificación exhaustiva de la secuencia y tipos de actividades que se deben realizar en obra. De acuerdo con esto se propone realizar una metodología para guiar la construcción de puentes ABC con una secuencia general tomando en cuenta que se pueden realizar de variadas maneras. Esta metodología debe tener en cuenta tanto las actividades que se realizan en terreno como la planificación previa a la construcción.

Se destaca la importancia del costo de los proyectos a la hora de decidir bajo que metodología de construcción se diseñarán los puentes. En esta Memoria de Título se concluyó, al igual que en la bibliografía revisada, que el puente ABC es más costoso que un puente convencional, es por esto que para evaluar que metodología de diseño utilizar es necesario hacer un estudio de impacto en las rutas, en las comunas y personas que comparten el mismo espacio que la obra. Luego del estudio se propone realizar una cuantificación monetaria de estos impactos para poder agregar estos costos indirectos a la obra convencional y finalmente evaluar si es conveniente o no utilizar la metodología de puentes ABC.

Por último, se propone realizar un análisis profundo del mercado local con respecto a lo que requieren los puentes ABC para su implementación. Esto se debe enfocar a las plantas prefabricadoras de elementos de hormigón para determinar si es posible construir cepas, columnas, paneles y otros tipos de elementos prefabricados. Así mismo, se propone hacer una investigación acerca de la utilización de la maquinaria SPMT para la construcción de puentes ABC con tablero completamente prefabricado, esto incluye vigas y tablero prefabricados como un elemento, ya que esta es una de las principales opciones que se tiene en Estados Unidos para la utilización de los puentes ABC.

10. Bibliografía.

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 8th Edition*.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design 2nd Edition*.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *LRFD Guide Specifications for Accelerated Bridge Construction*
- [4] U.S. Department on Transportation Federal Highway Administration. (2011). *Accelerated Bridge Construction Experience in Design, Fabrication and Erection of Prefabricated Bridge Elements and Systems*.
- [5] University Transportation Center. (2019). *ABC-UTC Guide for: Full-Depth Precast Concrete (FDPC) Deck Panels*.
- [6] Sholz, D. & Wallenfelsz, J. (2007). *Recommendations for the Connection Between Full-Depth Precast Bridge Deck Panel Systems and Precast I-Beams*. Department of Civil and Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [7] Caltrans, Project Delivery Division of Engineering Services. (2021). *Caltrans ABC Manual*.
- [8] Nedev, G. & Khan, U. (2011). *Guidelines for Conceptual Design of Short-Span Bridges*. Chalmers University of Technology. Sweden.
- [9] Santa María D.V. (1901). *Puentes Chilenos*.
- [10] Ochoa, C. (2008). *Diseño de Superestructuras de Puentes de hormigón Armado. Comparación entre Diseño según Normas AASHTO Estándar y Norma AASHTO LRFD*. Universidad Austral de Chile. Valdivia.
- [11] Pavani, E. (2008). *Comparación Técnica Económica de Puentes de Losa Versus Puentes de Vigas*. Universidad de Chile. Santiago.
- [12] Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. (2010). *Obras Públicas para el Desarrollo*.
- [13] Fuentes, F. (2019). *Evaluación Técnica de la Implementación de Puentes Tipo Losa Prefabricados con “Void Formers”*. Universidad Andrés Bello. Santiago.

- [14] San Martín, F. & Valenzuela, M. (2022). *Feasibility of Use of “Void Formers” in Concrete Slab Bridges Using Chilean Code: Design and Testing*. Santiago, Chile.
- [15] Valdés, C. et al. (2022). *Propuesta de Taxonomía en Puentes Chilenos, Aplicación en la Región de Valparaíso*. Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso.
- [16] Ministerio de Obras Públicas. (2018). *Manual de carreteras. Volumen 3. Instrucciones y criterios de diseño*.
- [17] Ministerio de Obras Públicas. (2018). *Manual de carreteras. Volumen 5. Especificaciones Técnicas Generales de Construcción*.
- [18] Nilson, A. et al. (2008). *Design of Concrete Structures Fourteenth Edition*.