



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

ANÁLISIS PARCIAL POR ETAPAS CONSTRUCTIVAS DE UN PUENTE  
EMPUJADO

**T E S I S**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
HÉCTOR DÍAZ MENDOZA

TUTOR PRINCIPAL  
DR. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ  
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX, NOVIEMBRE 2016

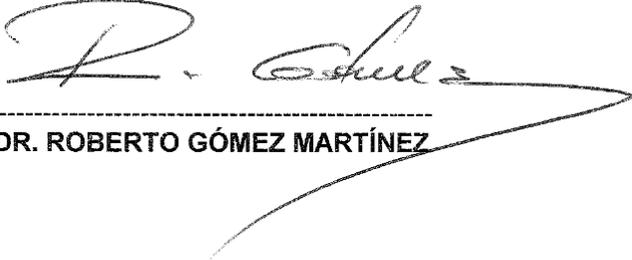
**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. José Alberto Escobar Sánchez  
Secretario: Dr. Oscar Alberto López Bátiz  
Vocal: Dr. Roberto Gómez Martínez  
1 er. Suplente: M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo  
2 do. Suplente: Dr. Adrián Pozos Estrada

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

**TUTOR DE TESIS:**



DR. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ

## ***Dedicatorias***

*A mis padres:*

***Héctor Díaz Cuin y Marcela Victoria Mendoza Demesa***

*Por haberme proporcionado todo su apoyo incondicional*

*A mi Padre, por enseñarme y darme el ejemplo de que con esfuerzo y sacrificios todo es posible*

*A mi Madre, por siempre estar en los momentos buenos y malos, por su dulzura y comprensión*

*Sobre todo les agradezco a ambos por su amor incondicional, por forjarme para ser una persona honesta, responsable y trabajadora, por apoyarme en mis buenas y malas decisiones, gracias por darme el mejor regalo que se le puede dar a un hijo: la educación profesional, por eso y más estaré agradecido con ustedes toda la vida...*

*A mi esposa:*

***Gabriela Martínez Rojas***

*Por su gran amor y apoyo incondicional para poder realizar este Posgrado, por sus consejos, por ser una persona persuasiva y motivarme a seguir adelante...*

*A mi hijo:*

***Eduardo Sebastián Díaz Martínez***

*Que es mi motivo, mi motor, para siempre estar un paso adelante, mi mayor estímulo para seguir luchando por lo que me apasiona, por todos estos momentos de felicidad a su lado, por ser lo mejor que me ha pasado en esta vida...*

*A mi hermana:*

***Yaranni Díaz Mendoza***

*Por el apoyo incondicional en todo lo que hago, por ser parte del sostén de mi vida, por brindarme su cariño y poder demostrarle que nunca se termina de aprender...*

## ***Agradecimientos***

*Al Dr. Roberto Gómez Martínez, por permitirme trabajar con usted, por dedicarme parte de su tiempo  
y confiar en mí para realizar este trabajo...*

*Al M. I. Raúl Sánchez García, por ser un gran amigo, por brindarme su apoyo para concluir este  
trabajo, por su orientación y enseñanza, por el apoyo incondicional hacia mi persona...*

*A mis sinodales, por sus comentarios respecto a este trabajo y poder enriquecerlo...*

*Al Instituto de Ingeniería de la UNAM y a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la  
UNAM, por brindarme un espacio para poder realizar este trabajo...*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo económico a lo  
largo de mis estudios de maestría...*

## CONTENIDO

|  |      |
|--|------|
| <b>RESUMEN</b> .....   | VII  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | VIII |
| <b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....                        | 1    |
| 1.1. OBJETIVOS Y ALCANCES .....                              | 2    |
| 1.1.1. Objetivo general .....                                | 2    |
| 1.1.2. Objetivos específicos .....                           | 2    |
| <b>CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL</b> .....                    | 3    |
| 2.1. PUENTES ATIRANTADOS.....                                | 3    |
| 2.2. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN .....                           | 7    |
| 2.2.1. Doble Voladizo .....                                  | 7    |
| 2.2.2. Empujado .....  | 8    |
| 2.3. IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS POR ETAPAS CONSTRUCTIVAS ..... | 13   |
| <b>CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL PUENTE</b> .....              | 14   |
| 3.1. INTRODUCCIÓN .....                                      | 14   |
| 3.2. UBICACIÓN .....   | 14   |
| 3.3. GEOMETRÍA .....   | 15   |
| 3.3.1. Subestructura.....                                    | 17   |
| 3.3.1.1. Estribo.....  | 17   |
| 3.3.1.2. Caballete.....                                      | 17   |
| 3.3.1.3. Pilas .....   | 17   |
| 3.3.1.4. Pilonos.....  | 20   |
| 3.3.2. Superestructura.....                                  | 22   |
| 3.3.2.1. Dovelas .....                                       | 22   |
| 3.3.2.2. Trabes maestras.....                                | 22   |
| 3.3.2.3. Piezas puente.....                                  | 23   |
| 3.3.2.4. Nariz de lanzamiento .....                          | 24   |
| 3.3.3. Sistema de atirantado .....                           | 25   |
| 3.4. MATERIALES .....  | 26   |
| 3.4.1. Concreto.....   | 26   |
| 3.4.2. Asfalto.....  | 26   |
| 3.4.3. Acero de refuerzo.....                                | 27   |
| 3.4.4. Recubrimientos .....                                  | 27   |
| 3.4.5. Acero en tirantes .....                               | 27   |
| 3.4.6. Acero estructural.....                                | 27   |
| 3.5. MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN .....                            | 27   |
| 3.5.1. Procedimiento constructivo, empuje de dovelas .....   | 31   |
| <b>CAPÍTULO 4. MODELO MATEMÁTICO</b> .....                   | 33   |
| 4.1. MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (MEF) .....                  | 33   |
| 4.1.1. Conceptos fundamentales.....                          | 33   |
| 4.1.2. Teoría de rigidez .....                               | 34   |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| 4.1.3.   | Elemento tipo barra (frame) .....   | 34         |
| 4.2.   | DESCRIPCIÓN DEL MODELO .....  | 36         |
| 4.2.1.   | Condiciones de apoyo .....  | 40         |
| 4.3.   | VERIFICACIÓN DEL MODELO .....   | 40         |
| 4.3.1.   | Verificación por peso .....   | 41         |
| 4.4.   | PROCESO DE EMPUJADO .....   | 41         |
| 4.4.1.   | Simulación .....  | 41         |
| 4.4.2.   | Fuerza de gateo .....   | 45         |
| 4.4.3.   | Control geométrico .....  | 45         |
| 4.5.   | TIPO DE ANÁLISIS .....  | 46         |
| <b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....</b>                                       |   | <b>47</b>  |
| 5.1.   | ANÁLISIS ESTÁTICO DEL PUENTE COMPLETO.....                                    | 47         |
| 5.1.1.   | Reacciones para verificar el peso de la superestructura .....                 | 47         |
| 5.2.   | ANÁLISIS POR FASES CONSTRUCTIVAS.....   | 48         |
| 5.2.1.   | Momento flexionante en la dirección x-z del plano por etapa constructiva..... | 48         |
| 5.2.2.   | Fuerza cortante en la dirección x-z por etapa constructiva .....              | 53         |
| 5.2.3.   | Envolvente de momentos .....  | 58         |
| 5.2.4.   | Deformación del tablero por etapas constructivas (flechas verticales).....    | 59         |
| 5.2.5.   | Control geométrico teórico .....  | 63         |
| <b>CAPÍTULO 6. REVISIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PRINCIPALES .....</b> |   | <b>655</b> |
| 6.1.   | NORMA AASHTO LRFD 2012 .....  | 65         |
| 6.1.1.   | Filosofía de Diseño por Factores de Carga y Resistencia .....                 | 65         |
| 6.1.2.   | Constructibilidad .....   | 65         |
| 6.1.3.   | Factor de carga para construcción.....  | 66         |
| 6.2.   | MEMORIA DE CÁLCULO .....  | 67         |
| 6.2.1.   | Resumen de momentos y cortantes .....   | 68         |
| 6.2.2.   | TM2 IZQ.....  | 70         |
| 6.2.3.   | Resumen de esfuerzos .....  | 74         |
| <b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>                  |   | <b>75</b>  |
| 7.1.   | CONCLUSIONES .....  | 75         |
| 7.2.   | RECOMENDACIONES .....   | 76         |
| <b>CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                     |   | <b>77</b>  |
| <b>APÉNDICE A. MEMORIAS DE CÁLCULO DEL TRAMO EMPUJADO DEL PUENTE ...</b> |   | <b>79</b>  |
| A.1.   | NARIZ .....   | 79         |
| A.2.   | TM2 IZQ .....   | 83         |
| A.3.   | TM1 IZQ, TMDP, TM1 .....  | 91         |
| A.4.   | TM2, TM3, TM4.....  | 103        |
| A.5.   | TM5, TM6, TM7.....  | 119        |
| A.6.   | TM8-TM15 .....  | 135        |

## **RESUMEN**

En el presente trabajo, se efectúa un análisis por etapas constructivas de una parte de un puente atirantado construido por el método de empujado. Se revisan las deflexiones verticales, así como los esfuerzos y elementos mecánicos a los que será sometida la superestructura durante su construcción mediante empuje. Se revisa también el diseño de los elementos estructurales principales ante la norma AASHTO LRFD 2012 por constructibilidad.

**ABSTRACT**

In the present work shows a detailed analysis made by structural stages from a part of a cable-stayed bridge built with the incremental launching method. The deflections are also reviewed in this work, as well as the efforts and the mechanic elements which the superstructure will be subjected during its pressure. Finally, the design of the main structural elements under AASTHO LRFD 2012 by constructability is also examined.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta una evaluación aproximada de la construcción de una parte de un puente atirantado, el puente se contruye por dos metodos, método empujado y método en voladizo; este trabajo solo se enfoca a la parte del empujado mediante la modelación por etapas constructivas del mismo, empleando el programa SAP2000, por lo que se realizará un modelo matemático lineal de las diferentes etapas constructivas, lo que permite tomar en cuenta los esfuerzos producidos en los elementos estructurales principales, así como determinar el control geométrico teórico de las deflexiones verticales que se presentarán en el empuje. Y revisar el diseño de las dovelas metálicas.

En el método de empujado, la superestructura es fabricada por segmentos (dovelas) y se empujan desde un extremo de un claro para su posición final a lo largo de los claros. Se comporta como un voladizo a medida que se va avanzando hasta encontrar el próximo apoyo.

El puente en estudio es “La Concordia”, de 703m de longitud, se localiza de frente hacia Rizo de Oro, y en el frente hacia La Concordia. Cruza un área de la Presa “Belisario Domínguez (La Angostura)”, para conectar con el Poblado de Ignacio Zaragoza y que conecta con el camino de terracería que conduce a los Poblados de Niños Héroes y al Poblado de la Concordia, la cual conduce hasta la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

En términos generales, el puente se constituye por dovelas de acero grado A50. El claro central tiene una longitud de 348m soportado por 56 tirantes, 2 pilones, 4 pilas y 2 estribos. El tramo empujado a analizar comprende 4 claros, uno de 35m y 3 claros de 48m, soportados por 3 pilas, 1 pilon y 1 estribo.

Este trabajo se compone de 8 capítulos y 1 apéndice, siendo el primero de ellos el presente. En el capítulo 2 se hace referencia a un marco conceptual basándose en concepto de puentes atirantados y puentes empujados, sus diferentes métodos de construcción y la importancia que tiene este sistema de construcción ante este tipo de estructuras especiales.

En el capítulo 3, se describe brevemente el proyecto del puente especial “La Concordia”, indicando los elementos que lo componen, así como las diferentes etapas de construcción a seguir según el proyecto.

En el capítulo 4 se habla sobre el modelado matemático del puente, donde se especifica el tipo de modelado por medio del Método de Elemento Finito (MEF), las propiedades de los materiales a utilizar, así como las propiedades geométricas de las secciones para realizar el modelo. Se hace referencia a las fuerzas de gateo que se necesitan para levantar la superestructura y recuperar la flecha producida por el empuje del puente, así como su control geométrico de deflexiones verticales durante cada etapa.

En el capítulo 5 se presentan los resultados generales obtenidos, identificando los elementos mecánicos máximos a los que será sometida la superestructura durante su construcción, así como las flechas máximas producidas y su respectiva fuerza de gateo teórica que se aplicará en obra. Se presenta el control geométrico teórico para comparar con lo monitoreado en sitio.

En el capítulo 6 se presenta un resumen de los elementos mecánicos máximos y el resumen de esfuerzos a las que la superestructura será sometida dante las fases de empujado; se presenta una memoria de cálculo más significativa para la revisión del diseño de los elementos estructurales principales (trabes maestras) con la norma AASHTO LRFD 2012.

En el capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo. Y por último en el capítulo 8 se presenta la bibliografía de donde se obtuvo la información necesaria para comprender el comportamiento estructural de un puente empujado.

Debe mencionarse que el análisis se realiza sin losa, se omitirán los efectos producidos por viento, sismo y los efectos de la temperatura.

Se incluye un apéndice A donde se encuentran todas las memorias de cálculo del tramo empujado del puente.

## **1.1. OBJETIVOS Y ALCANCES**

### **1.1.1. Objetivo general**

- Determinar el comportamiento de la superestructura del puente especial “La Concordia” en las distintas fases de construcción.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Calcular los esfuerzos que se generan en los principales elementos de la superestructura debidos al método de construcción de empujado.
- Revisar la capacidad resistente de los principales elementos de la superestructura.
- Determinar el control geométrico de lo que puede esperarse durante la construcción del puente

## CAPÍTULO 2

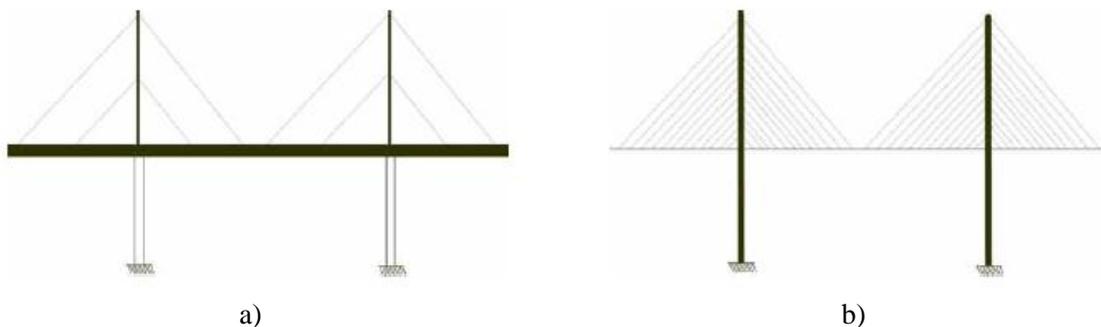
### MARCO CONCEPTUAL

#### 2.1. PUENTES ATIRANTADOS

Un puente atirantado, se define como un sistema formado por vigas longitudinales y transversales, un tablero y elementos de soporte como son, pilas y pilones que trabajan en compresión, así como cables inclinados que trabajan en tensión que dan soporte al tablero. En forma importante, la correlación de estos elementos depende del sistema de atirantamiento, distinguiéndose la distribución transversal y horizontal de tirantes (Pozos, 2004).

Los cables tienen una alta resistencia de acero con el que están hechos, proporcionan al tablero una serie de apoyos intermedios. Los pilones son necesarios para elevar el anclaje fijo de los tirantes, de forma que introduzcan fuerzas verticales en el tablero. Los tirantes al ser inclinados, introducen fuerzas horizontales en el tablero y verticales al pilón. Por todo ello, los tres elementos; tirantes, tablero y pilones, constituyen la estructura resistente básica de un puente atirantado.

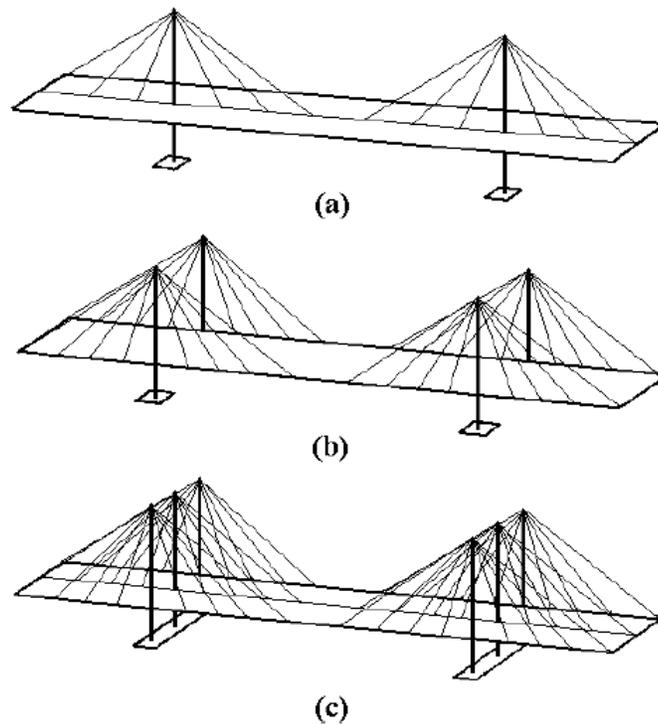
En general, el comportamiento de cada uno de los elementos se relaciona íntimamente con los otros, ya que entre ellos se reparten la carga de forma que, en un caso extremo, el tablero es estructuralmente rígido para soportar la mayoría de la carga, con pilas de poca capacidad y pocos tirantes (figura 2.1.a). Por otra parte, el tablero puede tener una mínima capacidad de carga, en tanto que la pila y un suficiente número de tirantes sean los que resisten la mayor carga (Figura 2.1.b).



**Figura 2.1. a) Tablero de alta capacidad estructural y sistema de atirantamiento de baja capacidad estructural, b) tablero de baja capacidad estructural y sistema de atirantamiento con alta capacidad estructural.**

Uno de los aspectos fundamentales que se debe analizar en el diseño y comportamiento de un puente atirantado es la distribución y el arreglo del sistema de suspensión, ya que éste no sólo afecta el comportamiento y desempeño estructural del puente, sino también sus dimensiones, los métodos constructivos y, al final, el costo total de construcción.

Los sistemas de suspensión pueden ser, en general, de tres diferentes tipos. El primero, de suspensión central (Figura 2.2.a); el segundo, de suspensión lateral (Figura 2.2.b); y el último, de suspensión en tres planos (Figura 2.2.c)



**Figura 2.2. Tipos de puentes, según el número de planos de atirantamiento**

Los tirantes son uno de los principales miembros estructurales del puente atirantado. Por esta razón, se debe seleccionar cuidadosamente su tipo, material y fabricación.

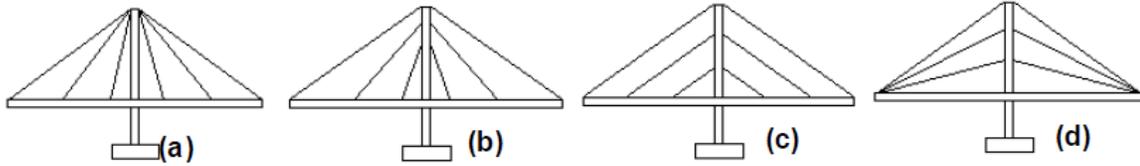
Los requerimientos más importantes para la sección de los cables son:

- Alta capacidad de soporte
- Módulo de Young alto y estable
- Sección transversal compacta
- Alta resistencia a la fatiga
- Facilidad de protección a la corrosión
- Fácil manejo e instalación
- Bajo costo

Otro aspecto fundamental en el diseño y comportamiento de puentes atirantados es la distribución geométrica de los tirantes.

Longitudinalmente se distinguen cuatro disposiciones de los tirantes mostrados en la figura 2.3:

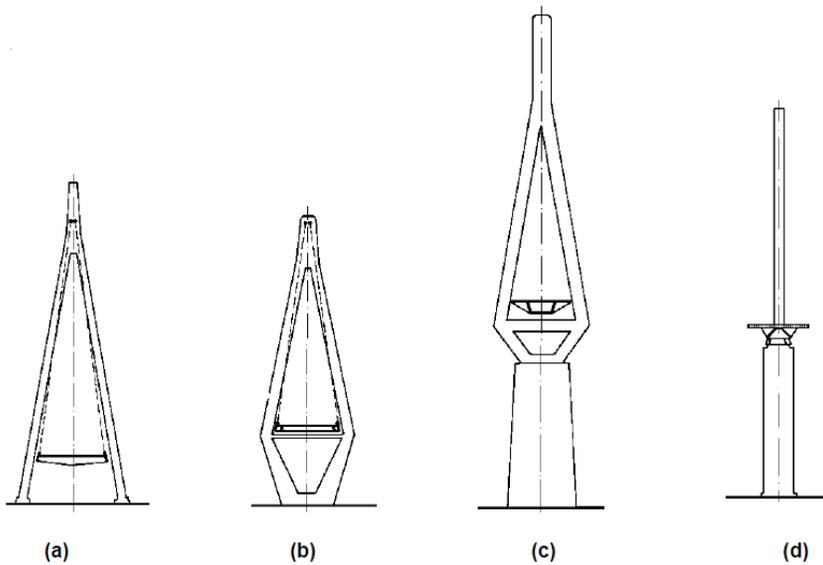
- En abanico.- Todos los tirantes convergen en el vértice del pilón y soportan la componente máxima de las cargas vivas y muertas, siendo mínima la carga axial del tablero.
- En semiabanico.- Los tirantes se reparten regularmente en la parte superior del pilón.
- En arpa.- Todos los tirantes son paralelos entre sí, reduciendo los riesgos de inestabilidad dinámica del pilón a causa del reparto de los tirantes en toda la altura.
- En estrella.- Los cables se reparten en la altura del pilón, uniéndose en un solo punto del tablero, sin que los puntos de anclaje sean distribuidos tanto como sea posible.



**Figura 2.3. Distribución longitudinal de tirantes: a) en abanico, b) semiabanico, c) arpa, d) estrella**

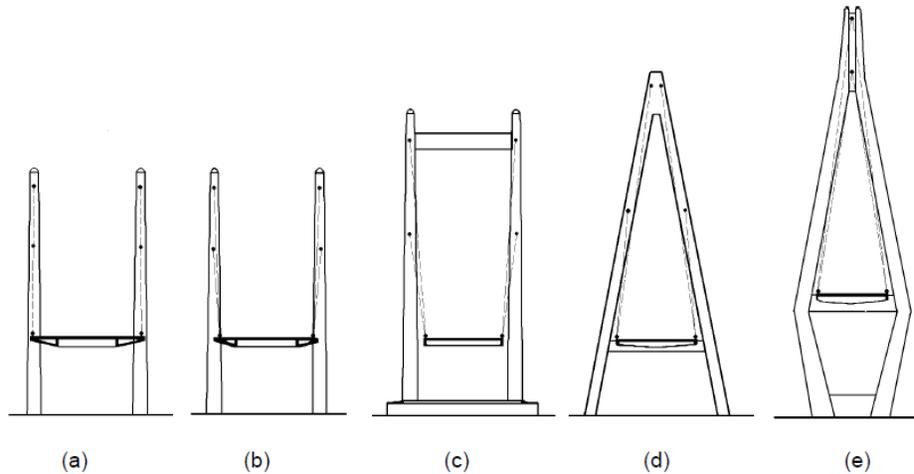
La forma del pilón es decisiva para la expresión estética de los puentes atirantados, su diseño siempre debe de ser refinado y de proporciones adecuadas. Su forma depende de varios factores, entre ellos se encuentran las acciones sobre el puente, la suspensión, el comportamiento, tamaño de los claros, etc. Sin embargo, las más comunes son las de forma de: triángulo; diamante; de una columna; de doble columna paralela; o de columna con vigas transversales (Figura 2.4. y 2.5.)

Existen diseños en los cuales el soporte superior en la columna es en el plano central, mientras que en el tablero es en los planos laterales (Figura 2.4.a y 2.4.b). Otra posibilidad es tener todo el sistema de atirantamiento (columna y tablero) en el plano central (Figura 2.4.c y 2.4.d), o contar con dos sistemas de atirantamiento, cada uno en los planos laterales del puente (Figura 2.5.a, 2.5.b y 2.5.c).



**Figura 2.4. Diseño típicos de pilas con atirantamiento en el plano central**

Dentro de la diversidad de diseños para pilones, se pueden considerar aquellas con varios planos de atirantamiento (Figura 2.5.d), donde una parte de los tirantes se sujetan en la parte superior central de la pila y otra en dos planos laterales. Adicionalmente, existen las variantes en las que los tirantes están alineados con el plano de las columnas (Figura 2.5.a) o en las que tienen una ligera inclinación (que puede ser hacia adentro o afuera), respecto al plano de las columnas (Figura 2.5.b).



**Figura 2.5. Diseño típicos de pilas con atirantamiento en los dos o en varios planos laterales**

El comportamiento estructural de los pilones depende principalmente de sus conexiones con los cables, tablero y pila. Es indispensable diseñar estas conexiones de tal manera que se reduzcan los momentos flexionantes de los pilones.

La sección transversal del tablero de un puente atirantado tiene que satisfacer un cierto número de imperativos: gran ligereza, estabilidad aerodinámica, facilidad de anclaje de los tirantes y la rigidez necesaria para que soporte cargas torsionales (Figura 2.6.). La sección transversal es diferente según el modo de suspensión del mismo: suspensión axial o suspensión lateral.

En lo que corresponde a diferentes tipos de tableros, existen los siguientes tipos:

- Tablero de acero
- Tableros ortotrópicos
- Tableros de concreto
- Tableros mixtos

| ARREGLO  | SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TABLERO | TIPO DE VIGA         | SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TABLERO |
|--|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| DOBLE VIGA I                                       |                                 | VIGA DE CAJÓN SIMPLE |                                 |
| VIGA CAJÓN RECTANGULAR SIMPLE                      |                                 | VIGA DE CAJÓN DOBLE  |                                 |
| VIGA CAJÓN CENTRAL CON ALMAS LATERALES DE VIGAS I  |                                 | VIGA DE CAJÓN DOBLE  |                                 |
| VIGA CAJÓN CELULAR SIMPLE CON DOBLE ALMA INCLINADA |                                 | VIGA DE CAJÓN DOBLE  |                                 |
| VIGA CAJÓN TRAPEZOIDAL SIMPLE                      |                                 | VIGA CAJÓN MULTIPLE  |                                 |
| VIGA CAJÓN RECTANGULAR DOBLE                       |                                 |                      |                                 |
| VIGA CAJÓN TRAPEZOIDAL DOBLE                       |                                 |                      |                                 |

(a)

(b)

**Figura 2.6. Secciones de tableros: a) acero, b) concreto reforzado y presforzado**

## 2.2. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN

Los puentes atirantados son estructuras altamente hiperestáticas, bastantes sensibles a la secuencia constructiva, sin embargo debido a la flexibilidad del tablero, este acepta una gran gama de fuerzas de instalación de los tirantes. Es importante escoger una distribución apropiada para estas fuerzas sobre carga permanente, tal que la flexión del tablero sea limitada a no sufrir deformación.

Existe una gran variedad de sistemas para la construcción de puentes, desde los más simples como es la cimbra en el suelo, hasta elaborados sistemas constructivos que conlleva a ventajas destacables para el desarrollo del proyecto. El empuje de puentes, está dentro de esta gran gama de métodos constructivos desarrollando y alcanzando grandes avances en estos últimos años.

El puente atirantado “La Concordia” se construye en dos fases: método de empujado y método en voladizo.

### 2.2.1. Doble Voladizo

El método del voladizo es prácticamente la única solución para la erección de grandes claros. La construcción de cada segmento del tablero se sostiene por un cable o par de cables que equilibran su peso y quedan suspendidos, posteriormente se coloca el nuevo segmento de tablero sostenido también por cables hasta lograr la erección del puente. Normalmente, la erección se hace desde las torres ó pilones hacia los apoyos de anclaje ó estribos y desde el centro del claro principal por dobles voladizos. Este procedimiento se va desarrollando a ambos lados del pilon para equilibrar los momentos flectores que se van produciendo como se muestra en la figura 2.7.

La estabilidad del volado se asegura en cada etapa de la construcción por los tirantes, de longitud creciente, en función del mismo avance, dispuesto en la losa superior del tablero.



**Figura 2.7. Construcción en doble voladizo, puente el Carrizo**

Los valles profundos en zonas montañosas o curso de aguas ininterrumpible; hacen que este sistema sea utilizado con gran frecuencia debido a la carencia de soporte en tierra; por lo contrario, la utilización de pilas intermedias temporales incrementarían considerablemente el costo de la obra en ejecución.

En el avance en voladizo, a medida que se va ejecutando la construcción de los tramos, genera momentos flexionantes de una viga en voladizo o ménsula; al instante de empalmar con el otro extremo en el centro del claro, estos momentos se generan en un extremo del claro casi totalmente contrarios a los esfuerzos de la ménsula y se generan momentos flexionantes relativos a una viga continua, por lo cual, cuando se diseña la superestructura, estos cambios de momentos deben ser considerados.

### 2.2.2. Empujado

En este método, la superestructura es fabricada por segmentos (dovelas) y se van empujando para su posición final desde un extremo del puente. Se comporta como un voladizo a medida que se va avanzando hasta encontrar el siguiente apoyo y entonces cambia su comportamiento como viga continua.

La estructura es empujada con gatos hidráulicos y sobre aparatos de apoyos deslizantes de teflón ubicados sobre las pilas, que, dependiendo del tamaño del claro, pueden ser permanentes o provisionales. Una vez que el tramo de la estructura queda en voladizo y hasta alcanzar el apoyo, se utiliza una estructura adicional (nariz de lanzamiento) que desde el inicio del empuje va fija a la superestructura, la cual alcanza el apoyo antes que la estructura disminuyendo el voladizo y reduciendo el momento negativo en la superestructura, debido a que la nariz es más ligera.

El empuje de puentes es un procedimiento por el cual el puente es construido en zonas o lugares favorables, ubicados de tal forma que permitan la alimentación de materiales, como también para los propios trabajadores que realizan esta tarea, para luego ser empujados o lanzados mediante elementos de empuje hidráulico a su lugar definitivo (Figura 2.8.).

Uno de los objetivos que persiguen el sistema de puentes empujados es el de sistematizar un ciclo de construcción que haga factible el trabajo en varios frentes sin que los mismos se obstaculicen. Dicha sistematización es muy ventajosa la cual permite que el personal realice diferentes labores los cuales culminarán con el empujado de cada una de las dovelas.

Una ventaja del sistema estructural de la superestructura que se genera mediante el empuje de puentes, es que al ser lanzadas las secciones una a una y al ensamblarlas, se crea una viga continua en toda su sección, entregando ventajas debido a la morfología de este tipo de puentes, las cuales se pueden nombrar entre otras:

- Menor cantidad de material con respecto a otros sistemas estructurales
- Mayor control de deflexión y fatiga



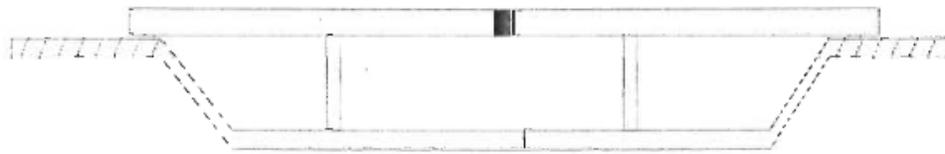
**Figura 2.8. Viaducto de Millau, construcción mediante empuje**

Se pueden considerar dos tipos principales de puentes empujados, ya sea que la obra se construya por desplazamiento desde un solo frente; en la figura 2.9 el empujado se efectúa por segmentos sucesivos de longitudes generalmente entre 10 y 50m, a partir de una plataforma situada detrás de un estribo o caballete, sobre el cual se prefabrica la nariz de lanzamiento (es el elemento estructural que se coloca al principio de la superestructura, y tiene el propósito de ayudar a recuperar la flecha y poder colocar la superestructura sobre las pilas o estribos). Cada fase de construcción va seguida de una fase de empujado durante la cual se libera el segmento construido para permitir la construcción siguiente. Durante la fase de construcción, el sistema semeja al de una viga continua cuyo grado de hiperestaticidad aumenta hasta la última operación de empujado.



**Figura 2.9. Empujado por un solo frente**

O desde los dos frentes de la obra, en la figura 2.10 las dos mitades se construyen en cada uno de los márgenes sobre superficies de prefabricación situadas detrás de cada estribo, ya terminados se empujan uno hacia el otro hasta que se unan en el centro.



**Figura 2.10. Empujado desde los dos frentes**

Existen innumerables elementos que componen este sistema constructivo, pero existen elementos que son imprescindibles para el procedimiento de empuje y la combinación de todos o de algunos de ellos lleva a la estructura a su posición final. Los elementos auxiliares necesarios para la construcción de un puente empujado son los siguientes:

- Patio de ensamble
- Nariz de lanzamiento
- Gatos de empuje
- Apoyos deslizantes

### **Patio de ensamble**

El patio de ensamble se compone de tres partes principales, zona de ensamble o colado (según el material que sea utilizado), zona de deslizamiento y zona del estribo donde generalmente se colocan los gatos que producen el empuje.

El sistema de empuje consta de las siguientes partes:

1. Apoyos provisionales
2. Gato de empuje horizontal
3. Gato de empuje vertical

Para puentes mixtos, existe la posibilidad de ser empujados con o sin losa de concreto, siendo las secciones de acero estructural ensambladas y soldadas en el patio de ensamble, una vez realizada las soldaduras de acoplamiento se elaboraría la losa de concreto, en el caso de que fuese a lanzarse con ella; de lo contrario la losa se ejecutaría una vez que la superestructura de acero quede en su lugar definitivo.

### **Nariz de lanzamiento**

Es una estructura metálica colocada al inicio de la superestructura, la cual sirve principalmente para recuperar las flechas que se presentan durante el empujado y cuando inicia su colocación en la pila sirve de guía de la superestructura.

### **Gatos de empuje**

Pueden ser de dos tipos: gatos que tiran del puente o gatos que empujan al puente. Los primeros pueden ser de cualquier tipo y transmiten su carga por medio de cables o barras; los gatos que empujan son los más comunes y se componen de un gato que levanta al puente y uno que empuja.

### **Apoyos deslizantes**

Durante todo el proceso de lanzamiento y en todos los puntos donde el puente se apoya, ya sean pilas, estribo o en el patio, se deben de utilizar apoyos. Estos pueden ser de dos tipos: provisional o definitivos. El apoyo provisional se emplea en todas las zonas en donde no va a estar la superestructura, como es el caso del patio de ensamble; en el caso de las pilas, los apoyos pueden ser provisionales y posteriormente ser sustituidos por unos definitivos.

El principio mismo del método de empujado hace que, cada sección durante el empujado, se encuentre sucesivamente en posición sobre el apoyo, por lo tanto, sujeta a un momento de flexión negativo, y en posición en medio del claro, sujeto a momento positivo. Esta alternancia de tensiones no afecta a estructuras con material homogéneo como el acero, a diferencia de estructuras de concreto que requiere una concepción y una dimensión particular.

### **Problemas derivados del empuje**

Existen 2 principales problemas que se generan durante el empuje. Los cuales son:

- Efecto ménsula
- Deslizamiento de la superestructura

### **Efecto ménsula**

Se refiere al excesivo esfuerzo de momento flexionante que se incrementa a medida que es lanzada cada una de las secciones del puente y el voladizo va aumentando. Se origina justo en la pila anterior cuando la superestructura esta por alcanzar la pila siguiente donde se encuentra totalmente en voladizo y se presenta el efecto ménsula.

Esto provoca elevados costos en las secciones por la necesidad de utilizar mayor material para poder soportar estos momentos flexionantes.

Para lograr la reducción de este momento flexionante sobre la pila anterior, se utilizan estructuras auxiliares que sirven para mitigar estos esfuerzos. Es así como se pueden emplear 3 diferentes soluciones, independientemente cada una de ellas o en su conjunto, estas son:

1. Nariz de lanzamiento
2. Torre de atirantamiento
3. Pilas provisionales

### **Nariz de lanzamiento**

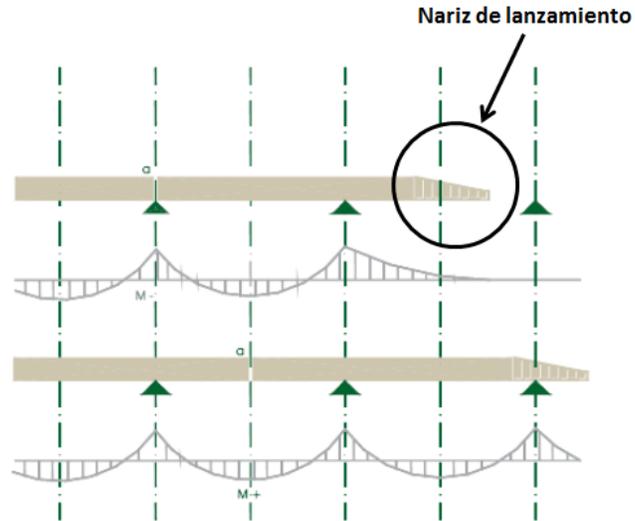
La nariz de lanzamiento, se ha utilizado desde los comienzos de la implementación del sistema de empuje como método constructivo de puentes. Consiste en una extensión de la superestructura perfectamente integrada; estructura metálica generalmente en celosía, con mayor o menor rigidez, que se une a la superestructura mediante tornillos de conexión que hacen que la estructura forme parte compuesta del puente (Figura 2.11.)



**Figura 2.11. Puentes empujados y nariz de lanzamiento**

La unión de la nariz de avance soporta la transferencia total de los esfuerzos, por lo cual ésta debe ser capaz de traspasar a la superestructura la flexión y cortante, producido por la reacción de la pila cuando la nariz está actuando con ella (Figura 2.12.)

En la pila existen unos gatos hidráulicos provisionales que actúan una vez que la nariz esta sobre la pila; procedimiento realizado para eliminar la flecha de la superestructura, producido por la carga de peso propio cuando se encuentran en voladizo, para que así la superestructura ingrese a la pila sin problemas.



**Figura 2.12. Momentos flexionantes con nariz de lanzamiento**

### **Deslizamiento excesivo de la superestructura**

Un inconveniente que ha traído dificultades en obras, es el deslizamiento descontrolado que puede sufrir la superestructura, cuando ésta es lanzada con pendiente a favor. El hecho de utilizar apoyos deslizantes con elementos que disminuyen el rozamiento; contribuye a que la superestructura pueda deslizarse sin control por su propia inercia, adquiriendo una velocidad de empuje, que debido a la magnitud de la estructura y su peso propio, logra vencer el rozamiento dinámico deslizando sin poder frenarla (Figura 2.13.); por lo que se debe de tomar en cuenta esto en los análisis de fases constructivas.



**Figura 2.13. Deslizamiento de la superestructura**

### 2.3. IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS POR ETAPAS CONSTRUCTIVAS

Para lograr una buena eficiencia que proporciona un puente atirantado y garantizar su funcionalidad es necesario un correcto diseño y una adecuada construcción del mismo, factores que están ligados a tratar de conocer su comportamiento estructural en sus diferentes fases constructivas. Este aspecto se torna un tanto complejo debido a que intervienen multitud de factores entre los que cabe destacar la variación de las propiedades de los materiales con el tiempo, las características geométricas, un bajo amortiguamiento y la gran flexibilidad de este tipo de estructuras (Sánchez, 2010).

En los puentes construidos por etapas, debido a las propiedades inherentes de los materiales empleados, las condiciones propias del lugar, la edad a la cual los elementos son cargados, la secuencia de construcción, entre otros factores, el análisis de la estructura en su configuración final, sin tener en cuenta el proceso constructivo, podría dar resultados alejados de la realidad, ya que durante las etapas de construcción, las propiedades geométricas y mecánicas pueden variar fuertemente, y los efectos generados evolucionan significativamente después de que el puente esté construido (Somja and De Ville de Goyet, 2008).

Las etapas quedan delimitadas por aquellos instantes en los que se producen variaciones en las cargas exteriores, se efectúan cambios en las características resistentes o se modifican las condiciones de frontera de la estructura. Se exhibe una respuesta estructural altamente no lineal, principalmente por la no linealidad geométrica de los tirantes, por la combinación de momento y carga axial en el tablero y pilones y por el comportamiento no lineal de los materiales.

La técnica de construcción por empuje, resulta económicamente factible sin embargo puede representar para los ingenieros un problema substancial de análisis y diseño. Las diferentes condiciones en las que la estructura es expuesta a la hora del empuje provocan variación en el tiempo de los materiales usados en la superestructura, por lo que existe una variación considerable de los elementos mecánicos durante las diferentes fases constructivas.

El empuje de puentes ofrece varias ventajas, una de las principales es la eliminación de la cimbra, logrando una perturbación mínima al entorno. Se logra un buen nivel de prefabricación de dovelas, contribuyendo a la rapidez de ejecución del empuje, disminuyendo con ello el costo de la obra en función de la cantidad de claros a ejecutar.

El sistema constructivo empuje de puentes, es un sistema que se utiliza con mayor frecuencia para construir puentes en gran parte del mundo. Es un sistema el cual requiere profesionales especializados y equipamiento específico, con ventajas tanto desde el punto de vista del tiempo requerido de ejecución para la construcción como por las ventajas económicas que ofrece la tipología estructural.

## CAPÍTULO 3

### DESCRIPCIÓN DEL PUENTE

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto forma parte del Programa General de Modernización de la Red de Carreteras Alimentadoras de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (S.C.T.) en el estado de Chiapas; de la vialidad primaria municipal de La Concordia. La construcción del puente surge de la necesidad de intercomunicar e integrar a los poblados que se encuentran en el Suroeste de la Presa La Angostura; a través de la modernización de una vía de comunicación, donde actualmente el único medio de transporte es la “panga o chalán”, se pretende reducir los riesgos de traslado, así como los tiempos de recorrido; facilitando el desplazamiento de personas y el transporte de sus productos y bienes. (Manifestación de impacto ambiental modalidad particular S.C.T.)

#### 3.2. UBICACIÓN

El puente “La Concordia” se localiza en el km 62+795.000 a una elevación respecto al nivel del mar de 574.576 m en el lado Rizo de Oro, y en el lado La Concordia en el km 63+498.000 a 564.634 m sobre el nivel del mar. Cruza un área de la Presa “Belisario Domínguez (La Angostura)”, para conectar con el Poblado de Ignacio Zaragoza y a su vez conecta con el camino de terracería que conduce a los Poblados de Niños Héroe y de la Concordia, y después conduce hasta la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chs.

Las coordenadas geográficas que le corresponden son:

**Inicio del puente:**

Latitud Norte 92°35'22''

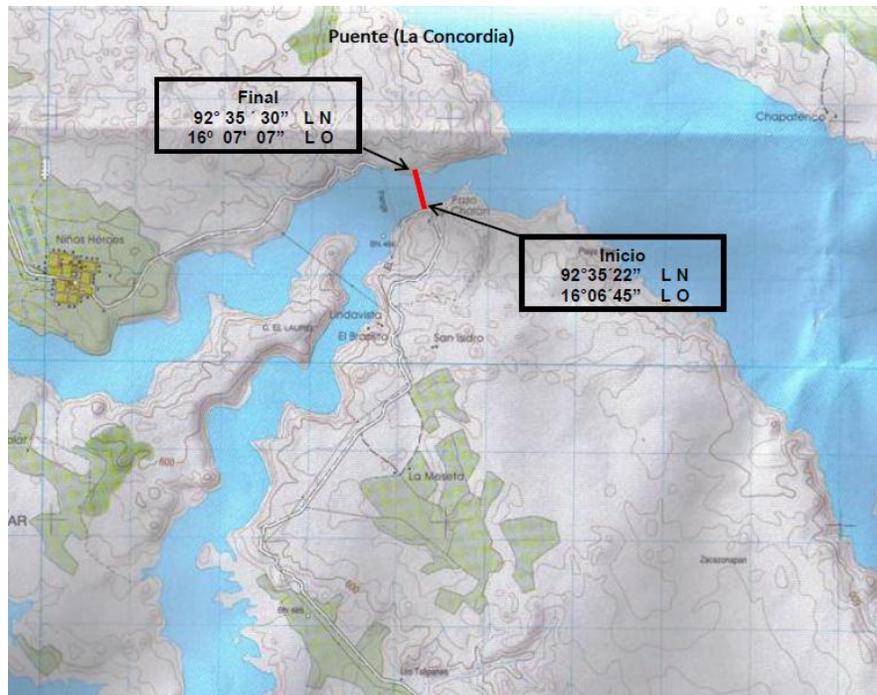
Longitud Oeste 16°06'45''

**Término del puente**

Latitud Norte 92°35'30''

Longitud Oeste 16°07'07''

En la figura 3.1 se muestra la localización geográfica del puente “La Concordia”



**Figura 3.1. Ubicación del sitio en donde se construirá el Puente La Concordia**

### 3.3. GEOMETRÍA

El puente “La Concordia” está formado por 7 claros, uno de 31 m, cuatro claros de 48 m, uno de 35 m, y un claro principal de 348 m, también cuenta con un bloque de concreto de 97 m para anclar los tirantes, que nos da una longitud total del puente de 703 m.

El trazo del puente en planta es recto; presenta una pendiente positiva de 1.5% y cuenta con un tramo adicional de acceso al final del eje 8.

El puente estará compuesto por 53 dovelas de acero, que miden 12 m de longitud cada una, mientras que la dovela de cierre es de 2 m de longitud y las dovelas de estribo son de 6 m de longitud de acuerdo con el proyecto.

Como características generales se pueden mencionar:

- Largo: 703 m.
- Claro central: 348 m
- Ancho total del tablero: 13.06 m
- Ancho de calzada: 3.5 por lado (7 m)
- Acotamientos: 2 de 2 m uno por sentido
- N° de carriles: 2 carriles, uno por sentido de 3.5 m cada uno

En la figura 3.2 se ilustra la proyección en alzado y en planta del puente.

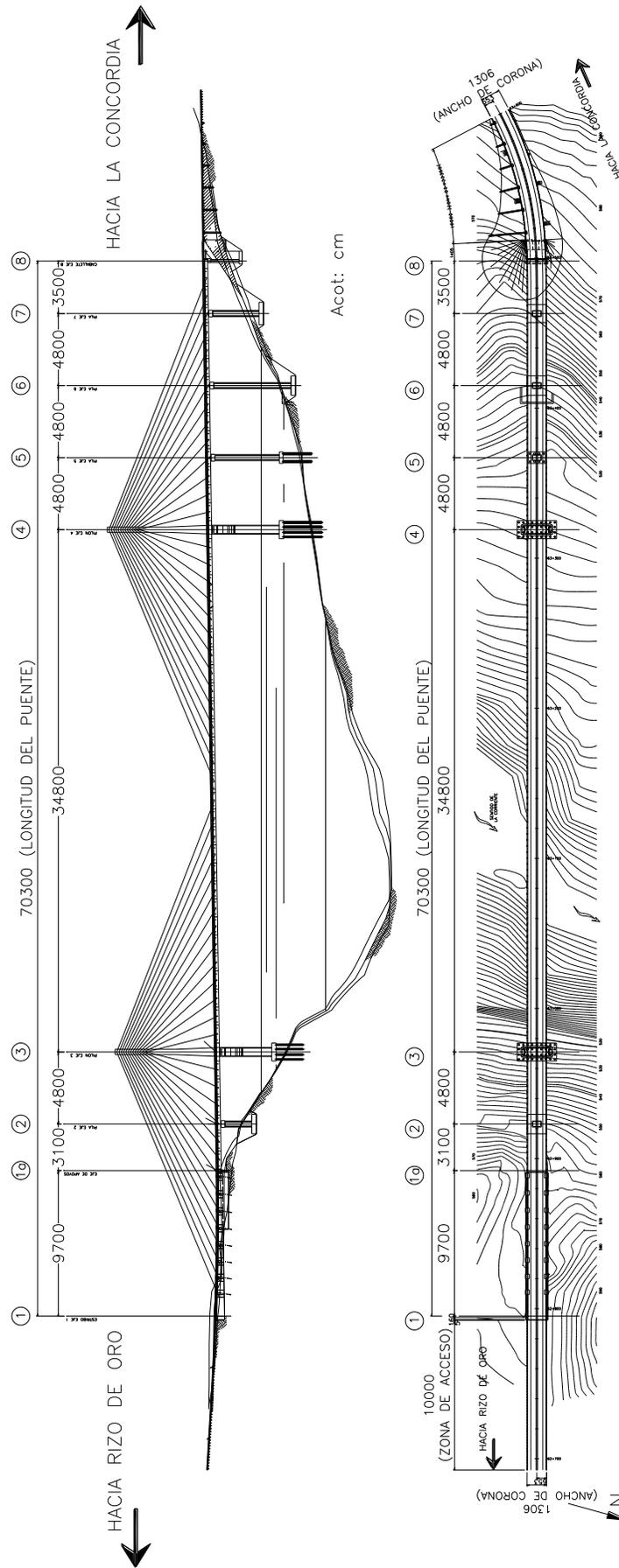
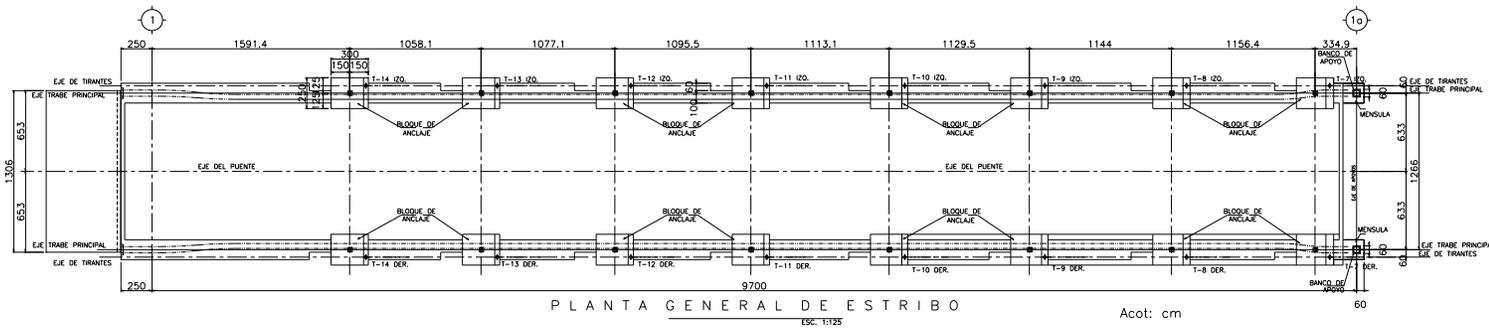


Figura 3.2. Elevación y planta del puente La Concordia

### 3.3.1. Subestructura

#### 3.3.1.1. Estribo

Del eje 1 al eje 1a se tiene un bloque de concreto reforzado masivo donde se colocan 16 bloques de anclaje para los tirantes. Al llegar al eje 1a se construyen 2 ménsulas y su respectivo banco de apoyo con sus bases de neopreno, donde descansarán las traves principales de acero, como se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.3. Vista en planta del estribo del eje 1 al 1a**

#### 3.3.1.2. Caballete

En el eje 8 se tiene un caballete conformado por tres columnas circulares, apoyadas sobre una zapata de distribución. Se proyectó un muro de respaldo (para el sostén del relleno una vez finalizada la obra), y también cuenta con muros laterales, bancos de apoyo con bases de neopreno, así como sus respectivos topos sísmicos para evitar desplazamientos transversales de la superestructura ante la existencia de fuerzas dinámicas. Es soportado por columnas circulares de 18.65 m de altura como se muestra en la figura 3.4.

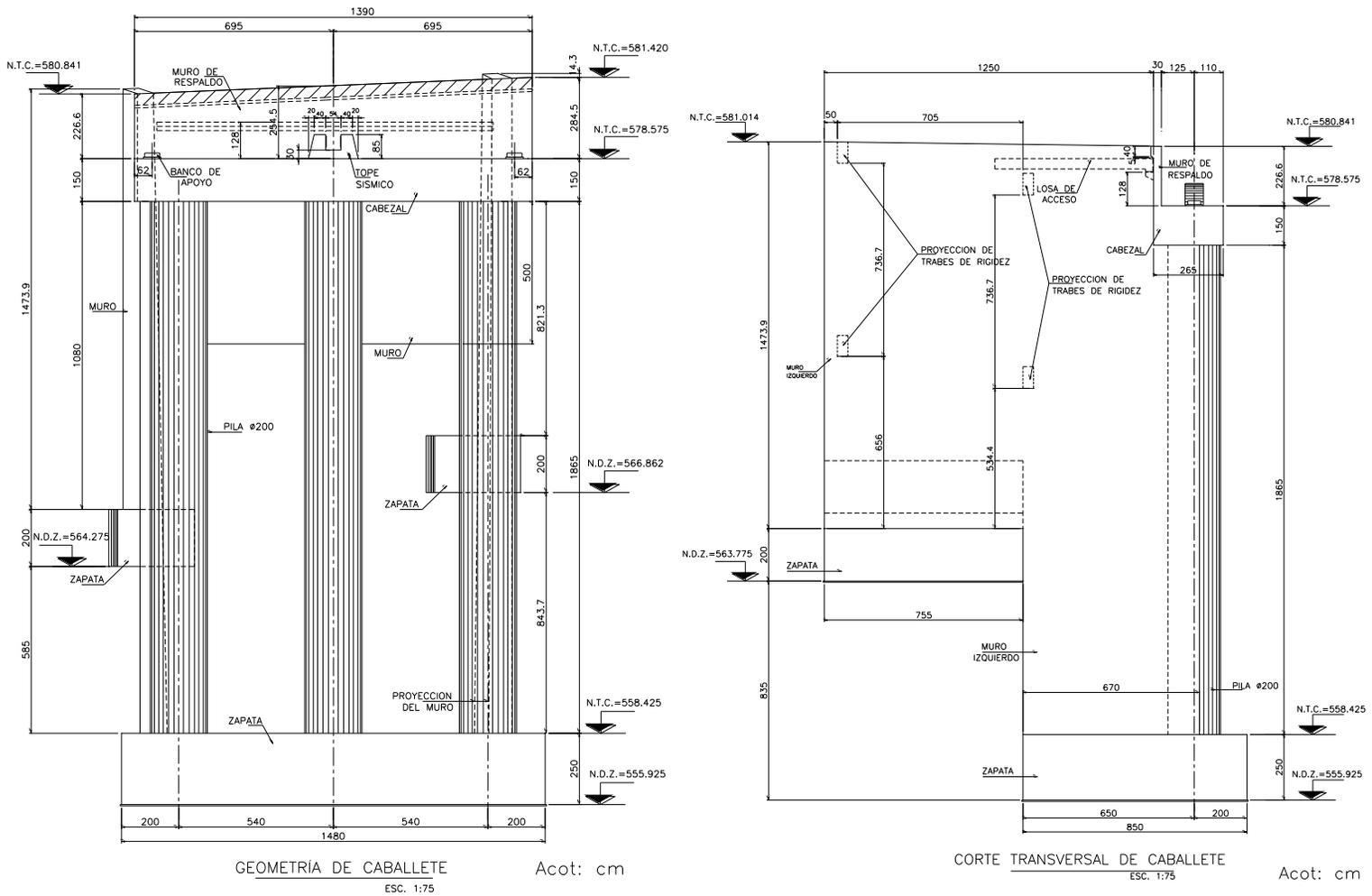


Figura 3.4. Caballete eje 8

3.3.1.3. Pilas

Para los ejes 3, 4 y 5 la cimentación consiste en una zapata de distribución soportada mediante pilotes de acero, estos pilotes tienen un diámetro de 1.2 m y un espesor de pared de 0.016 m, rellenos de concreto  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ . En la figura 3.5 se ilustra la forma general de las pilas que tienen una cimentación a base de pilotes.

Las pilas restantes (eje 2, 6 y 7) estarán cimentadas únicamente sobre zapatas de concreto reforzado, siendo la altura de las columnas diferente para cada pila mencionada en este apartado, de acuerdo con la rasante de proyecto, del lecho superior de la zapata al lecho inferior del cabezal dependiendo del cadenamiento del proyecto como se muestra en la figura 3.6.

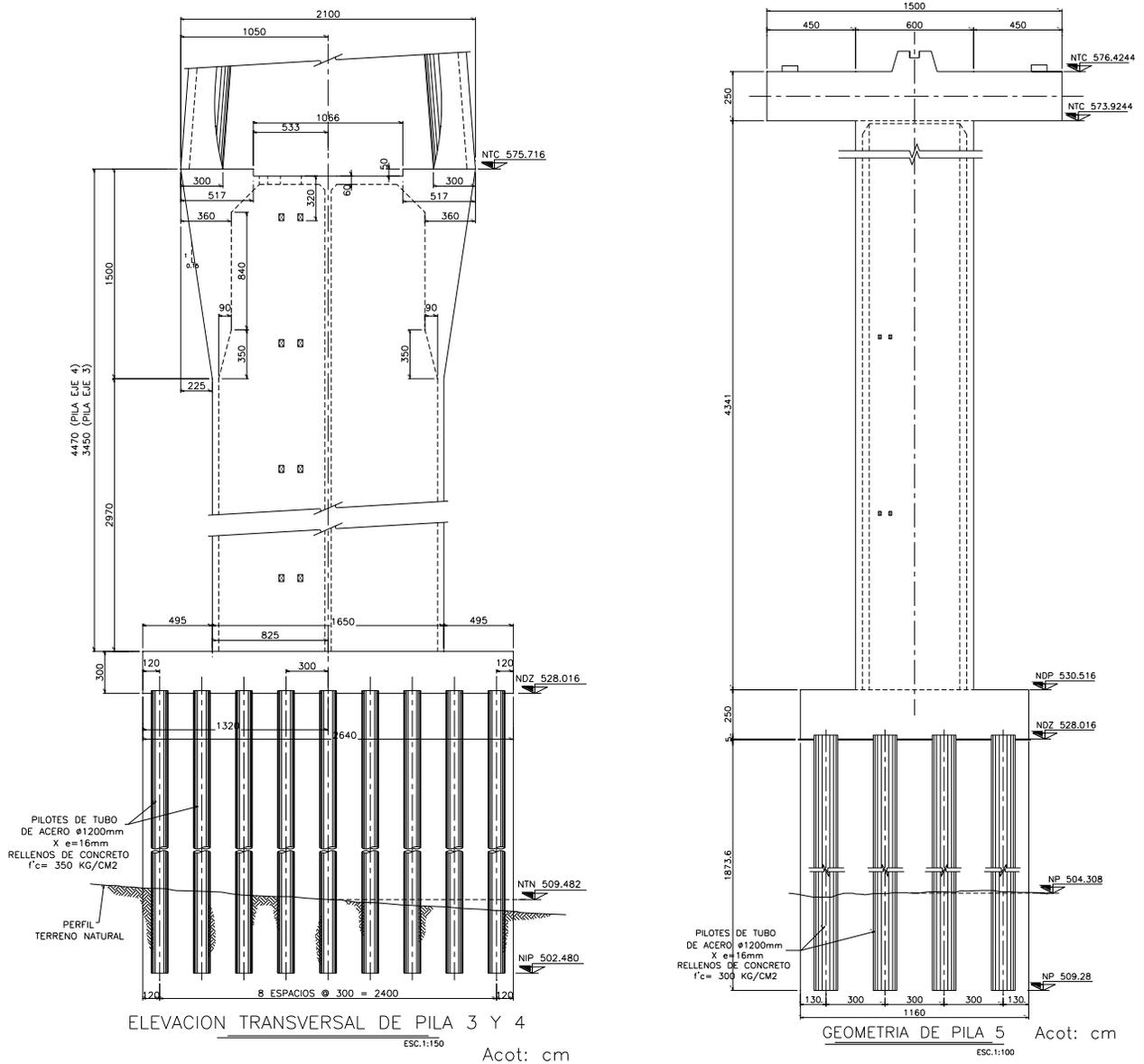
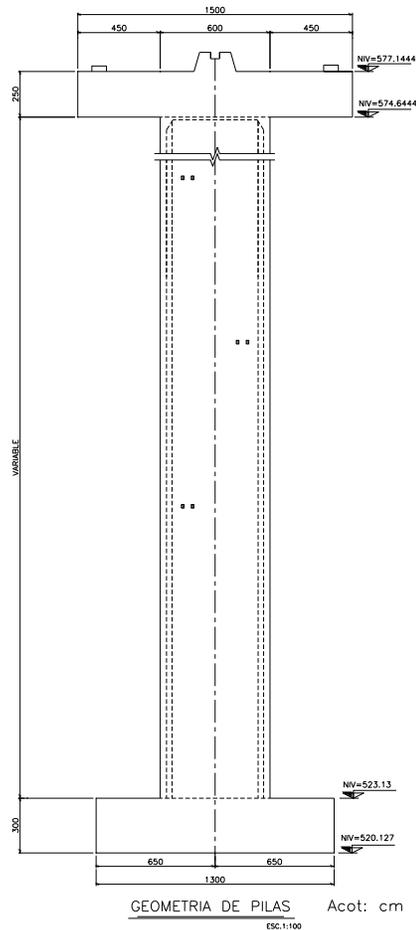


Figura 3.5. Pilas eje 3, 4 y 5



**Figura 3.6. Pilas eje 2, 6 y 7**

#### 3.3.1.4. Pilones

Los pilones se localizan en los ejes 3 y 4, y se conforman por 6 elementos: base, cabezal, brazos, traveses transversales, mástil, y sistema de atirantado (figura 3.7.)

La base de cada pilón está formada por un doble cajón constante hasta una altura de 19.5 m en la pila 3 y 29.7 m en la pila 4. A partir de esta altura la sección es variable en el sentido longitudinal, siendo constante la dirección transversal hasta alcanzar una altura de 34.5 m en la pila 3 y 44.7 m en la pila 4 y conformar la parte del cabezal.

Los brazos inician en la zona superior del cabezal con una sección irregular hueca de sección variable en el sentido longitudinal hasta llegar a una altura de 64.5 m en la pila 3 y 74.7 m en la pila 4 (la inclinación es de  $85.6^\circ$ , a partir de una horizontal en la base, a la cara externa del brazo).

Las traveses transversales se colocan en el empalme de los brazos del pilón y el mástil, y la otra se coloca a una altura de 20 m medida esta desde el centro de la primera trabe; la función de estas traveses es dar rigidez a los mástiles de cada uno de los pilones.

El mástil se compone de una sección irregular hueca constante alcanzando una altura de 40 m medidos de la parte superior de los brazos. Cada punto de control está a cada 1 m, contabilizándose 13 espacios. La altura máxima que alcanza cada pilón es de 104.5 m en la pila del eje 3 y 114.7 m en la pila del eje 4.

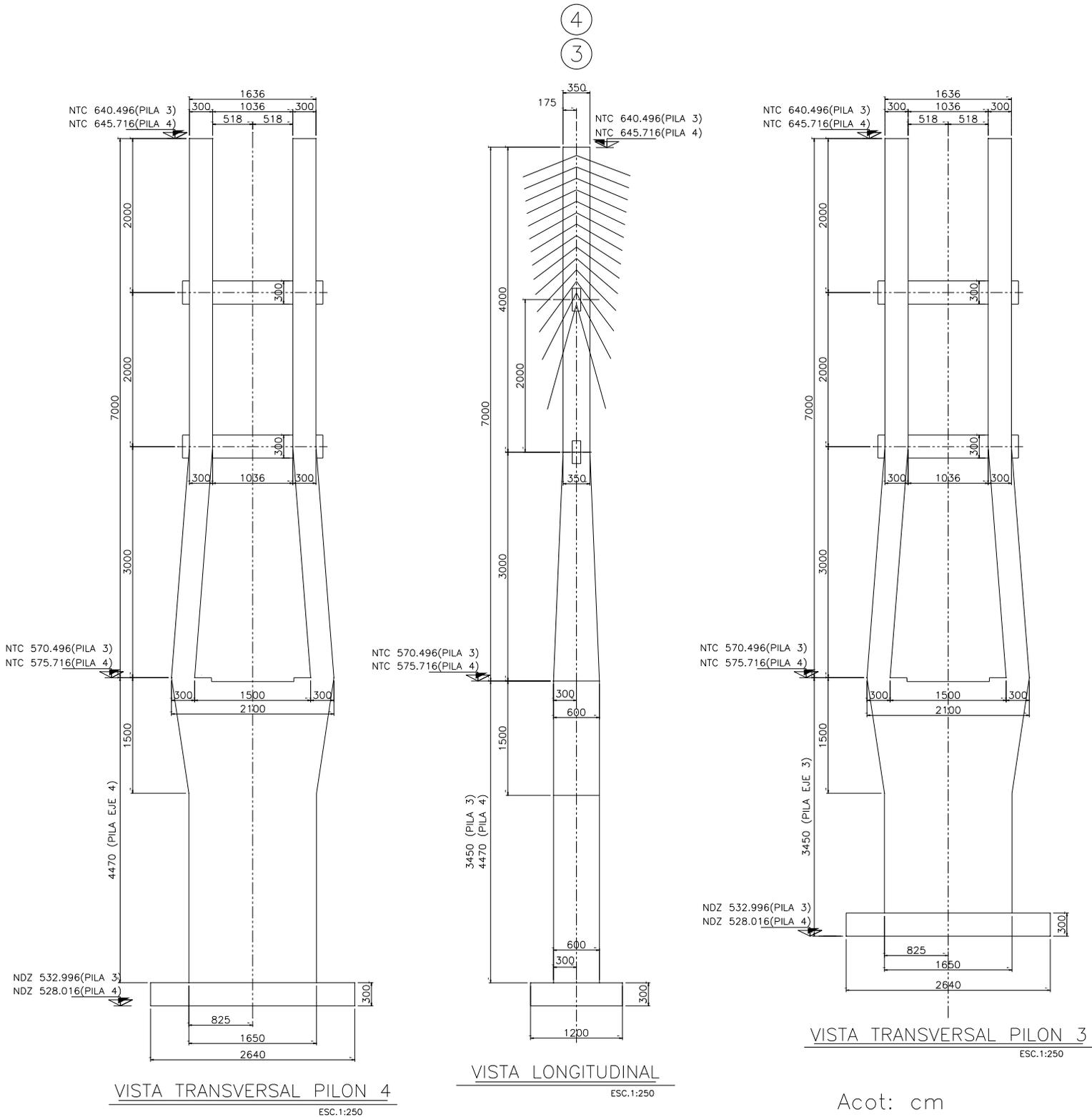


Figura 3.7. Vista general en alzado de los pilones 3 y 4

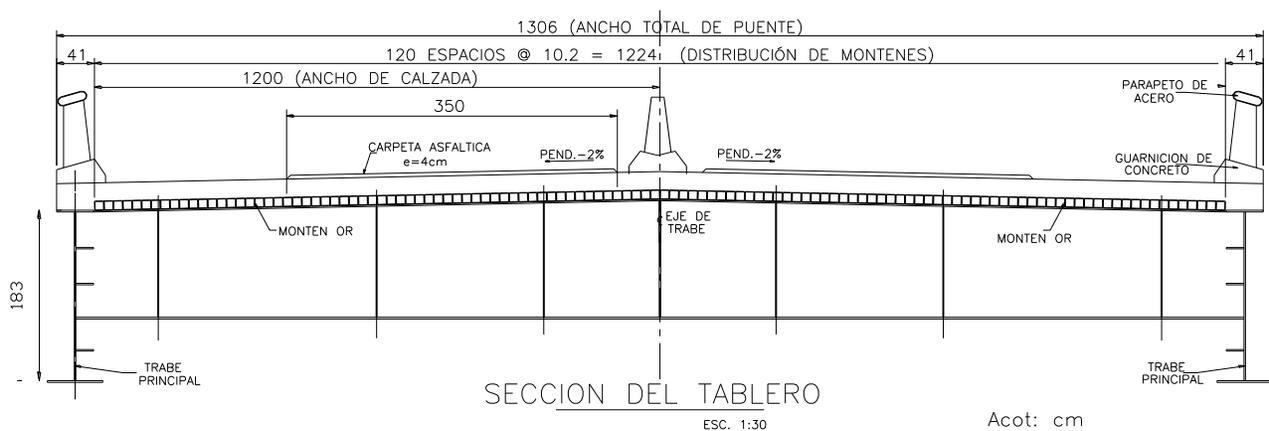
### 3.3.2. Superestructura

#### 3.3.2.1. Dovelas

La superestructura se compone de 53 dovelas de acero estructural ASTM A-709 GRADO 50; 48 dovelas tipo de 12 m, 2 dovelas de pila (DP) de 12 m, 1 dovela de estribo eje 1a de 2 m, 1 dovela de caballete eje 8 de 6 m, y una dovela de cierre (DC) de 2 m de longitud.

Cada dovela está formada por dos vigas principales de acero (trabes maestras) de sección “I”, con piezas puente a cada 4 m de separación; las cuales están compuestas por segmentos de 2 m, 4 m, 4 m, 2 m y una losa a compresión de concreto armado de 20 cm de espesor. En la parte inferior de la losa de concreto lleva distribuidos montenes OR (PTR) en toda la longitud del ancho del tablero de 102x102x4.8, para conformar lo que será la losa de rodamiento y alcanzar un espesor de losa de 30 cm.

El ancho total del puente es de 13.06 m y un ancho de calzada de 12 m, con carpeta asfáltica de 4 cm de espesor. La calzada estará dividida por un deflector central y a cada lado del mismo, el ancho de la losa de rodamiento es de 3.5 m, con acotamiento de 2 m y parapeto de 0.53 m, en cada sentido de la circulación. La sección de calzada presenta una pendiente transversal de 2% a ambos lados del deflector central como se muestra en la figura 3.8.



**Figura 3.8. Arreglo de dovelas de acero**

#### 3.3.2.2. Trabes maestras

Las dovelas de acero se conforman por dos piezas principales llamadas trabes maestras de sección “I” las cuales son unidas por medio de piezas puente. Estas trabes tienen un peralte de 1.919 m con patines y alma de espesor variable; cada trabe maestra cuenta con sus respectivos atiesadores longitudinales y transversales, así como en su patín inferior sus determinados cartabones. En la figura 3.9 se muestra la geometría de las trabes maestras que participan en el tramo empujado del puente.



### 3.3.2.4. Nariz de lanzamiento

La nariz de lanzamiento es de sección variable, por lo que su peralte es de 1.219 m en la punta y 1.919 m en la parte posterior donde se conecta con la primera dovela. Se utilizan 3 perfiles transversales de sección "I" de 0.4028 m de peralte, con separación de 1.5 m, 4.5 m, 4.5 m, 1.5 m. Cuenta con sus respectivos contraventeos que son de sección circular de diámetro de 0.168 m y espesor de pared de 0.0071 m colocados en forma de "V". La longitud total de la nariz es de 12 m. (Figura 3.11, 3.12 y 3.13).

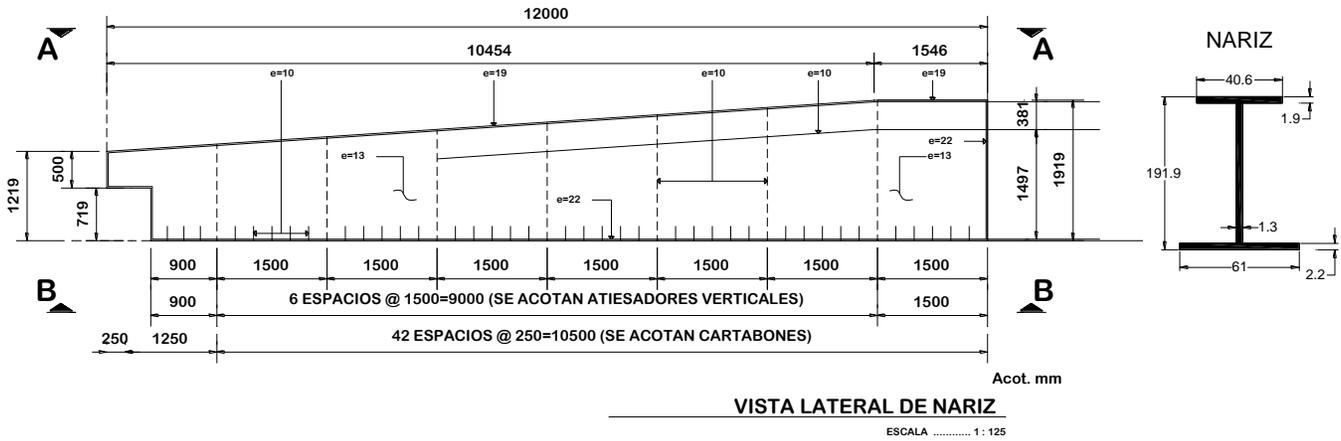


Figura 3.11. Nariz de lanzamiento, vista lateral y frontal

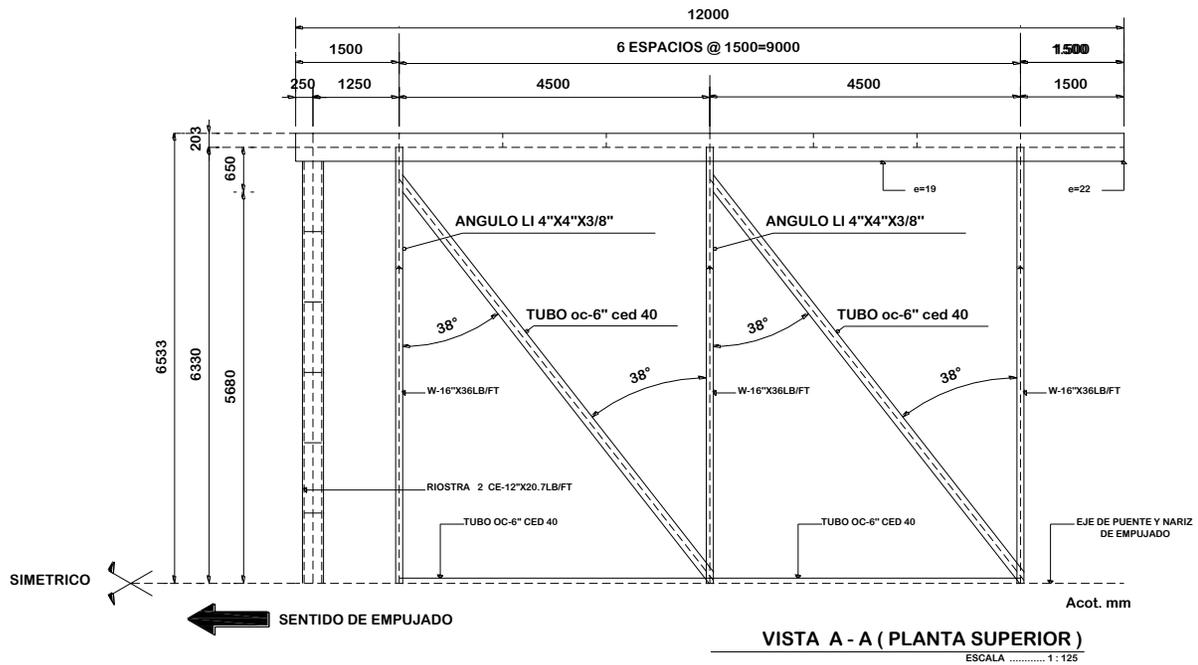


Figura 3.12. Nariz de lanzamiento, vista planta superior

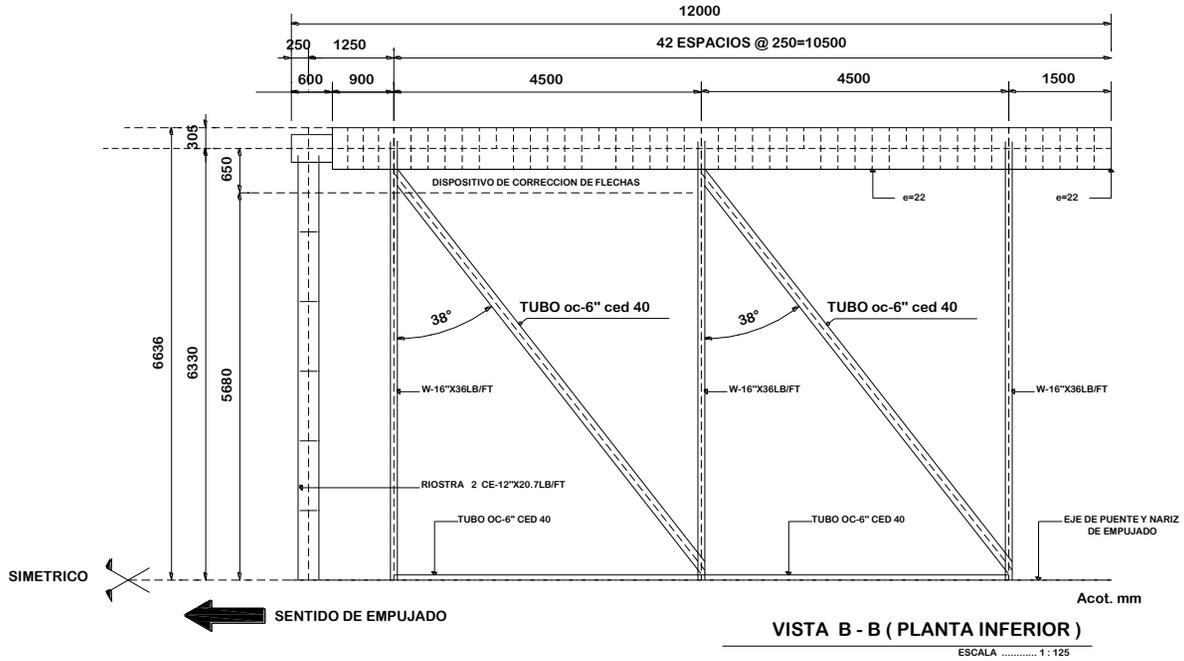


Figura 3.13. Nariz de lanzamiento, vista planta inferior

### 3.3.3. Sistema de atirantado

El sistema de atirantado es de tipo arpa en 2 planos verticales de 14 tirantes, por lo que hacen un total de 56 tirantes (figura 3.14.)

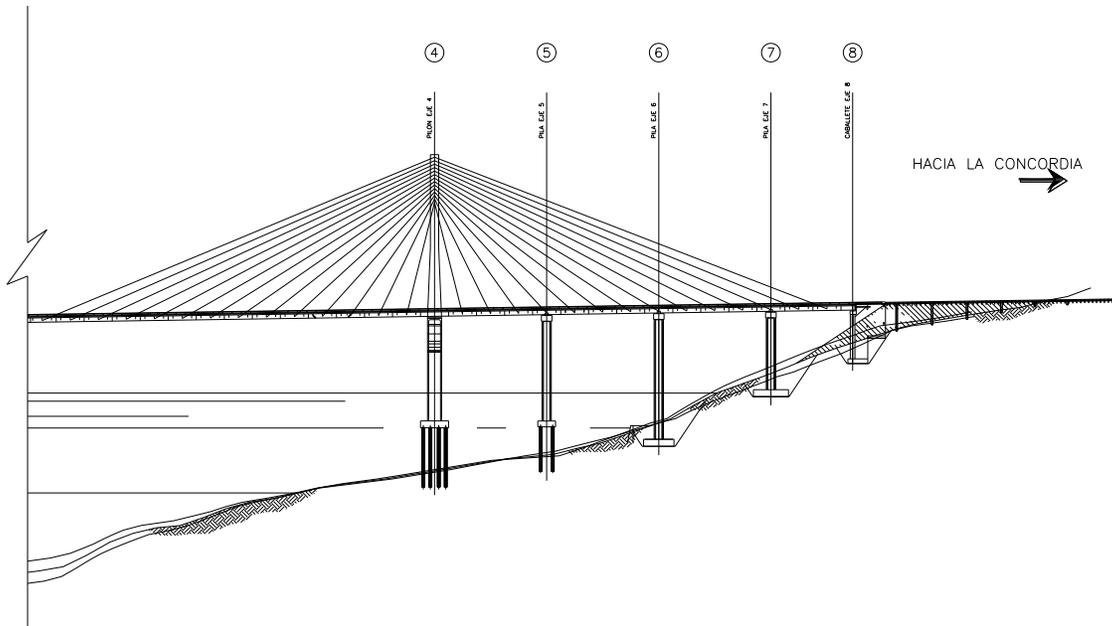


Figura 3.14. Tirantes

### 3.4. MATERIALES

#### 3.4.1. Concreto

Tabla 3.1. Concreto

| Concreto                   | f'c (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|---------------------------|
| Pilones                    | 350                       |
| Travesaños                 | 350                       |
| Cuerpo de pilas            | 350                       |
| Zapatas de distribución    | 250                       |
| Pilas de cimentación       | 300                       |
| Losa de la superestructura | 250                       |
| Guarniciones               | 250                       |
| Plantillas de estribos     | 100                       |

Tabla 3.2. Pesos volumétricos

| Peso volumétrico                          | Ton/m <sup>3</sup> |
|---|--------------------|
| Concreto reforzado para losa de tablero   | 2.5                |
| Concreto reforzado para otras estructuras | 2.5                |
| Concreto sin refuerzo                     | 2.4                |

De acuerdo con la norma AASHTO LRFD 2012 en el apartado 5.4.2.4, el módulo de elasticidad  $E_c$  para concretos con densidades entre 1440 y 2500 kg/m<sup>3</sup>, y esfuerzo a la compresión hasta 1054 kg/cm<sup>2</sup> puede calcularse con la siguiente expresión:

$$E_c = 33000 K_1 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c}$$

donde:

$K_1$  es el factor de corrección para la fuente de agregado tomado como 1.0.

$w_c$  es la densidad unitaria del concreto (kg/m<sup>3</sup>)

$f'_c$  es la resistencia a la compresión especificada del concreto (Mpa)

El módulo de Poisson se toma como:

$$v = 0.2 \text{ (estado límite de servicio)}$$

$$v = 0.0 \text{ (estado límite último – plasticidad)}$$

#### 3.4.2. Asfalto

El peso volumétrico del asfalto es de 2.4 ton/m<sup>3</sup> con un espesor de 4 cm.

### 3.4.3. Acero de refuerzo

Para el acero de refuerzo, se considera un esfuerzo de fluencia  $f_y = 4200 \text{ kg/m}^2$  y un peso volumétrico de  $7.85 \text{ ton/m}^3$ .

### 3.4.4. Recubrimientos

- Refuerzo vertical de las pilas: 6 cm
- Refuerzo principal de estribos y zapatas expuestos a tierra: 7.5 cm
- Refuerzo principal de estribos y zapatas no expuestos a tierra: 5 cm
- Refuerzo principal de cabezal de pilas: 7.5 cm
- Refuerzo del lecho inferior de la losa del tablero: 3.5 cm
- Refuerzo del lecho superior de la losa del tablero: 2.5 cm
- Refuerzo de las guarniciones: 3.5 cm

### 3.4.5. Acero en tirantes

El acero de presfuerzo a utilizar en los tirantes del puente, tienen las siguientes características:

- Esfuerzo a la ruptura de  $18850 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad:  $E_p = 20400000 \text{ ton/m}^2$
- Tensión de ruptura del cable garantizada:  $f_{prg} = 1850 \text{ Mpa} = 188500 \text{ ton/m}^2$
- Tensión de fluencia del cable:  $f_y^* = 0.9 f_{prg} = 1665 \text{ Mpa} = 169700 \text{ ton/m}^2$
- Los ductos serán de polietileno alta densidad (PEHD) para los tirantes
- Relajación: acero de muy baja relajación ( $\_1000 = 2.5\%$ ). La relajación a 1000 horas es 2.5% para una tensión final de 70%.

### 3.4.5. Acero estructural

- Peso volumétrico =  $7.85 \text{ ton/m}^3$
- Módulo de elasticidad:  $E_s = 21000000 \text{ ton/m}^2$
- Módulo de Poisson:  $\nu = 0.3$

El acero estructural para el tablero es A-50 ( $f_y = 3515 \text{ kg/cm}^2$ )

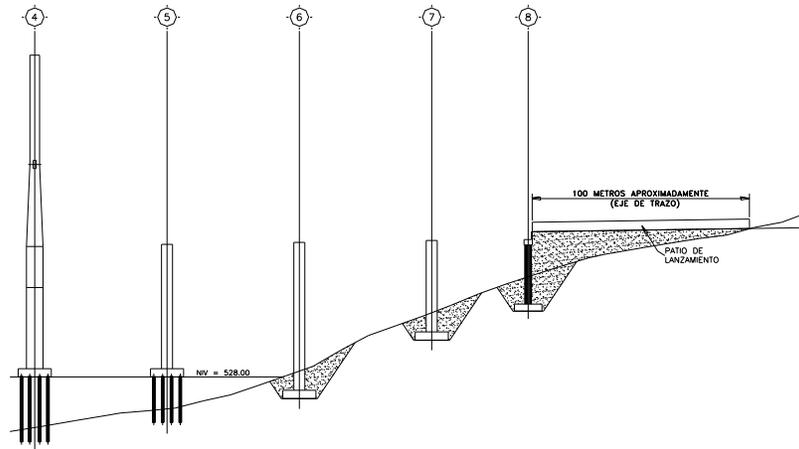
Para los tubos y pilastras de los parapetos, se utilizara un acero estructural ASTM 709 A-36 con el esfuerzo de fluencia igual a:  $f_y = 2530 \text{ ton/m}^2$  (o 248 Mpa)

## 3.5. MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN

Este proceso inicia del caballete del eje 8 hasta el pilón del eje 4 (de izquierda a derecha), esta parte comprende el tramo empujado, para después continuar con el lanzado en voladizo. El otro extremo del puente se empieza a construir simultáneamente con ayuda de grúas.

Etapa 1: (Figura 3.15.)

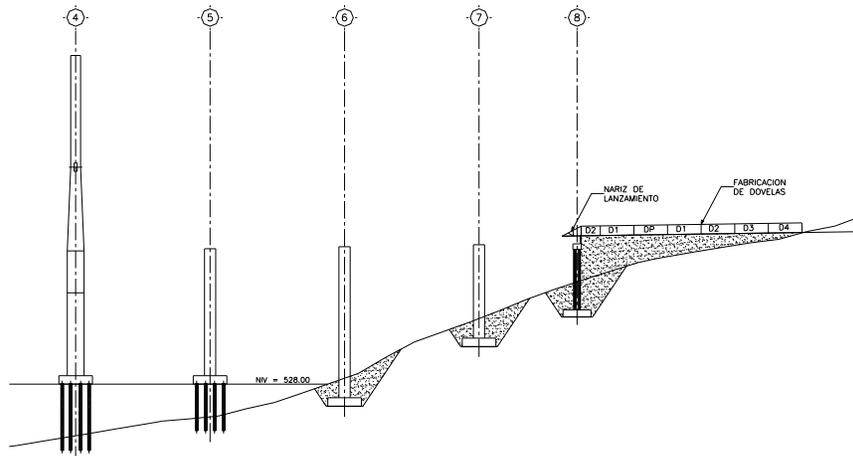
1. Se construye el patio de fabricación de aproximadamente 100 m de longitud. En este patio se fabrican las dovelas y la nariz de lanzamiento la que se utilizará en el método constructivo de empuje.



**Figura 3.15. Patio de fabricación en etapa 1**

Etapa 2: (Figura 3.16.)

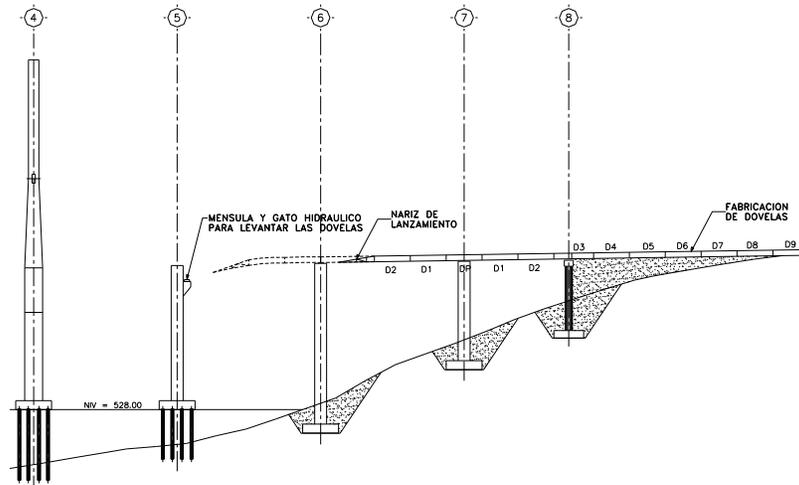
1. Se ensambla la nariz de lanzamiento para el empuje de las dovelas.
2. Se ensamblan y sueldan las primeras dovelas en el patio de lanzamiento para iniciar el empuje de estas.



**Figura 3.16. Avance de construcción en etapa 2**

Etapa 3: (Figura 3.17.)

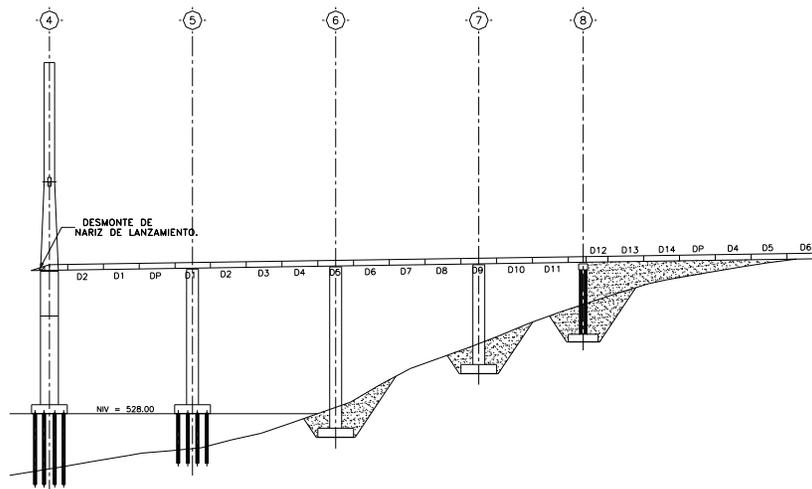
1. Se comienza el empuje de dovelas.
2. Este procedimiento consiste en empujar las dovelas pasando por los ejes de pila 7 hasta llegar al pilón 4 que es donde termina este procedimiento constructivo.
3. Si al momento de lanzar el puente la nariz presenta una flecha muy grande, con la ayuda de un gato hidráulico se levantará hasta llegar a la posición deseada.



**Figura 3.17. Inicio de empuje de dovelas en etapa 3**

Etapa 4: (Figura 3.18.)

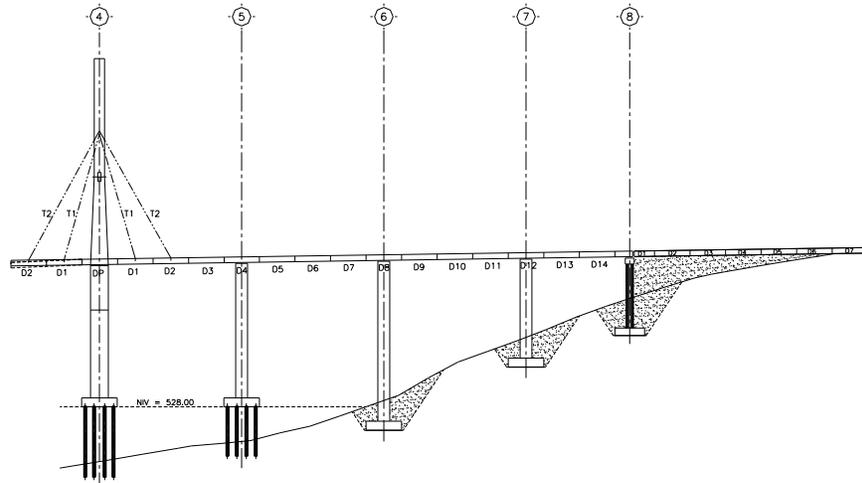
1. Se desmonta la nariz de lanzamiento hasta que la primera dovela esté apoyada en el eje del pilón 4.
2. Se procede al empuje de dos dovelas más, sin la nariz de lanzamiento.
3. Al final del empuje tendremos las dovelas D1 y D2 del claro central del puente y las dovelas DP, D1 a la D15 del tramo que va orientado hacia la Concordia.



**Figura 3.18. Estado de avance en etapa 4**

Etapa 5: (Figura 3.19.)

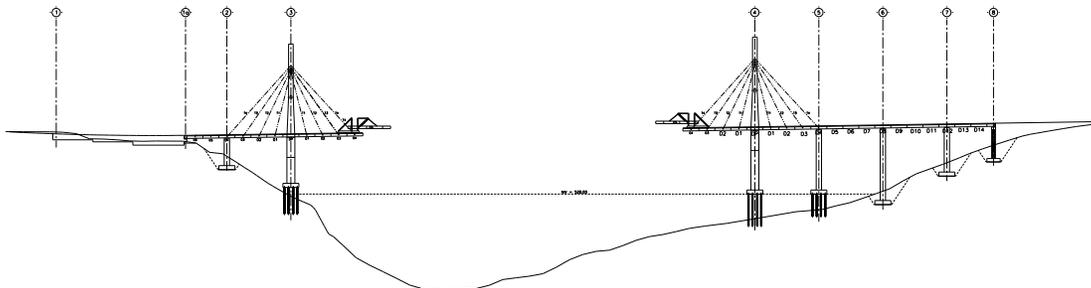
1. En esta etapa comienza el procedimiento constructivo en voladizo, ya que se colocan los primeros tirantes T1 y T2 que van orientados hacia Rizo de Oro y los tirantes T1 y T2 que van orientados hacia la Concordia en el eje 4 con una tensión inicial.



**Figura 3.19. Cierre de empuje de dovelas en etapa 5**

Etapa 6: (Figura 3.20.)

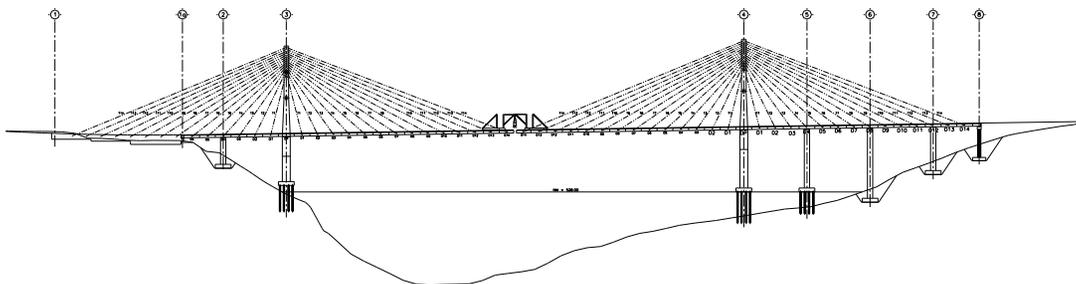
1. El montaje de las dovelas del claro central se harán por medio de un sistema grúa (derrick). Este consiste en levantar las dovelas para llevarlas a su posición final y sucesivamente colocar su tirante con su respectiva tensión inicial.



**Figura 3.20. Estado de avance en doble voladizo en etapa 6**

Etapa 7: (Figura 3.21.)

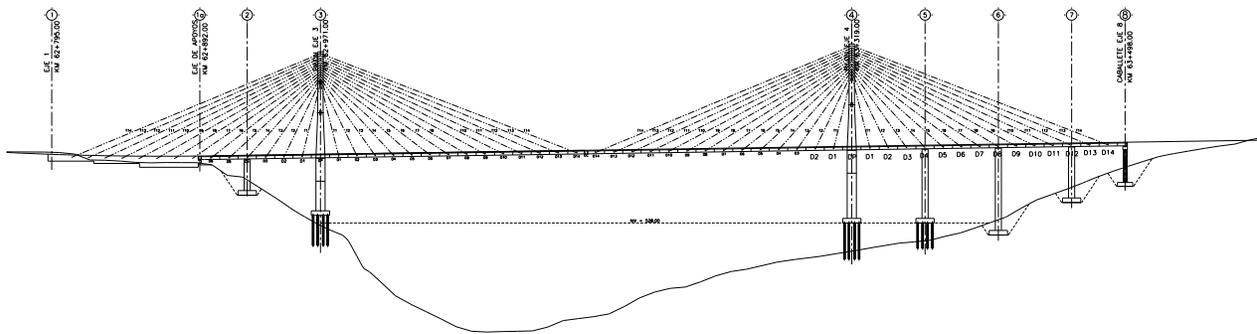
1. En esta etapa se monta la dovela de cierre, la cual debe empatar perfectamente con los dos voladizos que se han ido construyendo para concluir el lanzado de dovelas.
2. Al cerrar el puente se procede a la colocación de los apoyos definitivos.



**Figura 3.21. Ejecución del cierre del puente en etapa 7**

Etapa 8: (Figura 3.22.)

1. Esta es la etapa final después del cierre de las dovelas, en la que se procede a armar y cimbrar guarniciones
2. Se dejan preparaciones para colocar posteriormente postes y defensa de lámina de acero galvanizado
3. Se cuelan las guarniciones
4. Se colocan las juntas
5. Se procede a colocar la carpeta asfáltica
6. Después se colocan los señalamientos correspondientes
7. Se pintan los parapetos metálicos y remates
8. Se procede a la limpieza de todo el puente
9. Se abre el acceso a tráfico vehicular

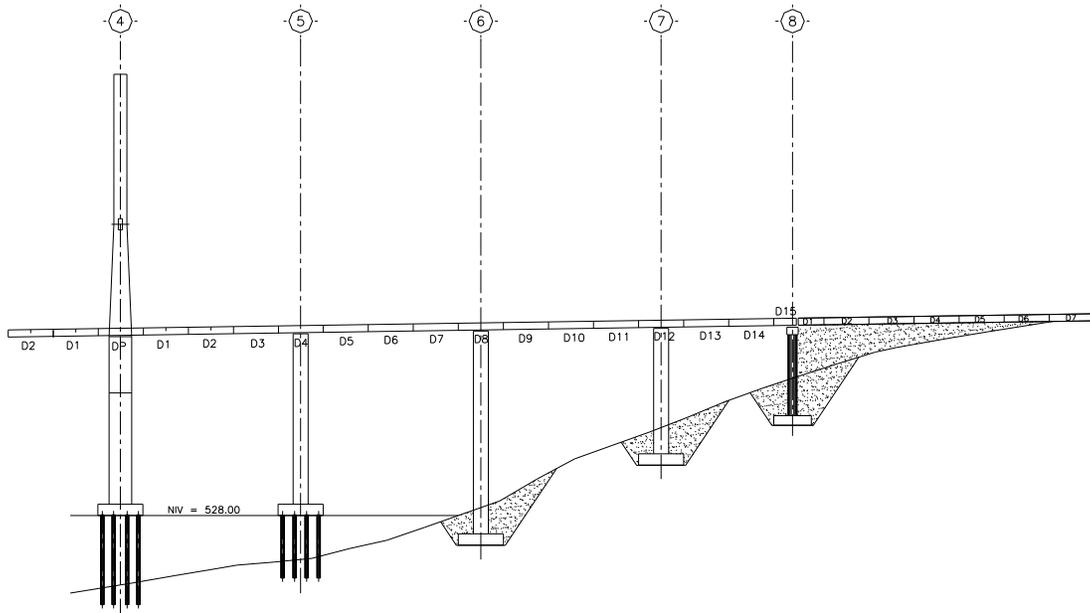


**Figura 3.22. Fin de la construcción del Puesto La Concordia en etapa 8**

### 3.5.1. Procedimiento constructivo, empuje de dovelas

El empuje de dovelas se realiza solo en un extremo del puente, que es la parte que va hacia la Concordia, está constituido por 4 claros, formado por 18 dovelas de acero. El tramo empujado lo conforma un caballete en el eje 8 de donde comienza el empuje, 3 pilas secundarias que corresponden al eje 7, eje 6, eje 5 y el pilón principal de donde se anclan los tirantes para empezar el voladizo el cual es en el pilón del eje 4. (Figura 3.23)

El primer claro a empujar lo conforman la NARIZ, D2 y D1, mientras que las demás dovelas a empujar se quedan en el patio de fabricación, y se van ensamblando conforme el empuje va avanzando. El segundo claro a empujar lo conforman la NARIZ, D2, D1 y DP, mientras que en el primer claro quedan apoyadas las dovelas D1, D2 y D3. El tercer claro a empujar lo conforman la NARIZ, D2, D1 y DP, mientras que el segundo claro quedan apoyadas las dovelas D1, D2, D3 y D4, en el primer claro quedan apoyadas las dovelas D5, D6 y D7. El cuarto claro a empujar lo conforman la NARIZ, D2, D1 y DP, mientras que el tercer claro quedan apoyadas las dovelas D1, D2, D3 y D4, en el segundo claro quedan apoyadas las dovelas D5, D6, D7 y D8, en el primer claro quedan apoyadas las dovelas D9, D10 y D11. El ultimo tramo a empujar donde se comenzará con el método constructivo en voladizo, se quita la nariz de lanzamiento para empujar dos dovelas mas y terminar con este tramo, en el volado queda la dovela D2, D1 y DP, mientras que en el cuarto claro quedan apoyadas las dovelas D1, D2, D3 y D4, en el tercer claro quedan apoyadas las dovelas D5, D6, D7 y D8, en el segundo claro quedan apoyadas las dovelas D9, D10, D11 y D12, en el primer claro quedan apoyadas las dovelas D13, D14 y D15.



**Figura 3.23. Tramo empujado del puente y ubicación de dovelas**

La nariz de lanzamiento sirve para mitigar las deflexiones verticales que se pudieran llegar a presentar al momento del empuje; en cada una de las pilas donde se apoyarán las dovelas se coloca momentáneamente una ménsula y un gato hidráulico, esto para recuperar la flecha que se presenta en las dovelas antes de llegar a su punto de apoyo, entonces ahí descansa la nariz y esta es levantada por el gato hidráulico (fuerza de gateo) para llevarla a su posición deseada y reducir esa flecha. Así se van empujando todos los elementos estructurales hasta llegar a la pila del eje 4 que es la parte final del empuje. Una vez alcanzado la pila antes ya mencionada se procede a desmontar la nariz y empujar dos dovelas más, las cuales al estar en su posición definitiva se emplea ya el uso de tirantes para soportar estos elementos y se aplica una tensión inicial; de aquí en adelante el claro central se cerrará con la ayuda del “derrick” con el método en voladizo.

## CAPÍTULO 4

### MODELO MATEMÁTICO

#### 4.1. MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (MEF)

En los últimos años el uso de programas de cómputo en los procesos de análisis y diseño en ingeniería se ha extendido ampliamente. Particularmente en ingeniería estructural, los programas de análisis cubren un campo de aplicaciones que van desde las estructuras a base de marcos rígidos, muros de cortante, hasta la inclusión de disipadores de energía o de aisladores sísmicos en la base. Debido al desarrollo de aplicaciones con elementos finitos es posible modelar el suelo circundante a la cimentación en conjunto con la estructura de la cimentación.

El método del elemento finito es una herramienta de mucha utilidad en este tipo de temas. Permite el cálculo de una variable primaria, la cual, una vez conocida permiten determinar otras variables que se quieran conocer. En la tabla 4.1 se presentan algunos ejemplos de estas variables primarias y secundarias.

**Tabla 4.1. Variables calculadas a partir del método de elemento finito**

| FENÓMENO                        | VARIABLE PRIMARIA                          | VARIABLE SECUNDARIA                        |
|---------------------------------|--|--|
| Deformación axial de una barra  | Variación longitudinal de la barra ( $U$ ) | Esfuerzo en la barra ( $\sigma$ )          |
| Transferencia de calor          | Temperatura en el cuerpo ( $T$ )           | Flujo de calor a través del cuerpo ( $q$ ) |
| Flujo de agua en medios porosos | Potencial hidráulico ( $\phi$ )            | Velocidad del agua ( $v$ )                 |
| Flexión en vigas                | Flecha ( $\omega$ ) y giro ( $\theta$ )    | Momento ( $M$ ) y cortante ( $V$ )         |

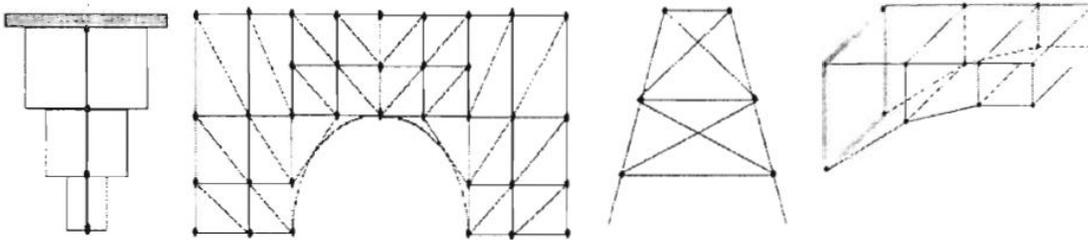
##### 4.1.1. Conceptos fundamentales

El método de elemento finito (MEF en español o FEM en inglés) se basa en la discretización del continuo por medio de líneas, superficies o volúmenes, con el fin de obtener un número finito de elementos, los cuales están conectados por una serie de puntos llamados nodos colocados en los vértices. Estos nodos son importantes ya que por medio de ellos se transfiere la información de un elemento a otro. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla. En la figura 4.1 se presentan algunos ejemplos de esta teoría.

De cada elemento se pueden conocer las propiedades geométricas del material, mientras que de los nodos se pueden determinar el valor de los grados de libertad (gdl) (desplazamientos, rotaciones, etc.), así como las acciones ejercidas en cada uno (fuerzas externas, fuentes de energía, etc.). Los grados de libertad son variables que determinan el estado del nodo, además de ser el lugar donde se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

Por ejemplo un nodo unidimensional tiene un grado de libertad (desplazamiento en dirección “X”), en uno bidimensional tendrá dos grados de libertad (desplazamiento en dirección “X” y desplazamiento en dirección “Y”) y en uno tridimensional, tres grados de libertad (desplazamiento en dirección de cada eje coordenado).

Conociendo los grados de libertad de cada barra se puede obtener la matriz de rigidez local, que es la que contiene las propiedades constitutivas del material y las propiedades geométricas del elemento finito seleccionado. Esta matriz local puede ser de orden  $n \times n$  (cuadrada) ó simétrica. Por consiguiente, teniendo ya una estructura modelada completamente esa matriz local pasa a un ensamble de la matriz global de rigidez que es la representación matemática total del problema, es decir, en ella se unen todas y cada una de las matrices locales y por lo tanto cada uno de los elementos de la malla.



**Figura 4.1. Discretización de cuerpos en elementos finitos**

#### 4.1.2. Teoría de rigidez

Una forma de poder calcular el orden de la matriz global, es multiplicando la cantidad de nodos por el número de grados de libertad de cada uno de ellos. De la teoría de rigidez, el problema se plantea de la siguiente forma matricial

$$[ F ] = [ K ] * [ U ]$$

donde:

[F] es el vector de acciones ejercidas en cada nodo (cargas externas)

[K] representa la matriz global de rigidez

[U] es el vector de variables dependientes primarias de desplazamientos

Conocidas las acciones (fuerzas o desplazamientos) que se ejercen en cada nodo, es posible despejar el vector de variables dependientes primarias y determinar por lo tanto las incógnitas planteadas al principio del problema.

#### 4.1.3. Elemento tipo barra (frame)

El elemento barra se usa en general en 3D, como viga-columna, que incluye efectos de torsión, deformación axial y biaxial.

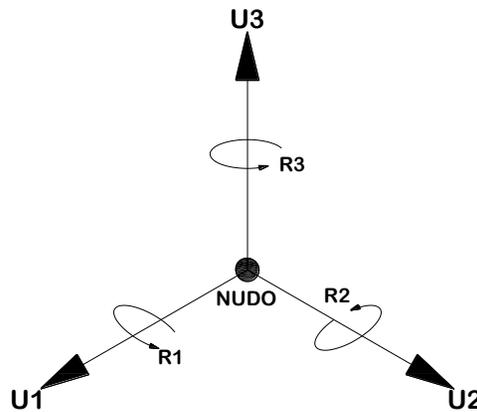
El elemento tipo barra se emplea para modelar elementos tipo viga, columna, armaduras y contraventeos en estructuras planas y tridimensionales.

El elemento a utilizar en este trabajo fue el antes mencionado, el cual se utilizó como una línea recta conectada por dos puntos ( $i$  y  $j$ ), los cuales no pueden ocupar la misma posición en el elemento. Cada elemento barra tiene su propio sistema coordenado local, el cual define los grados de libertad, vínculos, propiedades, cargas en el nodo y ejes para interpretar resultados; estos ejes se identifican como 1, 2 y 3, por defecto son idénticos al sistema global X, Y y Z, respectivamente. El eje 1 está dirigido a lo largo de la longitud del elemento, los otros dos forman un plano perpendicular al elemento con una orientación que se le especifique.

El modelo estructural es gobernado por los desplazamientos de los nodos. Cada nodo del modelo estructural puede tener seis componentes de desplazamiento:

- El nodo se puede trasladar a lo largo de sus tres ejes locales. Estas traslaciones se denotan por  $U_1$ ,  $U_2$  y  $U_3$ .
- El nodo puede rotar sobre sus tres ejes locales  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ .

Se ilustran los grados de libertad por nodo en la figura 4.2.



**Figura 4.2. Los seis desplazamientos y grados de libertad del sistema coordenado local de un nodo de una barra del modelo**

Otro aspecto a considerar son las condiciones de frontera, tales como:

- Restricciones de desplazamientos (según el tipo de apoyo)
- Fuerzas aplicadas en nodos
- Cargas volumétricas o de inercia (gravedad)

Las propiedades del material a utilizar en el elemento tipo barra son:

- El módulo de elasticidad, para la rigidez axial y la rigidez a flexión
- El módulo a cortante, para la rigidez de la torsión y la rigidez a cortante transversal y el módulo de Poisson.
- La densidad de masa (por unidad de volumen)
- La densidad de peso (por unidad de volumen)

Al igual se generan propiedades geométricas básicas que junto con las propiedades del material generan rigidez en la sección:

- El área de la sección transversal
- El momento de inercia
- La constante torsional
- Las áreas de cortante

Las fuerzas internas de un elemento barra son las fuerzas y momentos del elemento. Estas fuerzas internas son:

- P, la fuerza axial
- V22, la fuerza cortante en el 1-2 plano
- V33, la fuerza cortante en el 1-3 plano
- T, la torsión axial
- M22, el momento de flexión en el 1-3 plano (sobre el eje 2)
- M33, el momento de flexión en el 1-2 plano (sobre el eje 3)

Estas fuerzas y momentos internos están presentes en cada sección transversal a lo largo de la longitud del elemento

## 4.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La parte empujada del puente se modeló usando el Método de Elemento Finito con ayuda del software SAP2000. En total se elaboraron 74 modelos, cada uno representa una de las etapas de empujado. Todos los elementos que conforman la superestructura se modelaron con elemento tipo barra explicado en la sección anterior (4.1.3.).

Las condiciones consideradas en el modelo matemático son introducir las dimensiones exactas de cada elemento de acuerdo con los planos del proyecto, para que el programa genere las propiedades geométricas adecuadas para realizar el análisis (Figura 4.4), tales como las áreas transversales de las secciones a utilizar, sus respectivos momentos de inercias y sus constantes de torsión.

| Section Name: TMDP             |           |                                 |           |
|--------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
| Properties                     |           |                                 |           |
| Cross-section (axial) area     | 877.5514  | Section modulus about 3 axis    | 50321.81  |
| Torsional constant             | 4712.4904 | Section modulus about 2 axis    | 4133.8314 |
| Moment of Inertia about 3 axis | 5388141.  | Plastic modulus about 3 axis    | 67021.92  |
| Moment of Inertia about 2 axis | 126738.95 | Plastic modulus about 2 axis    | 8115.1233 |
| Shear area in 2 direction      | 367.3025  | Radius of Gyration about 3 axis | 78.358    |
| Shear area in 3 direction      | 513.0708  | Radius of Gyration about 2 axis | 12.0176   |

**Figura 4.4. Propiedades que requiere el programa de análisis**

En el modelo no se considera la losa debido a que en el proyecto constructivo el empuje se realiza sin losa de rodamiento. Tampoco se consideran los efectos aerodinámicos producidos por el viento, los asociados a sismo y los debidos a la temperatura. Se trabajó solo con cargas gravitacionales para la revisión de las flechas verticales producidas por peso propio.

Por lo tanto los elementos modelados fueron los siguientes:

- Traves maestras
- Piezas puente
- Armadura central
- Contraventeo inferior
- Nariz de lanzamiento

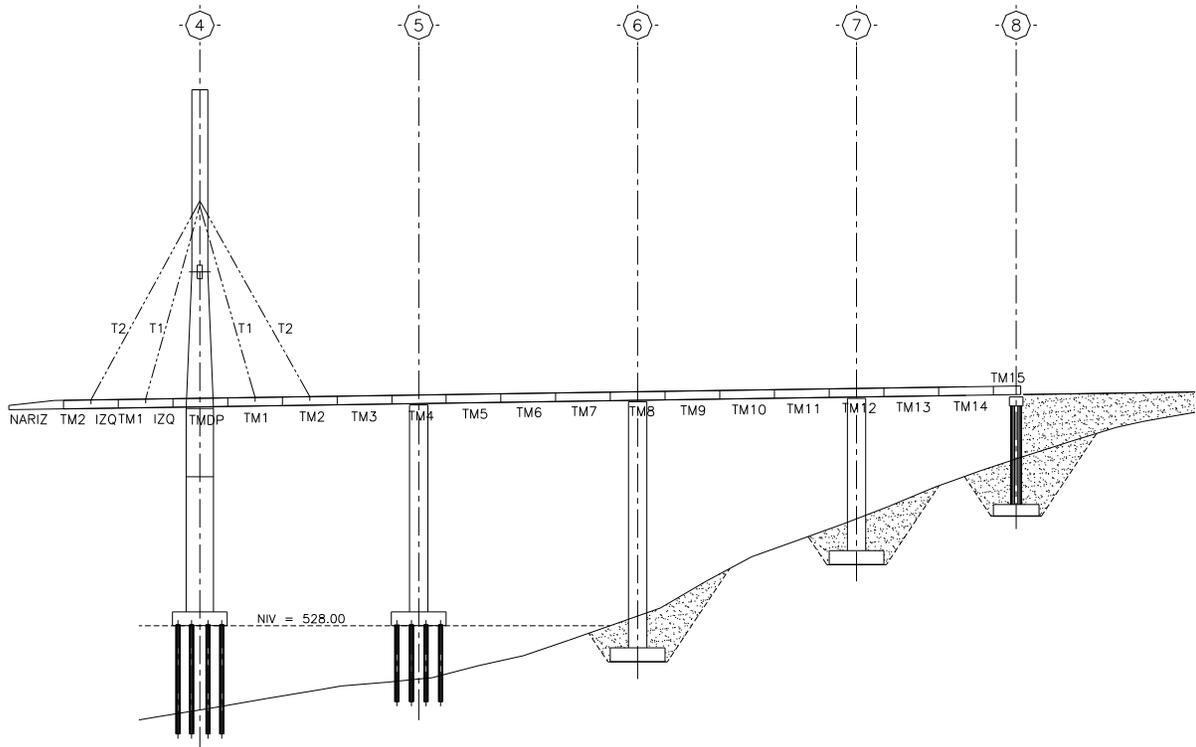
Los elementos mencionados fueron cargados por su peso propio, cargas concentradas y cargas distribuidas. Para las traves maestras, pieza puentes y nariz de lanzamiento se consideran seis grados de libertad por nudo (desplazamientos y rotaciones en 3 direcciones) para generar momentos y cortantes en las direcciones M33 y V22 mientras que la armadura central y el contraventeo inferior se consideró solo ante carga axial.

Las dovelas varían en cuanto a su espesor de patin (en traves maestras) por lo que en el programa de análisis se definieron 6 diferentes secciones de traves maestras con su respectiva geometría y propiedades geométricas.

Estas traves maestras modeladas en el programa se clasifican de la siguiente manera, de izquierda a derecha de donde comienza el empujado del puente: (Tabla 4.2, Figura 4.5).

**Tabla 4.2. Clasificación de las dovelas modeladas**

| <b>Modelo</b>  | <b>Clasificación de dovelas</b> | <b>Proyecto</b> |
|----------------|---------------------------------|-----------------|
| <b>NARIZ</b>   | Nariz de lanzamiento            | <b>NARIZ</b>    |
| <b>TM2 IZQ</b> | Trabe maestra 2 lado izquierdo  | <b>D2 IZQ</b>   |
| <b>TM1 IZQ</b> | Trabe maestra 1 lado izquierdo  | <b>D1 IZQ</b>   |
| <b>TMDP</b>    | Trabe maestra dovela de pila    | <b>DP</b>       |
| <b>TM1</b>     | Trabe maestra 1                 | <b>D1</b>       |
| <b>TM2</b>     | Trabe maestra 2                 | <b>D2</b>       |
| <b>TM3</b>     | Trabe maestra 3                 | <b>D3</b>       |
| <b>TM4</b>     | Trabe maestra 4                 | <b>D4</b>       |
| <b>TM5</b>     | Trabe maestra 5                 | <b>D5</b>       |
| <b>TM6</b>     | Trabe maestra 6                 | <b>D6</b>       |
| <b>TM7</b>     | Trabe maestra 7                 | <b>D7</b>       |
| <b>TM8</b>     | Trabe maestra 8                 | <b>D8</b>       |
| <b>TM9</b>     | Trabe maestra 9                 | <b>D9</b>       |
| <b>TM10</b>    | Trabe maestra 10                | <b>D10</b>      |
| <b>TM11</b>    | Trabe maestra 11                | <b>D11</b>      |
| <b>TM12</b>    | Trabe maestra 12                | <b>D12</b>      |
| <b>TM13</b>    | Trabe maestra 13                | <b>D13</b>      |
| <b>TM14</b>    | Trabe maestra 14                | <b>D14</b>      |
| <b>TM15</b>    | Trabe maestra 15                | <b>D15</b>      |



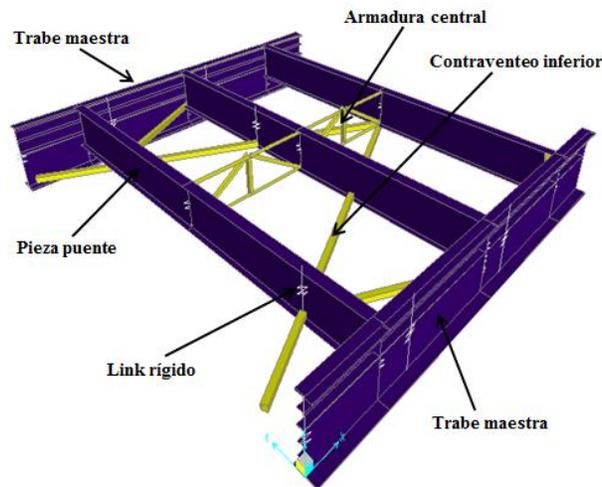
**Figura 4.5. Ubicación de la clasificación de dovelas**

En el programa se introducen las propiedades de los materiales tanto de las dovelas como de la nariz de acuerdo con el apartado 3.4.5. (Figura 4.6).

**Figura 4.6. Propiedades de los materiales**

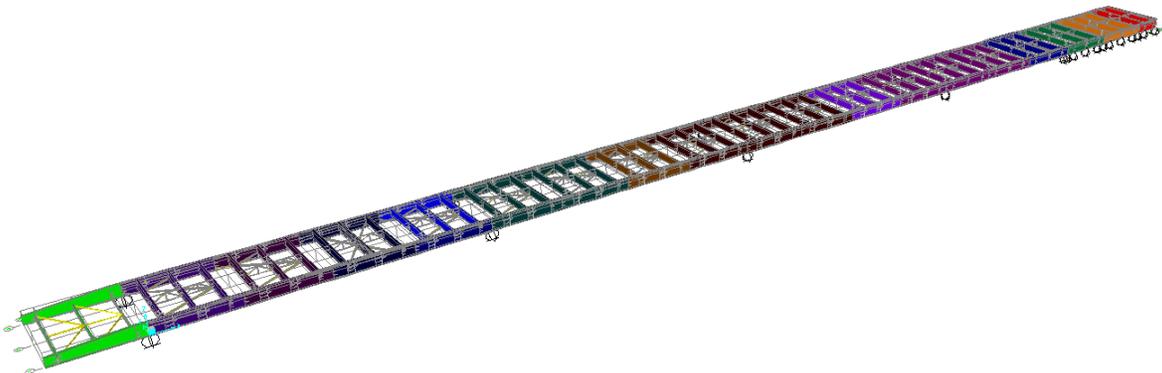
De acuerdo con lo descrito en el apartado 3.3.2.1, las dovelas y nariz están formadas a base de una unión de elementos continuos de 2 m, 4 m, 4 m, 2 m, 2 m, 4 m, 4 m, 2 m, etc., por lo que en el modelo se realizó el empujado con esa misma secuencia para observar el comportamiento de la superestructura y colocar los apoyos móviles en cada unión entre trabe maestra y pieza puente.

Las piezas puente, la armadura central y el contraventeo inferior se unen por medio de un “link” rígido al igual que la unión entre trabe maestra y apoyo móvil (para crear un elemento infinitamente rígido), y así lograr continuidad en la estructura. (Figura 4.7).



**Figura 4.7. Dovela metálica**

Cada dovela cuenta con sus respectivas uniones de contraventeo y armadura con placas soldadas, atiesadores longitudinales, atiesadores transversales y cartabones tanto en las traves maestras como en las piezas puente. Estas secciones se modelaron en forma de cargas concentradas en los nodos de las dovelas (en cada unión en las piezas puente con la trabe maestra) así como cargas distribuidas en el caso de los atiesadores transversales y cartabones en las traves maestras, esto para poder asemejar el peso de la dovela al plano del proyecto (Figura 4.8).

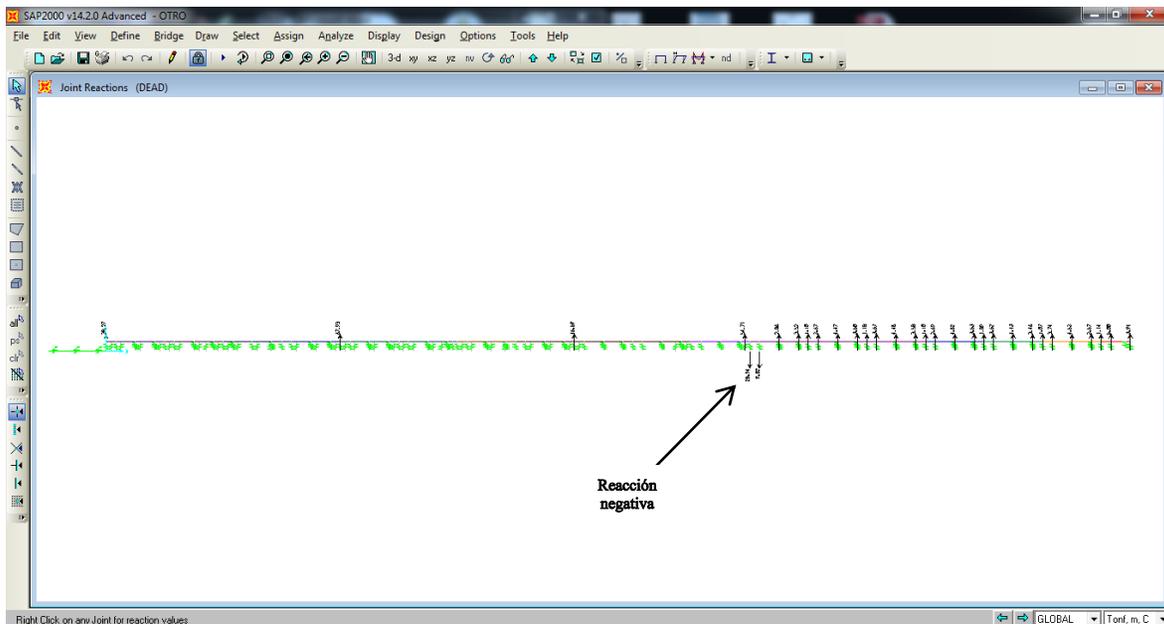


**Figura 4.8. Modelo general de la parte empujada del puente**

### 4.2.2. Condiciones de apoyo

Para realizar el proceso de empujado las dovelas se colocan sobre apoyos donde pudieran deslizarse al momento del empuje, estos apoyos los llamamos apoyos deslizantes (rollers) los cuales restringen el desplazamiento en el eje “Z”. Al construirse las dovelas, se van colocando sobre los rollers. Cada apoyo del modelo va colocado en la misma secuencia de segmentación de las dovelas (2 m, 4 m, 4 m, 2 m etc.).

En el modelo matemático se revisaron las reacciones en los apoyos, ya que llegaba un momento en el que aparecían reacciones negativas, esto indicaba que el apoyo se estaría levantando, lo cual no podía suceder (en obra esto se soluciona metiendo calzas al apoyo), por lo tanto se eliminaban esos apoyos en el modelo ya que el signo solo indica que no está trabajando y se continuaba con el proceso de análisis (Figura 4.9).



**Figura 4.9. Reacción negativa en uno de los apoyos**

Se obtenían nuevamente las reacciones y se continuaba con el proceso de empujado; se volvían a colocar los apoyos en su respectivo lugar, simulando que continuaban trabajando junto con la superestructura.

En esta tesis la parte a revisar solo es el comportamiento de la superestructura, por lo que las pilas se modelaron solo como apoyos móviles (en la parte superior, cabezal) para simular el empuje de la superestructura. Para estos casos el tipo de apoyo fue el mismo, solo se restringía el desplazamiento en la dirección “Z” y los demás desplazamientos y giros quedan libres.

### 4.3. VERIFICACIÓN DEL MODELO

El modelo matemático se validó mediante la comprobación del peso del modelo contra el peso estimado en el proyecto, considerando solo el peso de la parte empujada del puente.

### 4.3.1. Verificación por peso

En las tablas 4.3 y 4.4 se muestra de forma resumida los pesos calculados de cada dovela que conforma la parte empujada del puente y la comparación global para el mismo, respectivamente.

**Tabla 4.3. Comparación entre las dovelas que componen el puente**

| Caso                  | W (ton) | Dif % | Caso                     | W (ton) | Dif % |
|-----------------------|---------|-------|--------------------------|---------|-------|
| <b>Dovela 2 izq.</b>  |         |       | <b>Dovela 7 der.</b>     |         |       |
| Proyecto              | 27.26   | 1.20  | Proyecto                 | 26.86   | 0.04  |
| Modelo                | 26.94   |       | Modelo                   | 26.85   |       |
| <b>Dovela 1 izq.</b>  |         |       | <b>Dovela 8 der.</b>     |         |       |
| Proyecto              | 29.21   | 0.79  | Proyecto                 | 26.33   | -0.67 |
| Modelo                | 28.98   |       | Modelo                   | 26.50   |       |
| <b>Dovela de pila</b> |         |       | <b>Dovela 9 der.</b>     |         |       |
| Proyecto              | 36.08   | -2.36 | Proyecto                 | 25.49   | 0.02  |
| Modelo                | 36.95   |       | Modelo                   | 25.49   |       |
| <b>Dovela 1 der.</b>  |         |       | <b>Dovela 10 der.</b>    |         |       |
| Proyecto              | 29.25   | 1.51  | Proyecto                 | 25.49   | 0.02  |
| Modelo                | 28.82   |       | Modelo                   | 25.49   |       |
| <b>Dovela 2 der.</b>  |         |       | <b>Dovela 11 der.</b>    |         |       |
| Proyecto              | 28.04   | 1.07  | Proyecto                 | 25.49   | 0.02  |
| Modelo                | 27.74   |       | Modelo                   | 25.49   |       |
| <b>Dovela 3 der.</b>  |         |       | <b>Dovela 12 der.</b>    |         |       |
| Proyecto              | 28.04   | 1.07  | Proyecto                 | 26.23   | -0.25 |
| Modelo                | 27.74   |       | Modelo                   | 26.29   |       |
| <b>Dovela 4 der.</b>  |         |       | <b>Dovela 13 der.</b>    |         |       |
| Proyecto              | 29.10   | -0.07 | Proyecto                 | 25.49   | 1.22  |
| Modelo                | 29.13   |       | Modelo                   | 25.18   |       |
| <b>Dovela 5 der.</b>  |         |       | <b>Dovela 14 der.</b>    |         |       |
| Proyecto              | 26.86   | 0.04  | Proyecto                 | 25.33   | -1.68 |
| Modelo                | 26.85   |       | Modelo                   | 25.76   |       |
| <b>Dovela 6 der.</b>  |         |       | <b>Dovela de estribo</b> |         |       |
| Proyecto              | 26.86   | 0.04  | Proyecto                 | 18.46   | -2.51 |
| Modelo                | 26.85   |       | Modelo                   | 18.92   |       |

**Tabla 4.4. Comparación de todo el puente**

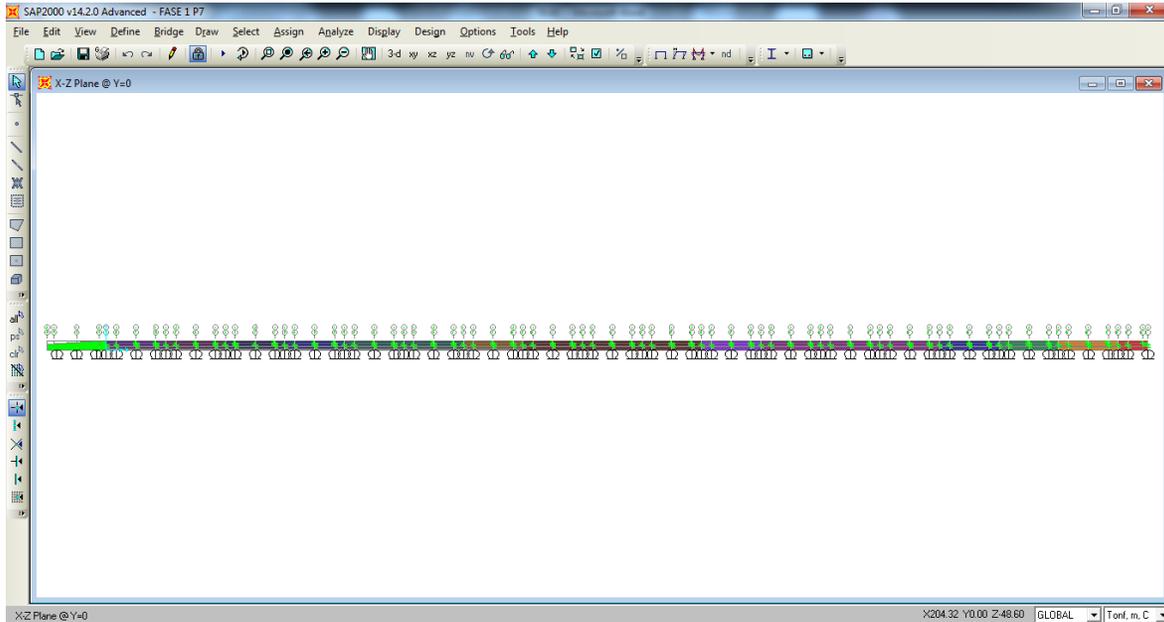
| Caso           | W (ton) | Dif % |
|----------------|---------|-------|
| <b>Dovelas</b> |         |       |
| Proyecto       | 485.87  | -0.02 |
| Modelo         | 485.96  |       |

## 4.4. PROCESO DE EMPUJADO

### 4.4.1. Simulación

Primero se lanza la nariz, posteriormente se lanzan las dovelas de la parte empujada, específicamente como lo indica el proyecto. Para esta etapa de construcción se utilizaron rollers, que son apoyos móviles donde la superestructura será apoyada al momento de estar en el patio de fabricación de donde será empujada por medio de gatos hidráulicos hasta alcanzar su posición final. En esta tesis se simulan los rollers colocados a cada 2 m, 4 m, 4 m, 2 m, 2 m, 4 m, 4 m, 2 m,

y así sucesivamente empezando desde la nariz (Figura 4.10); así mismo el análisis del empuje se realiza con esa misma secuencia. Los rollers tienen la función de restringir el desplazamiento en el sentido del eje “Z” por lo que los demás grados de libertad están liberados. Esto asemeja a los elementos de apoyo que se utilizan en la obra los cuales evitan que la superestructura pueda levantarse al momento de realizarse el empujado en cada fase constructiva.



**Figura 4.10. Colocación de Rollers**

Se procede a simular el sistema de empuje del puente; a cada modelo se le fueron quitando rollers y recorriendo hacia “atrás” pilas y el estribo simulando este sistema.

Los claros a vencer son 4 (empezando de derecha a izquierda), el primer claro (estribo 8 a la pila 7) de la etapa de empujado tiene una longitud de 35m, este claro lo llamaremos como “fase 1”; el segundo claro (pila 7 a la pila 6), tercer claro (pila 6 a la pila 5) y cuarto claro (pila 5 al pilón 4) tienen una longitud de 48m; por lo que los nombraremos como “fase 2”, “fase 3” y “fase 4” respectivamente. Después del claro 4 se empujan 2 dovelas más para iniciar el sistema de atirantado por lo que quedan dos dovelas en voladizo; a esta etapa la llamaremos “fase 5”.

A continuación se presentan las diferentes posiciones de las dovelas durante el empuje del puente.

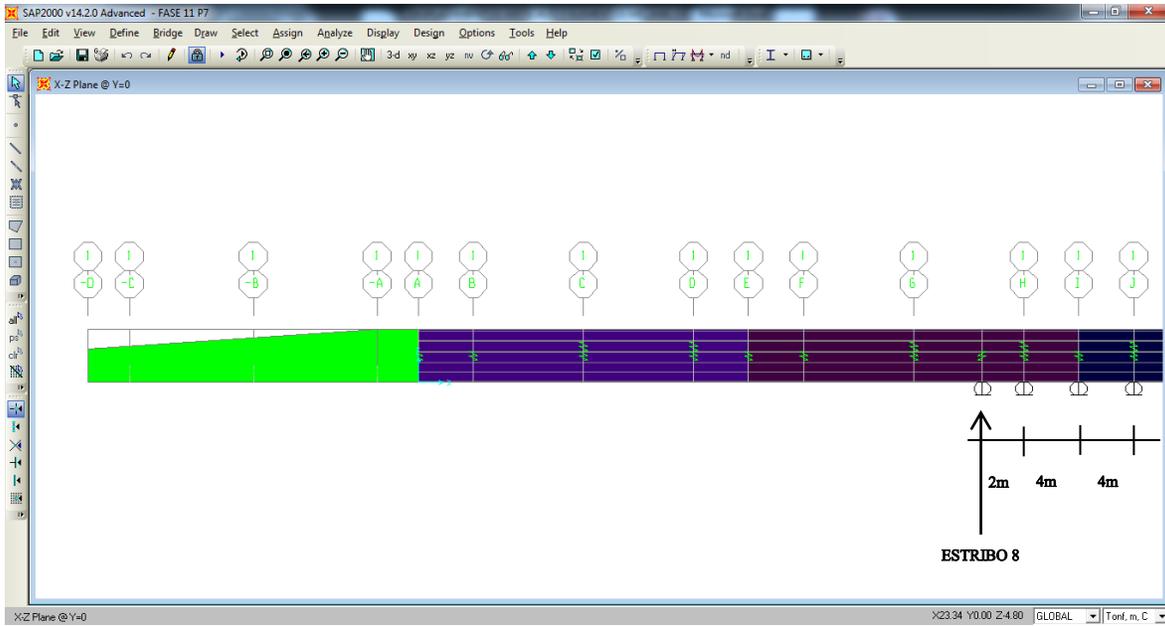


Figura 4.11. Fase 1 de empujado, longitud de volado 32.50 m

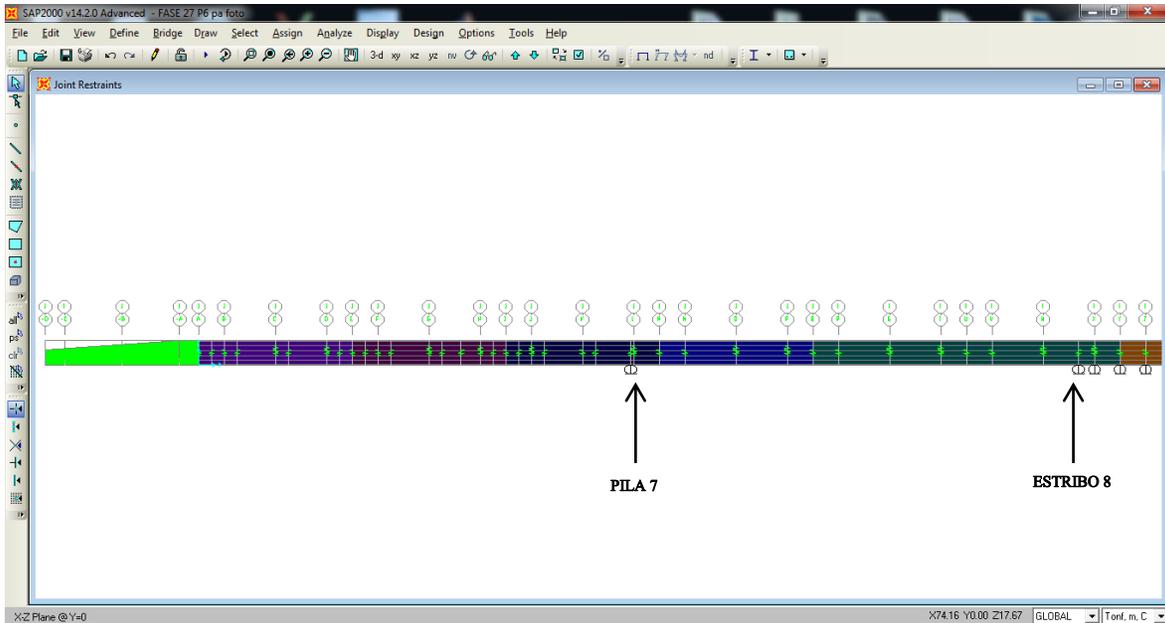


Figura 4.12. Fase 2 de empujado, longitud de volado 45.75 m

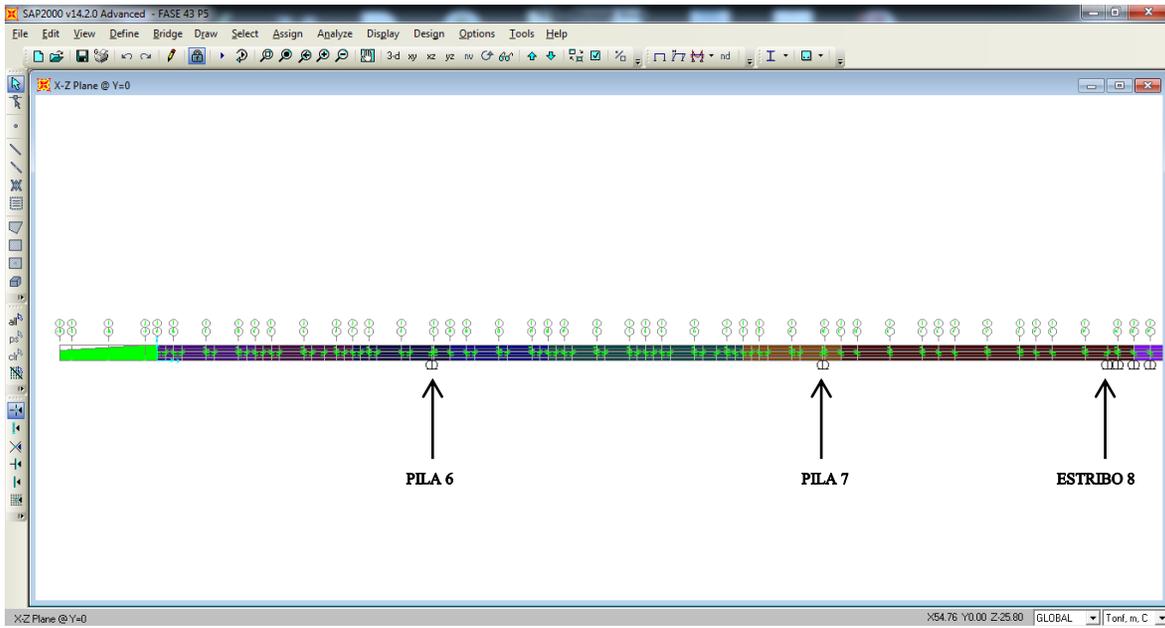


Figura 4.13. Fase 3 de empujado, longitud de volado 45.75 m

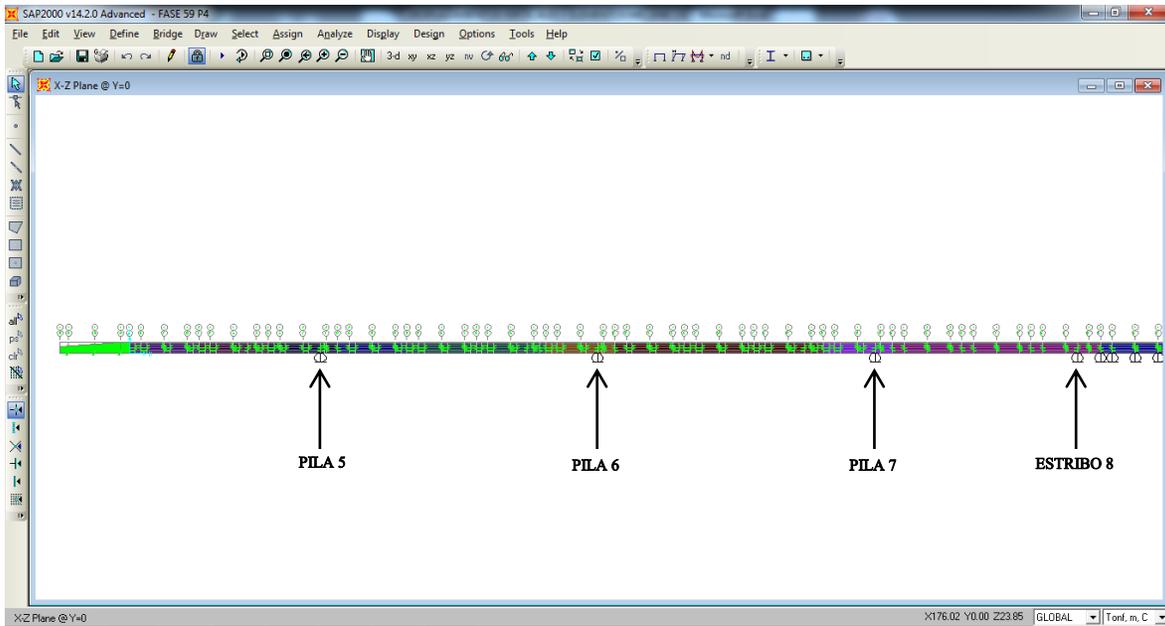
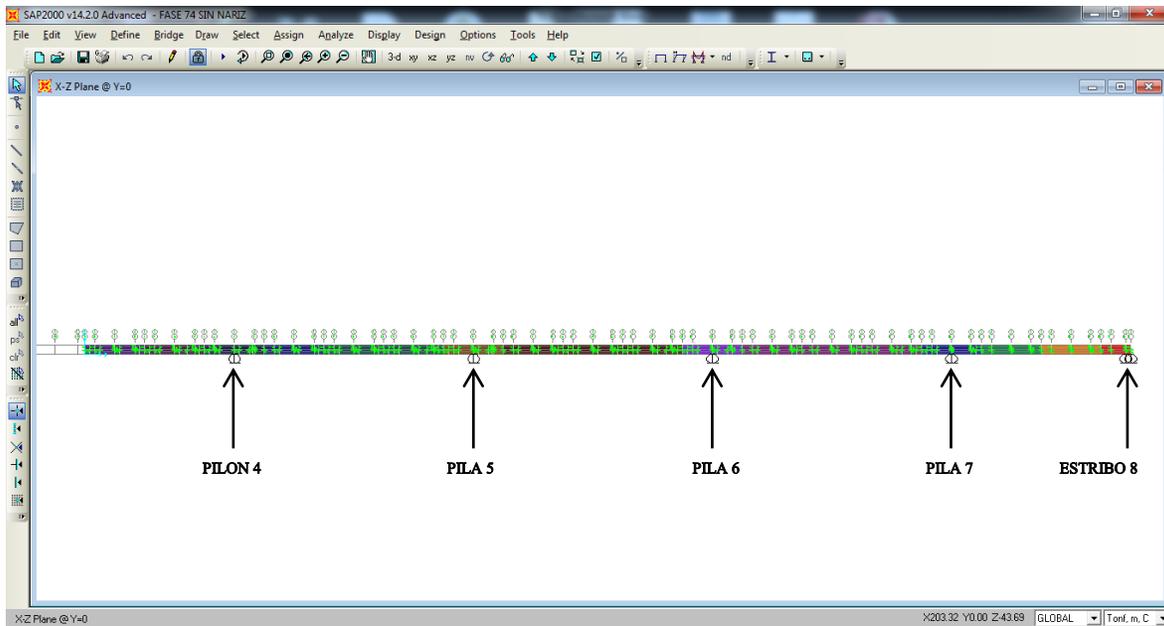


Figura 4.14. Fase 4 de empujado, longitud de volado 45.00 m



**Figura 4.15. Fase 5 de empujado, longitud de volado 30.00 m (sin nariz)**

#### 4.4.2. Fuerza de ganeo

En este tipo de método de construcción se toma en cuenta la acción de fuerzas verticales de ganeo que permiten levantar la superestructura durante el empuje para recuperar la flecha que se produjo por el peso propio y así poder apoyarla en la pila para seguir con la operación de empuje.

Además se considerará que al término del empujado, en todas las pilas definitivas se levantará la superestructura mediante gatos hidráulicos para sustituir los apoyos deslizantes provisionales por apoyos definitivos.

En cada pila donde se apoyará la superestructura contará con una ménsula provisional en donde se coloca un gato hidráulico (dispositivo de corrección de flechas) para que cuando la superestructura llegue a la ménsula con su respectiva flecha esta pueda ser levantada para poder alcanzar el nivel de la pila y seguir con el proceso constructivo.

El cálculo de las fuerzas de ganeo del puente en estudio se obtuvieron de forma iterativa, ya que de acuerdo con la flecha que se generó, en el programa se fue analizando hasta corregir esa flecha y obtener resultados de una deflexión nula.

#### 4.4.3. Control geométrico

En el diseño de puentes empujados, se debe incluir el cálculo de las flechas para las diversas etapas de construcción con el objetivo de prever los ajustes necesarios durante la construcción y proporcionar los datos para el control geométrico en la obra.

Se realiza un control geométrico de las flechas a cada 6 m desde la punta de la nariz hasta terminar completamente todo el tramo empujado.

#### 4.5. TIPO DE ANÁLISIS

Se realizó un análisis estático lineal, ya que se espera que la estructura se comporte siempre en el rango elástico. Por medio de este análisis se pueden calcular, las acciones internas que producen las sollicitaciones de servicio o de trabajo en los diversos elementos estructurales, y en comparar los esfuerzos ocasionados por esas acciones. Se supone que la respuesta de la estructura es lineal y que acepta la reversibilidad de las deformaciones y la superposición de los efectos originados por las constantes estáticas de las secciones.

Este análisis se utiliza cuando la geometría de la estructura tiene linealidad, es decir, que los movimientos (desplazamientos y giros) que se producen son pequeños comparados con las dimensiones geométricas de la estructura (espesor, peralte, etc.). La geometría de la estructura deformada no difiere sensiblemente de la geometría original, lo cual permite plantear las ecuaciones de equilibrio sobre la geometría original, en vez de tener que plantearlo sobre la geometría real, deformada, y desconocida a priori.

Otro aspecto donde se utiliza este análisis es, cuando se presenta linealidad en el material, es decir, que la relación entre tensiones y deformaciones es elástica y lineal, o sea, que los materiales de la estructura cumplen la ley de Hooke generalizada.

El método es útil para predecir el comportamiento de las estructuras en condiciones de trabajo.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos en la modelación matemática del puente.

La cantidad de resultados de este análisis es considerable, sin embargo, puede resumirse describiendo solo los elementos mecánicos y desplazamientos en las partes más representativas de la estructura, es decir, en la punta de la nariz y en la superestructura.

Para cada fase de empujado se tienen los siguientes resultados:

- Elementos mecánicos en la superestructura. Se obtuvieron los cortantes V22 (x-z), con sus respectivos momentos flexionantes M33 (x-z).
- Reacciones en los apoyos deslizantes del patio de fabricación. Que son las reacciones obtenidas en cada uno de los apoyos simples involucrados en el modelo, por lo que las reacciones son únicamente fuerzas para verificar el peso de la estructura.
- Desplazamientos en las puntas de los elementos. Estos son desplazamientos lineales obtenidos en la punta de la nariz y en la punta de las dovelas respectivamente.

#### 5.1. ANÁLISIS ESTÁTICO DEL PUENTE COMPLETO

##### 5.1.1. Reacciones para verificar el peso de la superestructura

Se presentan las reacciones que se producen ante peso propio en la superestructura del tramo empujado del puente.

**Tabla 5.1. Reacciones para la verificación del peso**

| TABLE: Joint Reactions |            |           |      |      |         |        |        |        |
|------------------------|------------|-----------|------|------|---------|--------|--------|--------|
| Joint                  | OutputCase | CaseType  | F1   | F2   | F3      | M1     | M2     | M3     |
| Text                   | Text       | Text      | Tonf | Tonf | Tonf    | Tonf-m | Tonf-m | Tonf-m |
| 15'                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 75.3087 | 0      | 0      | 0      |
| 31'                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 46.5065 | 0      | 0      | 0      |
| 47'                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 54.7444 | 0      | 0      | 0      |
| 593                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 75.3163 | 0      | 0      | 0      |
| 63'                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 49.4657 | 0      | 0      | 0      |
| 641                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 46.5312 | 0      | 0      | 0      |
| 672                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 54.738  | 0      | 0      | 0      |
| 703                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 49.4841 | 0      | 0      | 0      |
| 731                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 16.8422 | 0      | 0      | 0      |
| 75'                    | DEAD       | LinStatic | 0    | 0    | 17.0216 | 0      | 0      | 0      |

Peso total superestructura = 485.9587 Tonf

## 5.2. ANÁLISIS POR FASES CONSTRUCTIVAS

### 5.2.1. Momento flexionante en la dirección x-z del plano por etapa constructiva

Se presentan los momentos críticos en la etapa de empujado. Estos elementos mecánicos ocurrieron en la fase de volado antes de llegar a la pila, en donde se presentan los máximos momentos negativos de la superestructura.

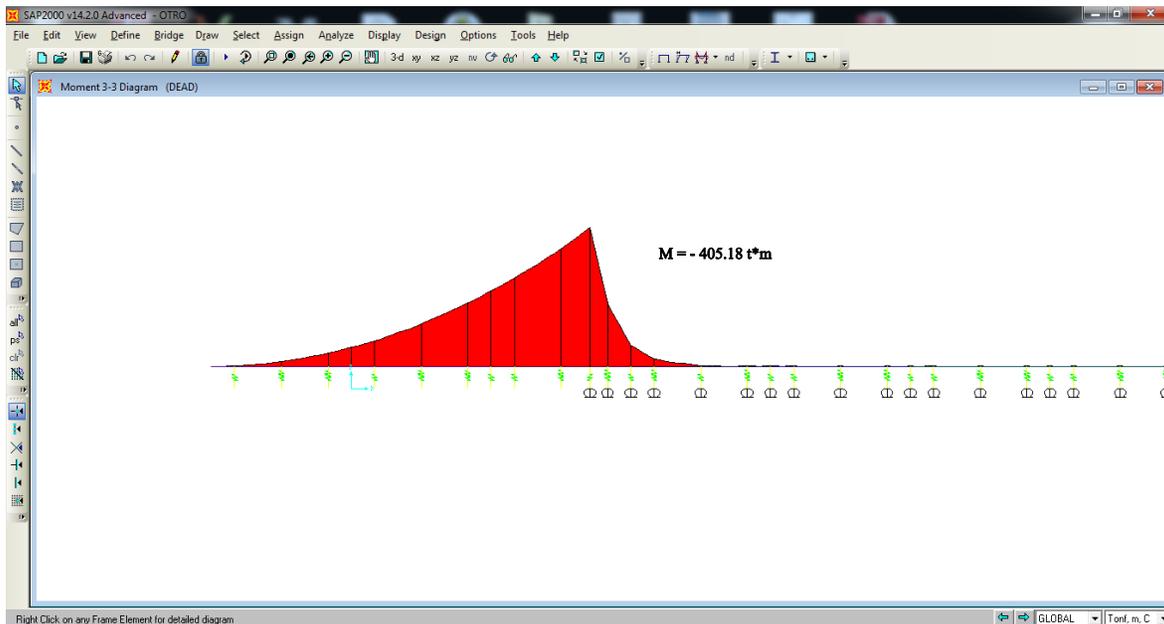


Figura 5.1. Momento flexionante en fase 1 de empujado

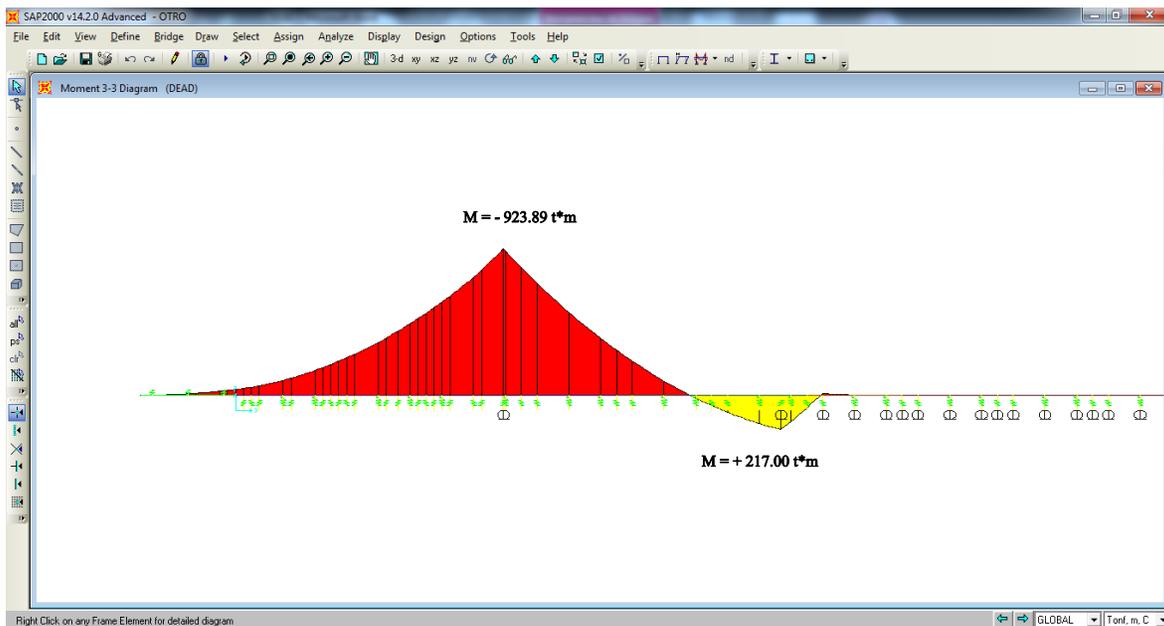


Figura 5.2. Momento flexionante en fase 2 de empujado

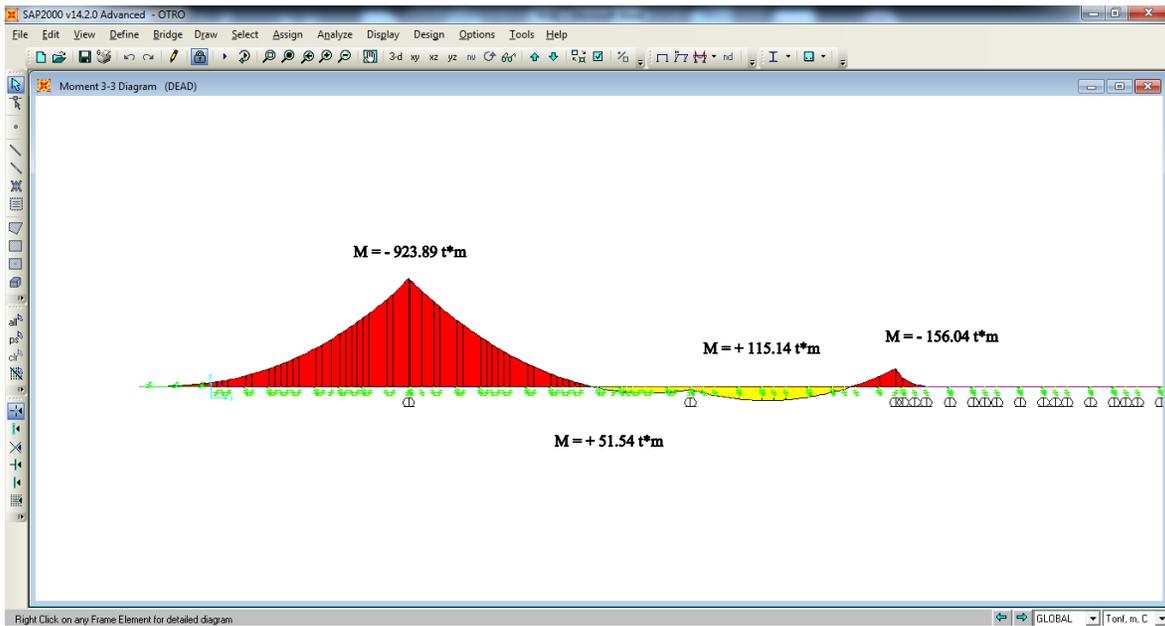


Figura 5.3. Momento flexionante en fase 3 de empujado

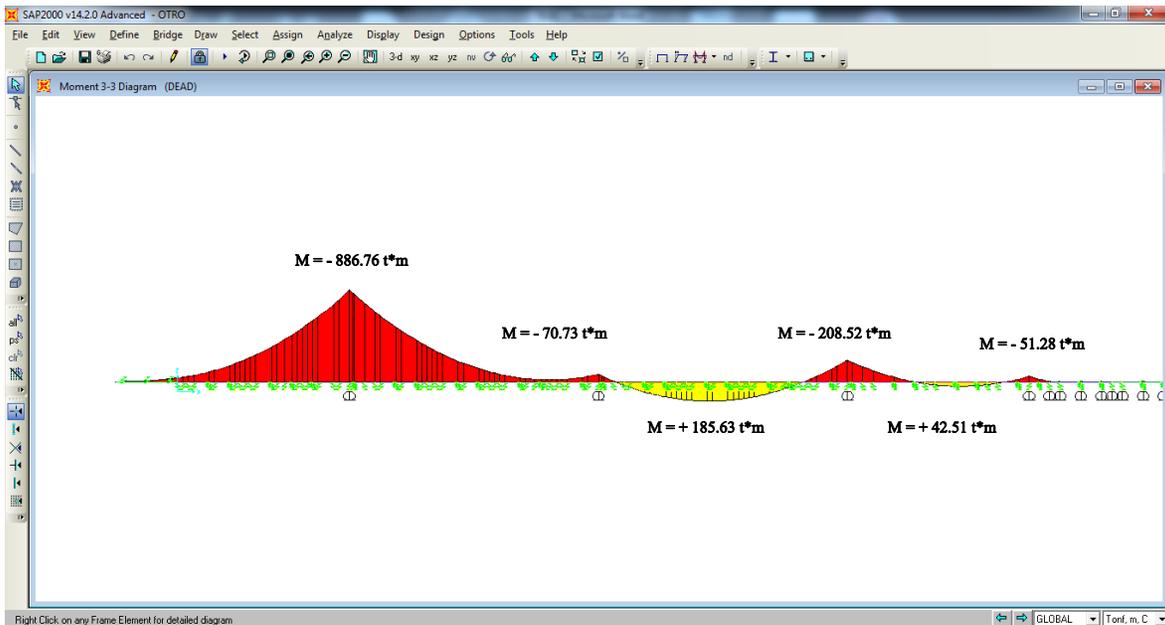
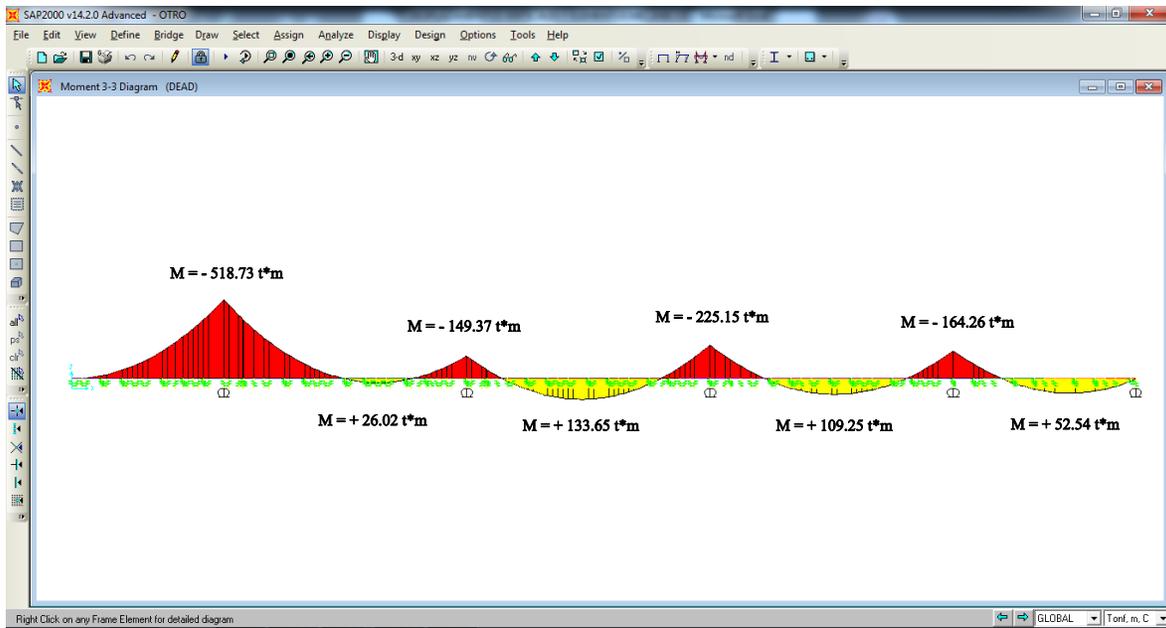
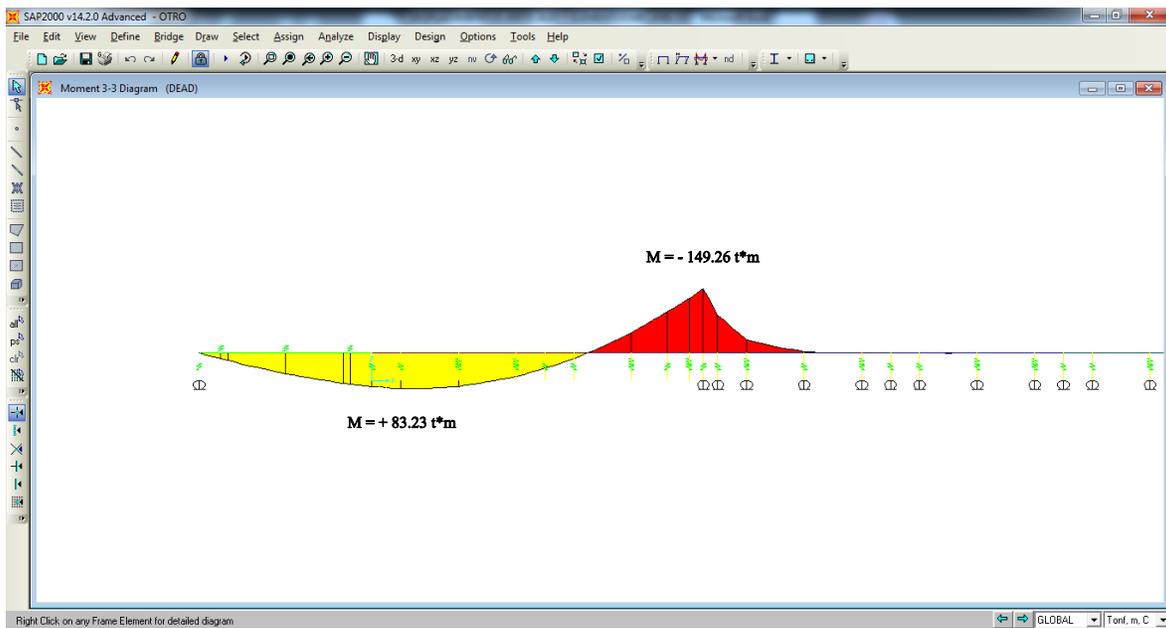


Figura 5.4. Momento flexionante en fase 4 de empujado



**Figura 5.5. Momento flexionante en fase 5 de empujado**

Ahora se presentan los elementos mecánicos (momentos) de la superestructura al momento de que la nariz descansa en cada una de las pilas (en su fase apoyada, como viga continua).



**Figura 5.6. Momento flexionante en fase 1, apoyado**

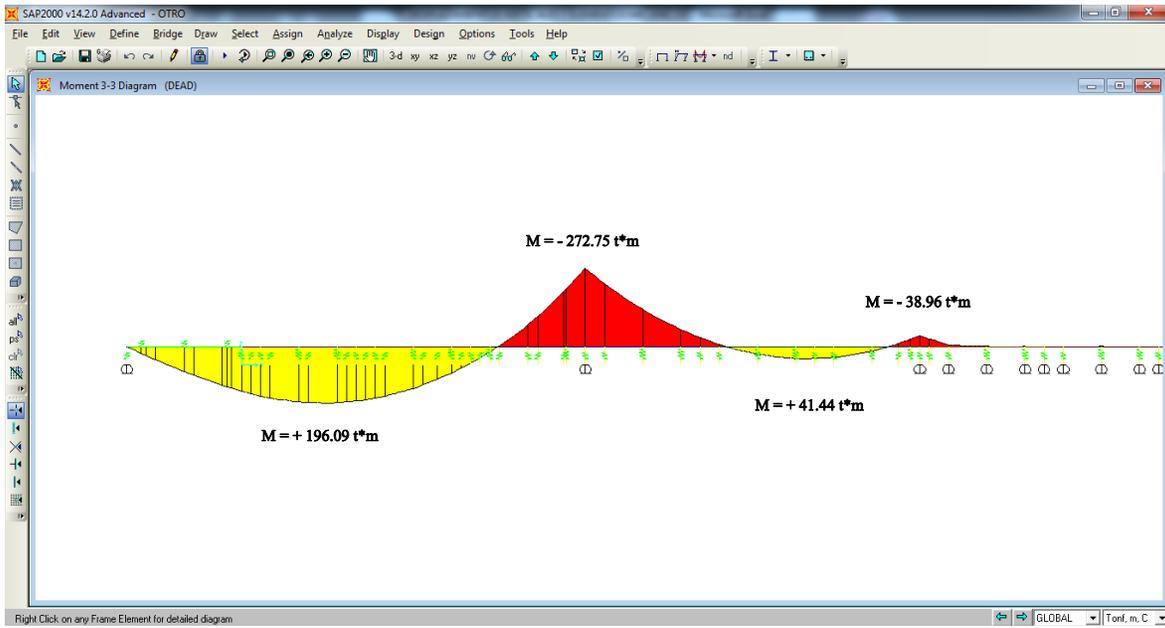


Figura 5.7. Momento flexionante en fase 2, apoyado

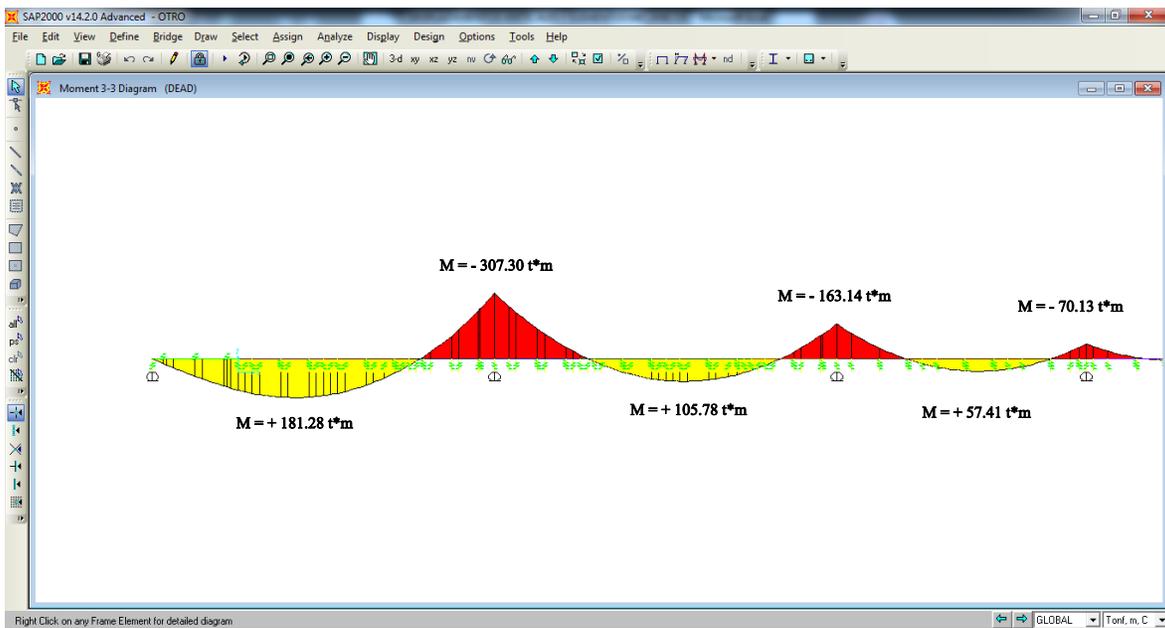


Figura 5.8. Momento flexionante en fase 3, apoyado

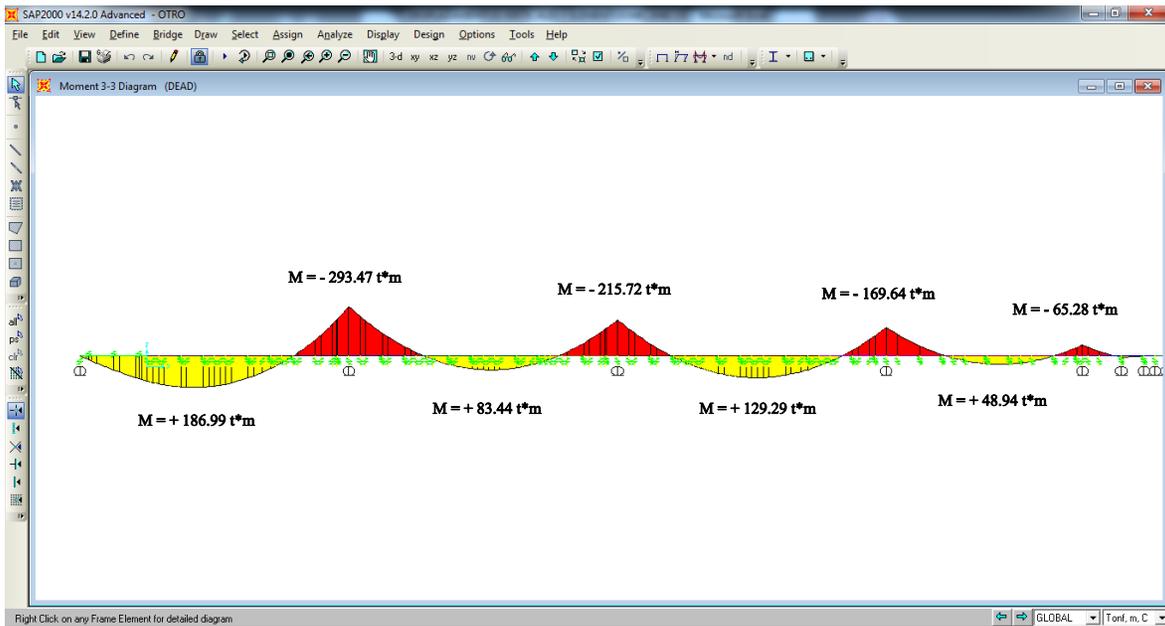


Figura 5.9. Momento flexionante en fase 4, apoyado

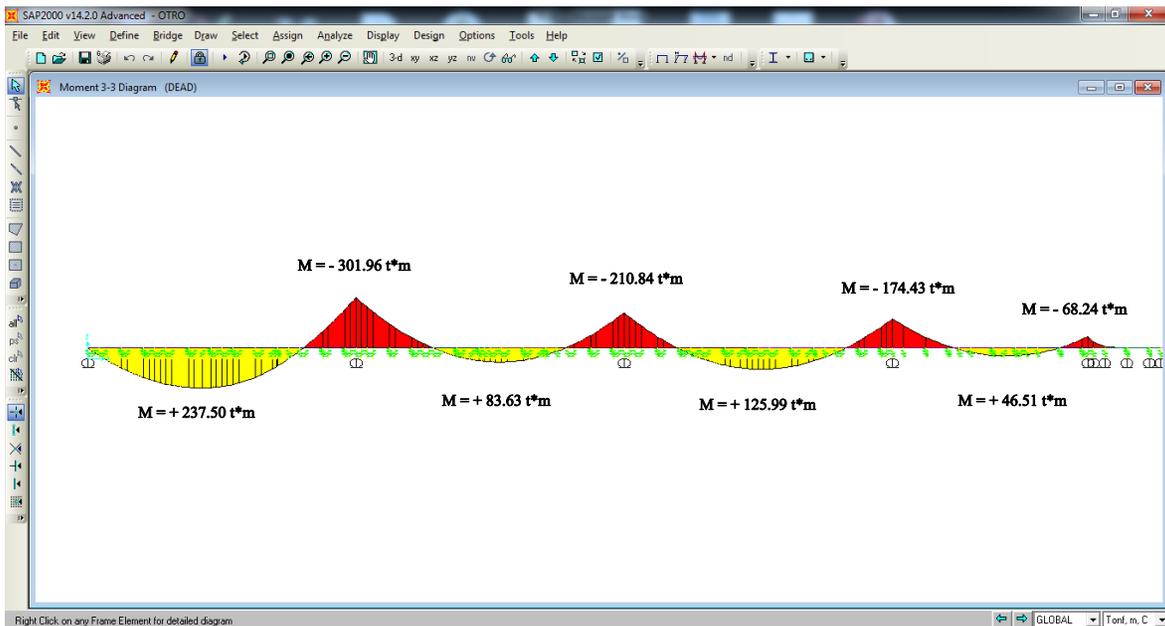


Figura 5.10. Momento flexionante en fase 5, apoyado y sin nariz

### 5.2.2. Fuerza cortante en la dirección x-z por etapa constructiva

Se presentan los cortantes críticos en la etapa de empujado. Estos elementos mecánicos ocurrieron en la fase de volado antes de llegar a la pila, en donde se presentan los máximos cortantes negativos y positivos de la superestructura.

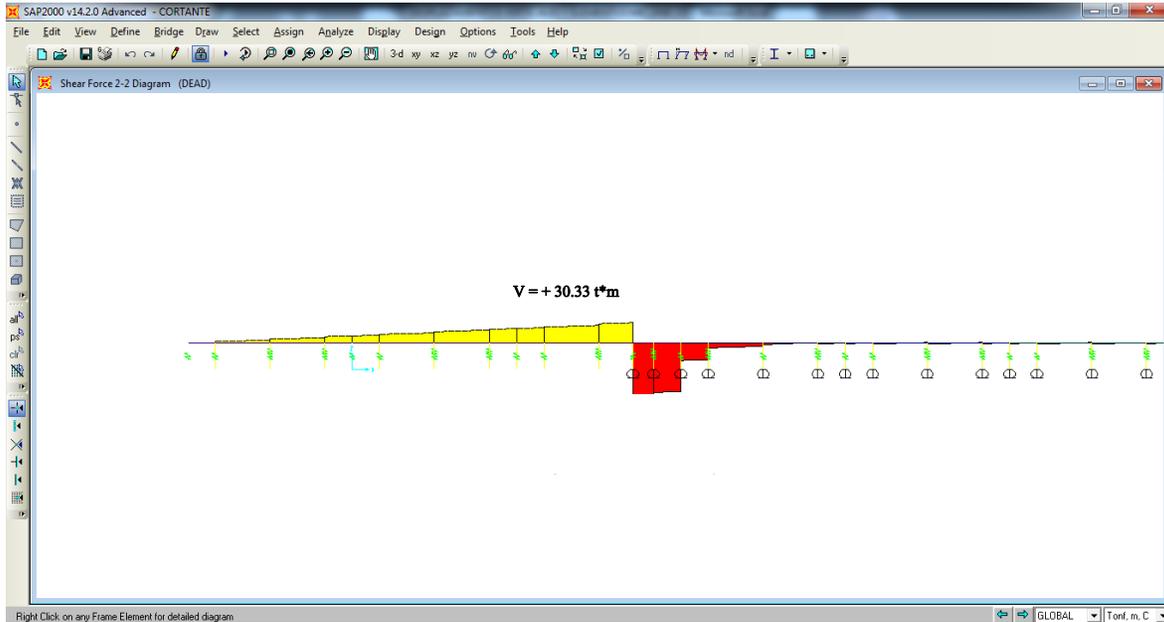


Figura 5.11. Cortante en fase 1 de empujado

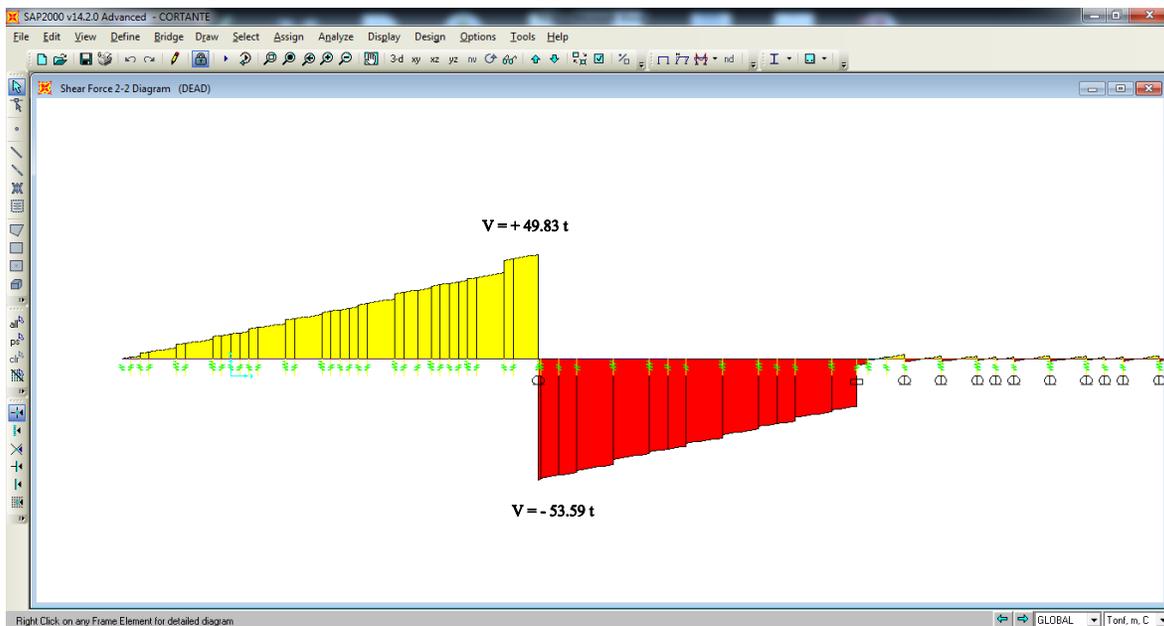


Figura 5.12. Cortante en fase 2 de empujado

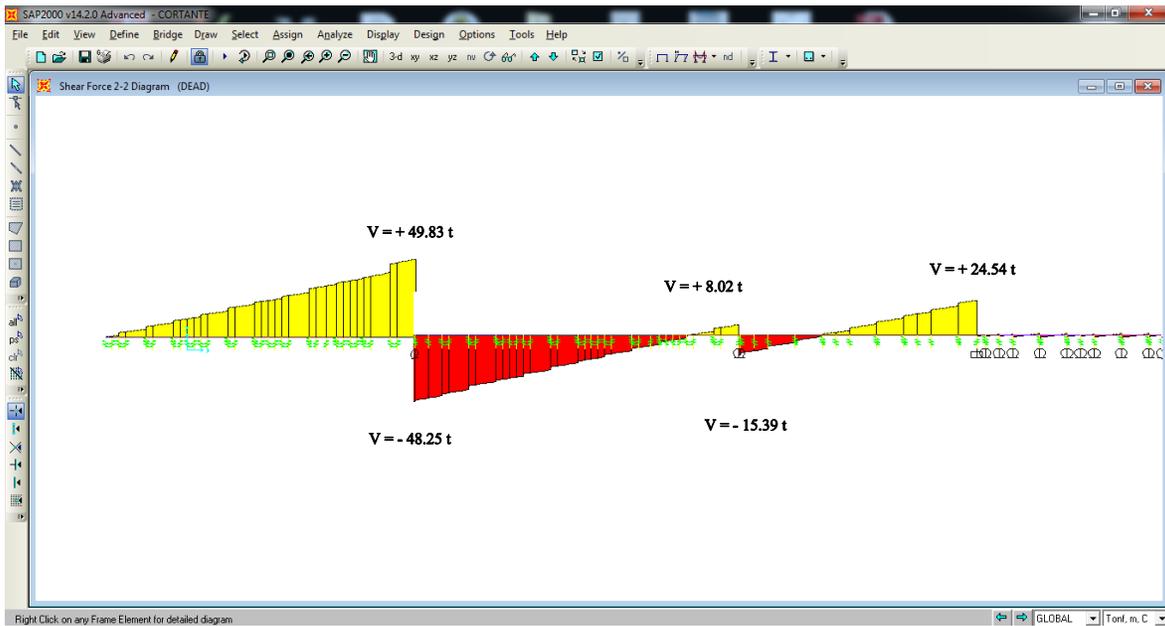


Figura 5.13. Cortante en fase 3 de empujado

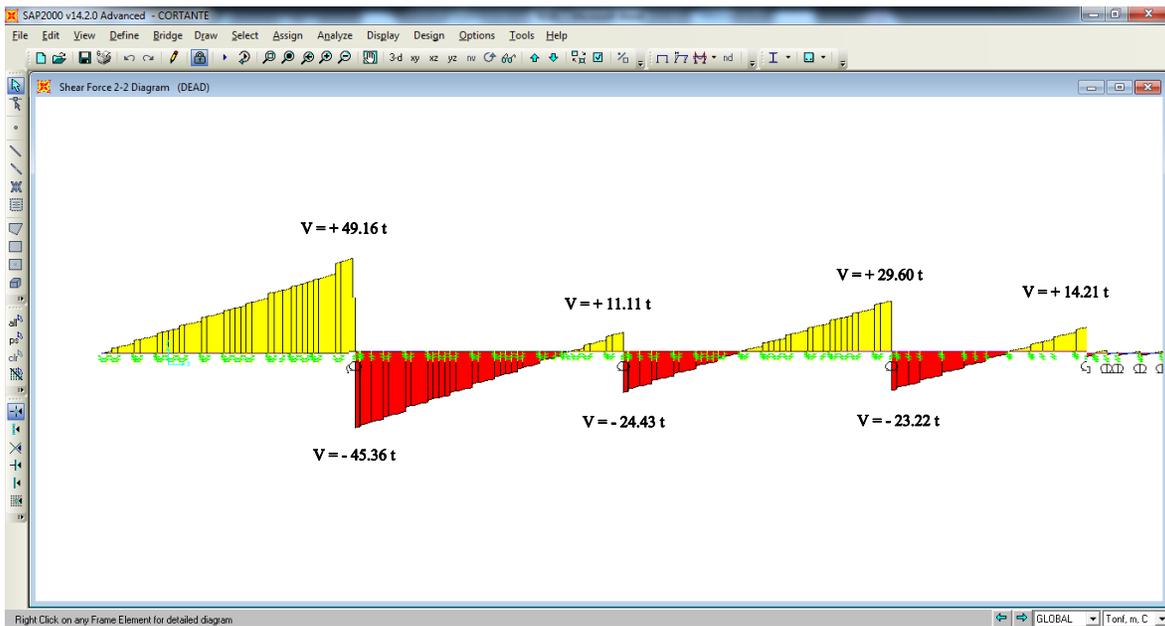
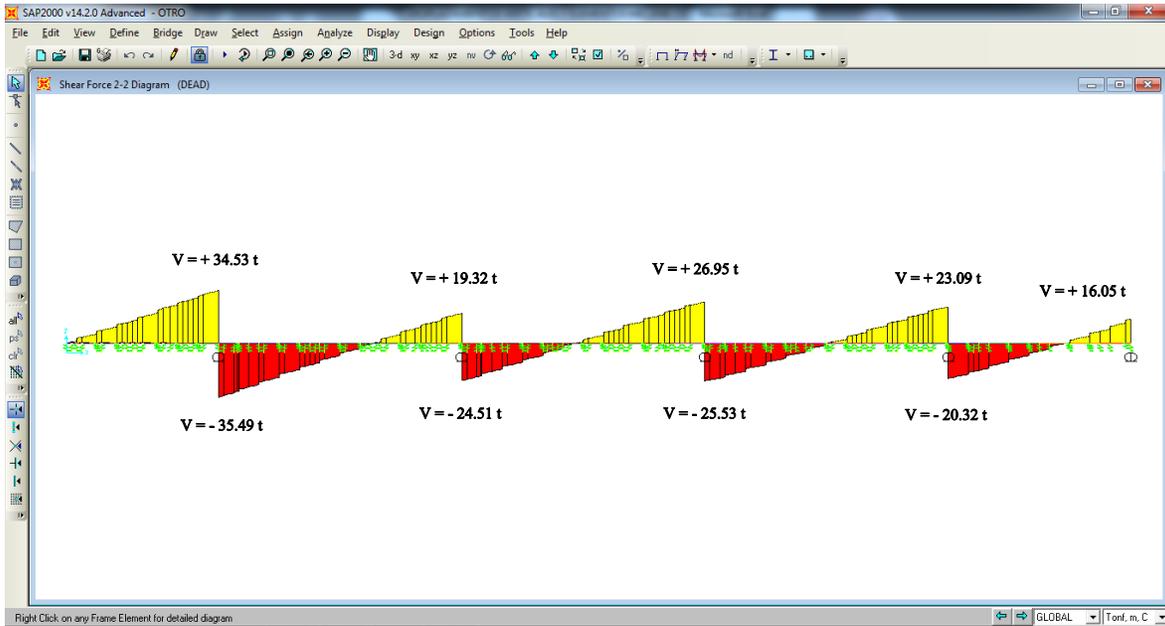
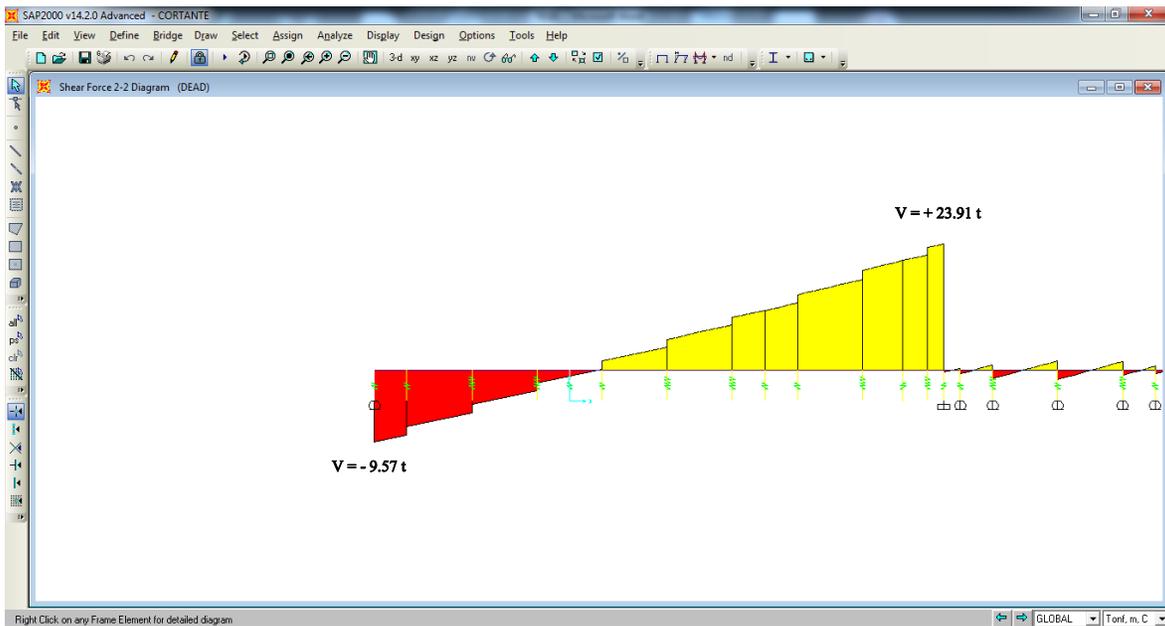


Figura 5.14. Cortante en fase 4 de empujado



**Figura 5.15. Cortante en fase 5 de empujado**

Ahora se presentan los elementos mecánicos (cortantes) de la superestructura al momento de que la nariz descansa en cada una de las pilas (en su fase apoyada, como viga continua).



**Figura 5.16. Cortante en fase 1, apoyado**

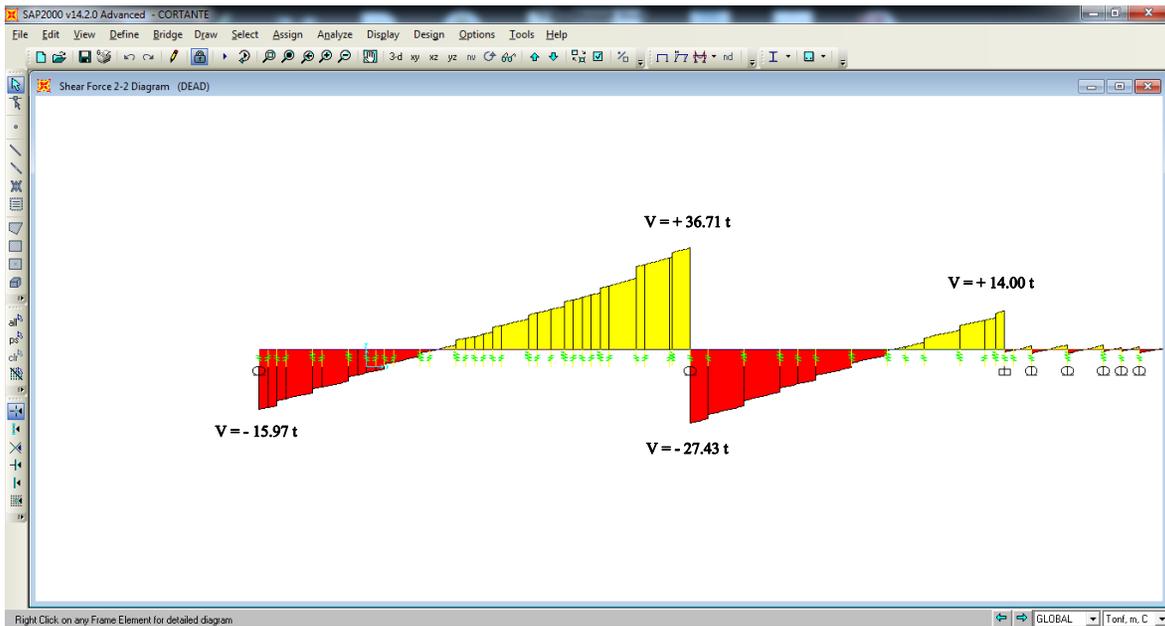


Figura 5.17. Cortante en fase 2, apoyado

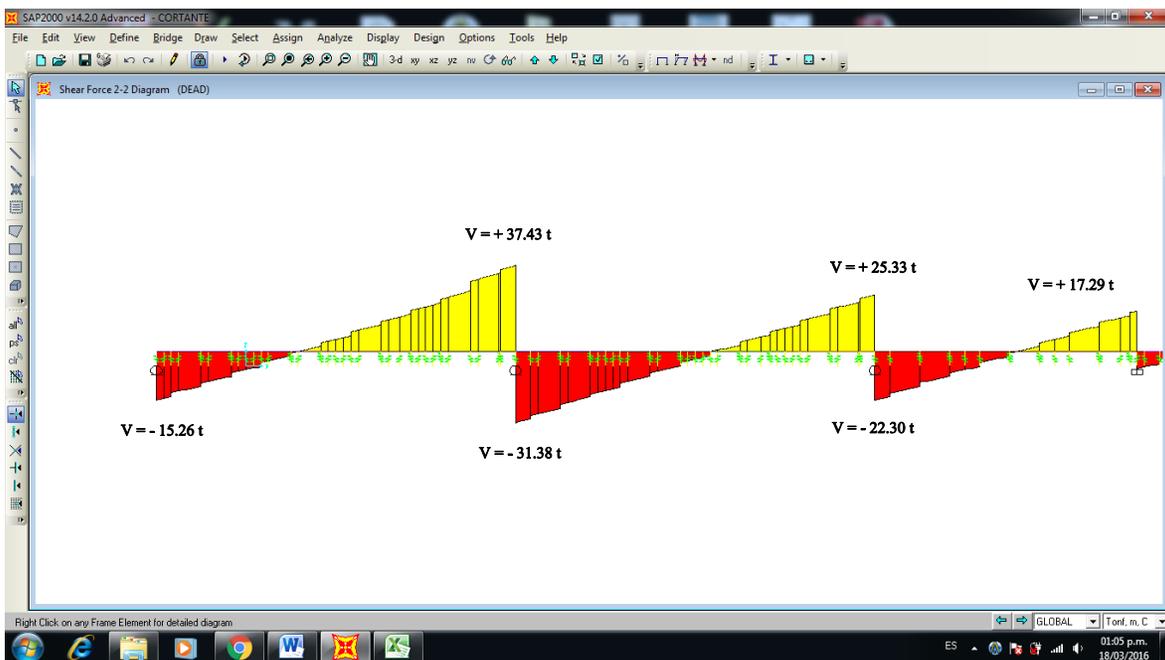


Figura 5.18. Cortante en fase 3, apoyado

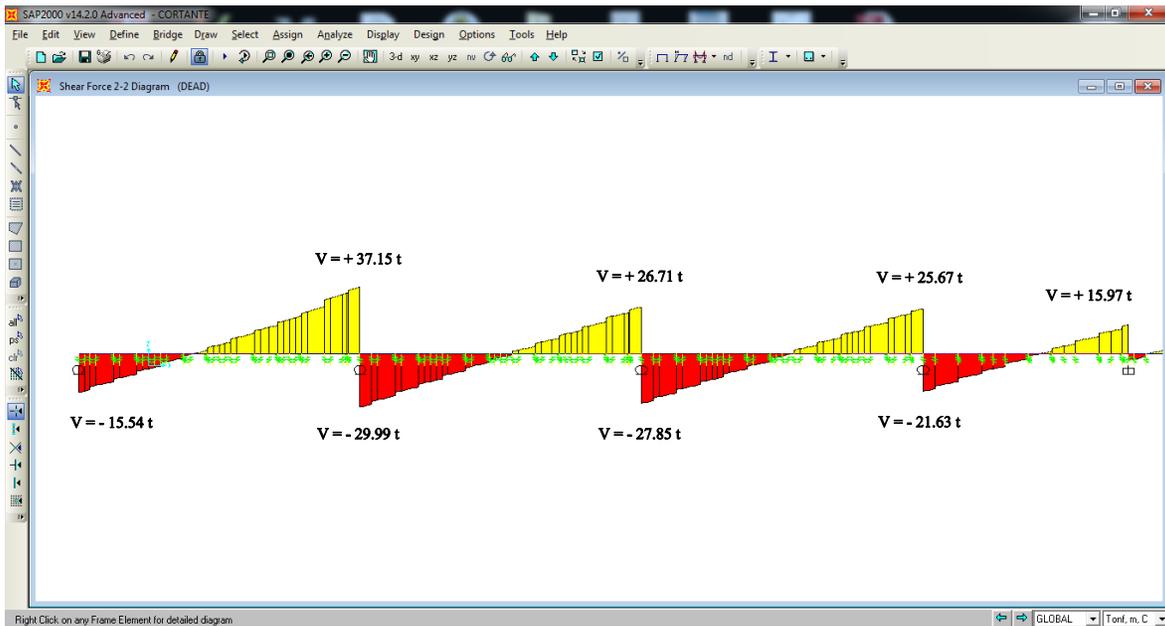


Figura 5.19. Cortante en fase 4, apoyado

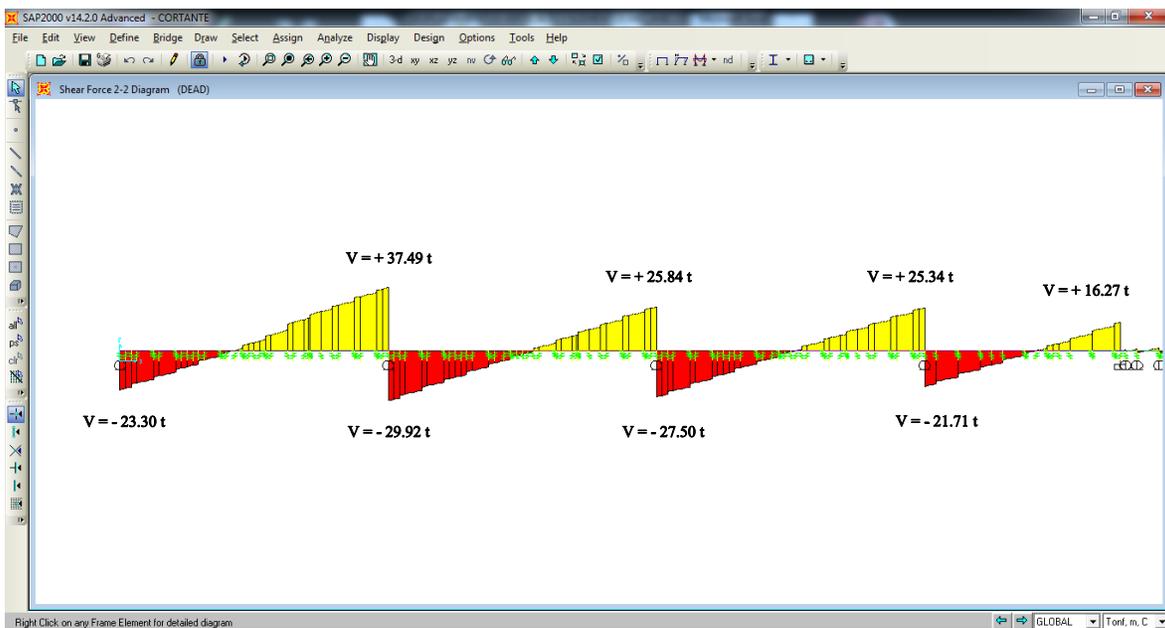
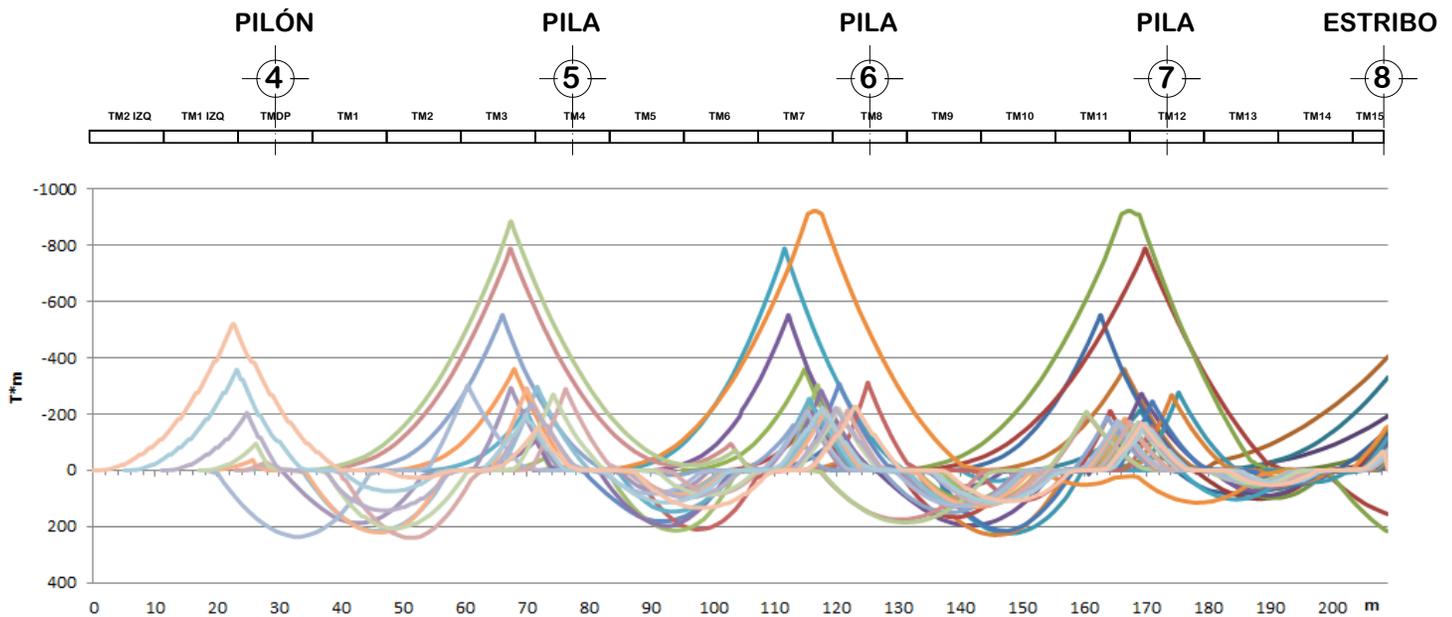


Figura 5.20. Cortante en fase 4, apoyado y sin nariz

### 5.2.3. Envoltente de momentos

Si todos los momentos de las diferentes etapas del análisis se ponen sobre un mismo gráfico, se obtiene una buena visualización de los momentos durante el proceso de empujado. Se estudiaron diferentes claros en el empujado donde se puede observar en la figura 5.21, como el comportamiento de la superestructura es similar en cada uno de los claros al momento de alcanzar el volado máximo antes de llegar a la pila siguiente. Cada parte de la superestructura esta expuesta a todos estos momentos.

Se observa como en los últimos 30 m de empujado, donde ya no se utiliza la nariz de lanzamiento, los momentos negativos aumentan considerablemente alcanzando un momento de más de 500 t\*m en un tramo corto, comparado con los claros de 48m donde en esa longitud de 30 m de empujado tenemos un momento de aproximadamente 360 t\*m utilizando la nariz de lanzamiento, por lo que nos damos cuenta como la nariz nos ayuda a disminuir considerablemente esos momentos flexionantes en cada etapa de empujado.

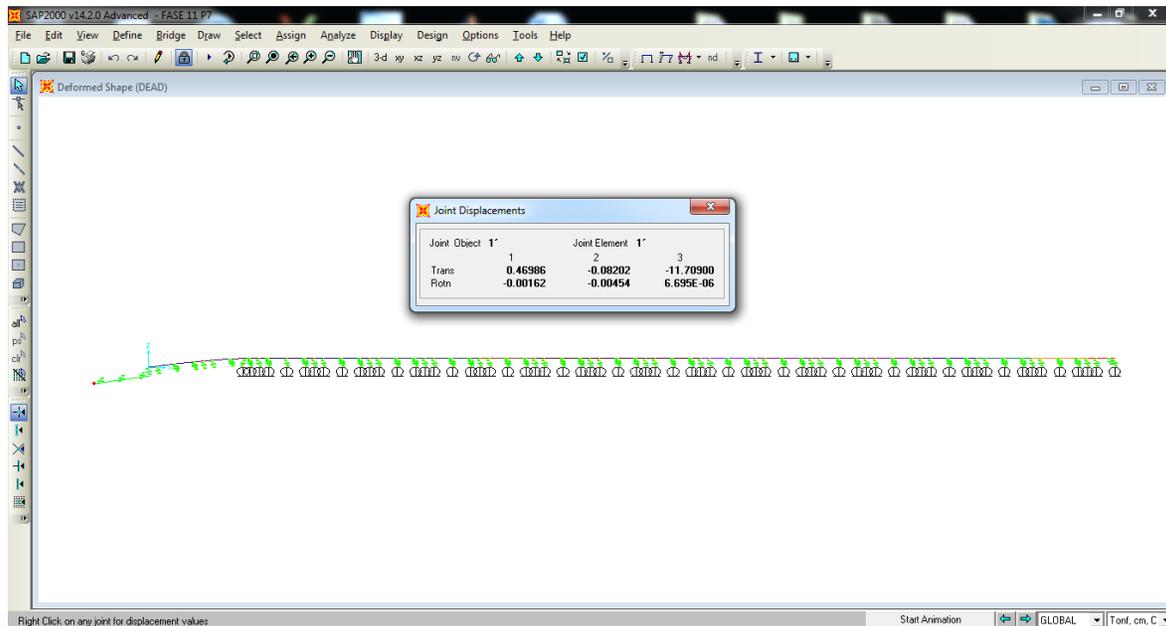


**Figura 5.21. Envoltente de momento durante el empujado, cada sección transversal de la superestructura será expuesta a momentos positivos y negativos**

#### 5.2.4. Deformación del tablero por etapas constructivas (flechas verticales)

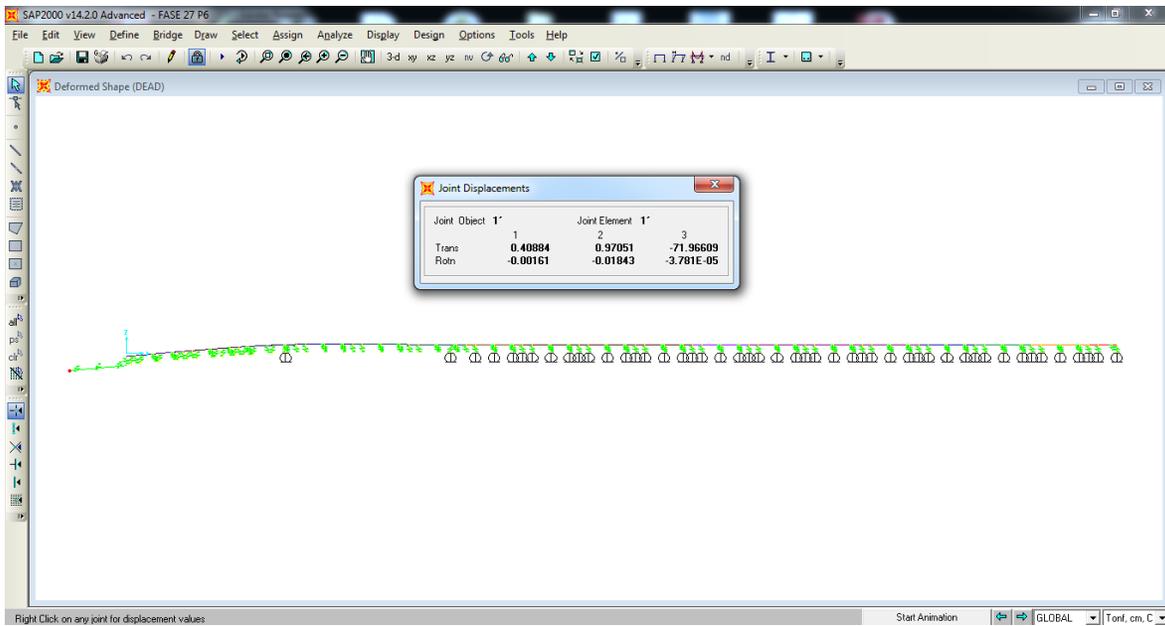
Se presentan las deformaciones máximas que sufrió la superestructura en cada etapa de construcción durante el empujado. También se incluyen las fuerzas de gateo teóricas que se necesita para recuperar la flecha producida por el empuje de la superestructura. Esta fuerza fue calculada en forma de iteraciones hasta lograr reducir la deflexión a cero.

La primer posición de la superestructura se dio en la fase 1 cuando la nariz aun no llega a la pila 7, por lo que se tiene una longitud de 32.5 m de volado; involucradas la NARIZ, la dovela TM2 IZQ y la dovela TM1 IZQ. De acuerdo con los resultados del análisis, la deflexión que se dio en la punta de la nariz es de **11.71 cm** (Figura 5.22).



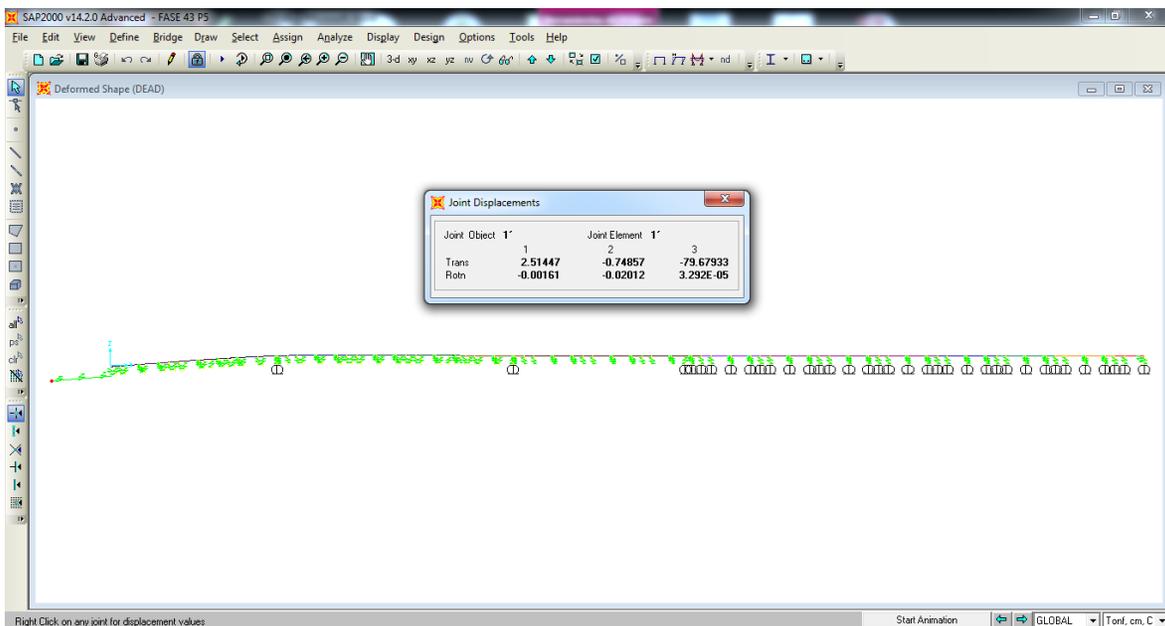
**Figura 5.22. Fase 1, deflexión**

La segunda posición de la estructura se dio en la fase 2 cuando la nariz aun no llega a la pila 6, por lo que se tiene una longitud de 45.75 m de volado; involucradas la NARIZ, la dovela TM2 IZQ, la dovela TM1 IZQ y la dovela TMDP. De acuerdo con los resultados del análisis, la deflexión que se dio en la punta de la nariz es de **71.97 cm** (Figura 5.23).



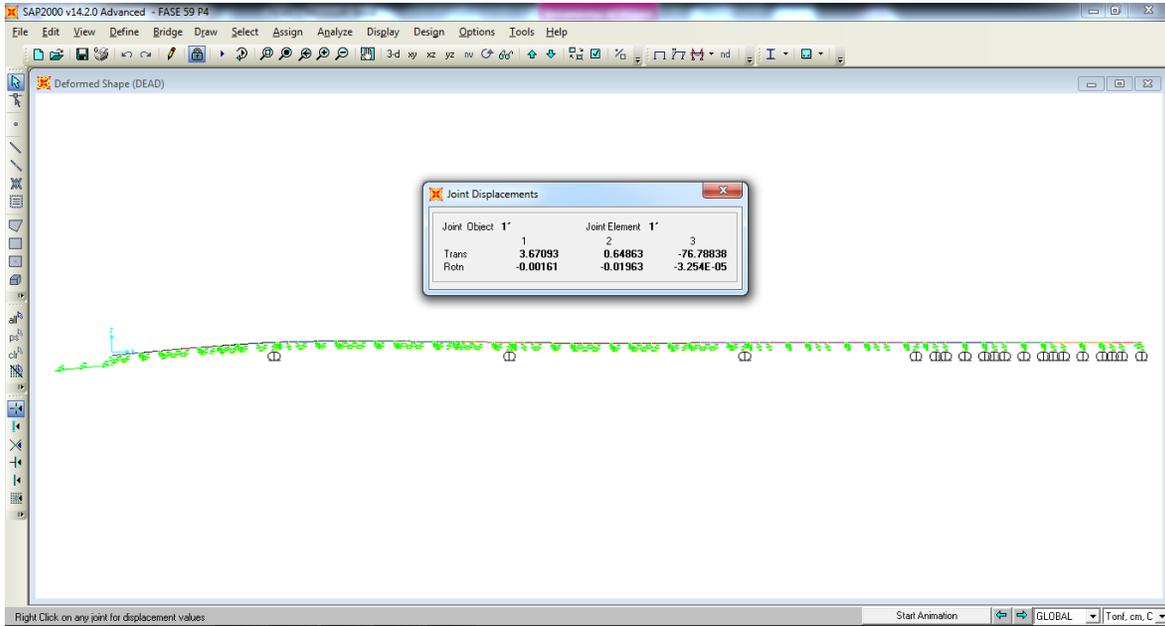
**Figura 5.23. Fase 2, deflexión**

La tercera posición de la estructura se dio en la fase 3 cuando la nariz aun no llega a la pila 5, por lo que se tiene una longitud de 45.75 m de vuelo; involucradas la NARIZ, la dovela TM2 IZQ, la dovela TM1 IZQ y la dovela TMDP. De acuerdo con los resultados del análisis, la deflexión que se dio en la punta de la nariz es de **79.68 cm** (Figura 5.24).



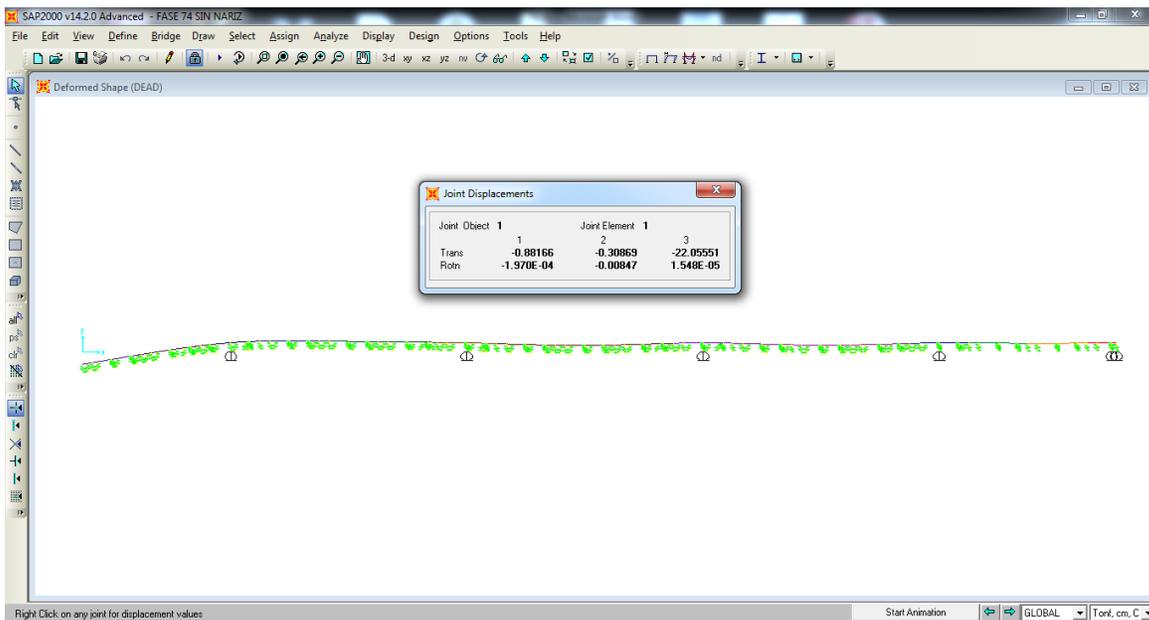
**Figura 5.24. Fase 3, deflexión**

La cuarta posición de la estructura se dio en la fase 4 cuando la nariz aun no llega al pilón 4, por lo que se tiene una longitud de 45 m de volado; involucradas la NARIZ, la dovela TM2 IZQ, la dovela TM1 IZQ y la dovela TMDP. De acuerdo con los resultados del análisis, la deflexión que se dio en la punta de la nariz es de **76.79 cm** (Figura 5.25).



**Figura 5.25. Fase 4 deflexión**

La quinta posición de la estructura se dio en la fase 5. En esta fase se realiza el empuje sin la nariz de lanzamiento, la cual ya fue desmontada al momento que cruzó completamente el pilón 4; se tiene una longitud de 30 m de volado, involucradas la dovela TM2 IZQ, TM1 IZQ y un tramo de la dovela TMDP. De acuerdo con los resultados del análisis, la deflexión que se dio en la punta de la dovela es de **22.05 cm** (Figura 5.26).



**Figura 5.26. Fase 5, deflexión**

Tabla 5.1. Deformación del tablero por etapa constructiva y fuerza de gateo teórica

| ETAPA | CLARO            | LONGITUD DE EMPUJE (m) | DESPLAZAMIENTOS VERTICALES (cm) | DESPLAZAMIENTO VERTICAL MÁXIMO (cm) | FUERZA TEÓRICA DE GATEO (ton) | FUERZA TEÓRICA DE GATEO TOTAL (ton) |
|-------|------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1     | 1                | 2                      | -0.0015                         | -11.709                             | 8.59                          | 17.19                               |
| 2     |                  | 6                      | -0.0558                         |                                     |                               |                                     |
| 3     |                  | 10                     | -0.2565                         |                                     |                               |                                     |
| 4     |                  | 12                     | -0.4085                         |                                     |                               |                                     |
| 5     |                  | 14                     | -0.6165                         |                                     |                               |                                     |
| 6     |                  | 18                     | -1.4686                         |                                     |                               |                                     |
| 7     |                  | 22                     | -2.5928                         |                                     |                               |                                     |
| 8     |                  | 24                     | -3.618                          |                                     |                               |                                     |
| 9     |                  | 26                     | -4.9892                         |                                     |                               |                                     |
| 10    |                  | 30                     | -8.7057                         |                                     |                               |                                     |
| 11    |                  | 32.5                   | -11.709                         |                                     |                               |                                     |
| 12    |                  | 35                     |                                 |                                     |                               |                                     |
| 13    | 2                | 38                     | 0.4046                          | -71.966                             | 14.80                         | 29.60                               |
| 14    |                  | 42                     | 0.7129                          |                                     |                               |                                     |
| 15    |                  | 46                     | 0.7549                          |                                     |                               |                                     |
| 16    |                  | 48                     | 0.704                           |                                     |                               |                                     |
| 17    |                  | 50                     | 0.5245                          |                                     |                               |                                     |
| 18    |                  | 54                     | -0.5182                         |                                     |                               |                                     |
| 19    |                  | 58                     | -2.7893                         |                                     |                               |                                     |
| 20    |                  | 60                     | -4.4905                         |                                     |                               |                                     |
| 21    |                  | 62                     | -6.701                          |                                     |                               |                                     |
| 22    |                  | 65                     | -13.1134                        |                                     |                               |                                     |
| 23    |                  | 69                     | -22.7615                        |                                     |                               |                                     |
| 24    |                  | 71                     | -29.281                         |                                     |                               |                                     |
| 25    |                  | 73                     | -36.8064                        |                                     |                               |                                     |
| 26    |                  | 77                     | -55.5783                        |                                     |                               |                                     |
| 27    |                  | 79.75                  | -71.9661                        |                                     |                               |                                     |
| 28    |                  | 82                     |                                 |                                     |                               |                                     |
| 29    | 3                | 85                     | 1.1174                          | -79.679                             | 13.95                         | 27.89                               |
| 30    |                  | 89                     | 2.2791                          |                                     |                               |                                     |
| 31    |                  | 93                     | 3.1408                          |                                     |                               |                                     |
| 32    |                  | 95                     | 3.4729                          |                                     |                               |                                     |
| 33    |                  | 97                     | 3.6107                          |                                     |                               |                                     |
| 34    |                  | 101                    | 3.018                           |                                     |                               |                                     |
| 35    |                  | 105                    | 0.8514                          |                                     |                               |                                     |
| 36    |                  | 107                    | -0.9878                         |                                     |                               |                                     |
| 37    |                  | 109                    | -3.4782                         |                                     |                               |                                     |
| 38    |                  | 114                    | -10.8229                        |                                     |                               |                                     |
| 39    |                  | 118                    | -22.0688                        |                                     |                               |                                     |
| 40    |                  | 120                    | -29.4331                        |                                     |                               |                                     |
| 41    |                  | 122                    | -38.1435                        |                                     |                               |                                     |
| 42    |                  | 126                    | -60.4014                        |                                     |                               |                                     |
| 43    |                  | 128.75                 | -79.6793                        |                                     |                               |                                     |
| 44    |                  | 131                    |                                 |                                     |                               |                                     |
| 45    | 4                | 134                    | 1.0295                          | -76.788                             | 13.82                         | 27.65                               |
| 46    |                  | 138                    | 2.0914                          |                                     |                               |                                     |
| 47    |                  | 142                    | 2.8528                          |                                     |                               |                                     |
| 48    |                  | 144                    | 3.1331                          |                                     |                               |                                     |
| 49    |                  | 146                    | 3.2139                          |                                     |                               |                                     |
| 50    |                  | 150                    | 2.4938                          |                                     |                               |                                     |
| 51    |                  | 154                    | 0.1628                          |                                     |                               |                                     |
| 52    |                  | 156                    | -1.7785                         |                                     |                               |                                     |
| 53    |                  | 158                    | -4.3698                         |                                     |                               |                                     |
| 54    |                  | 162                    | -11.981                         |                                     |                               |                                     |
| 55    |                  | 166                    | -23.5625                        |                                     |                               |                                     |
| 56    |                  | 168                    | -31.1613                        |                                     |                               |                                     |
| 57    |                  | 170                    | -40.1181                        |                                     |                               |                                     |
| 58    |                  | 174                    | -62.7518                        |                                     |                               |                                     |
| 59    |                  | 176                    | -76.7884                        |                                     |                               |                                     |
| 60    |                  | 179                    |                                 |                                     |                               |                                     |
| 61    | SE QUITA NARIZ   | 3                      | 1.0646                          |                                     |                               |                                     |
| 62    |                  | 7                      | 2.1663                          |                                     |                               |                                     |
| 63    |                  | 12                     | 3.1306                          |                                     |                               |                                     |
| 64    | EMPUJE SIN NARIZ | 0                      |                                 | -22.056                             | 10.98                         | 21.96                               |
| 65    |                  | 182                    | 0.9976                          |                                     |                               |                                     |
| 66    |                  | 186                    | 2.0994                          |                                     |                               |                                     |
| 67    |                  | 190                    | 2.5682                          |                                     |                               |                                     |
| 68    |                  | 192                    | 2.4284                          |                                     |                               |                                     |
| 69    |                  | 194                    | 1.9373                          |                                     |                               |                                     |
| 70    |                  | 198                    | -0.4279                         |                                     |                               |                                     |
| 71    |                  | 202                    | -5.2443                         |                                     |                               |                                     |
| 72    |                  | 204                    | -8.8214                         |                                     |                               |                                     |
| 73    |                  | 206                    | -13.317                         |                                     |                               |                                     |
| 74    |                  | 209                    | -22.0555                        |                                     |                               |                                     |

### 5.2.5. Control geométrico teórico

Se presenta el control geométrico teórico del puente, el cual solo comprende la fase de empujado.

Con el control geométrico podemos conocer el grado de deformación que se presenta en la superestructura durante la construcción. En la tabla 5.2 se presentan los desplazamientos verticales de los puntos de control mostrados en la figura 5.27, para cada fase, la cual fue a cada 6 m empezando desde la punta de la nariz de lanzamiento.

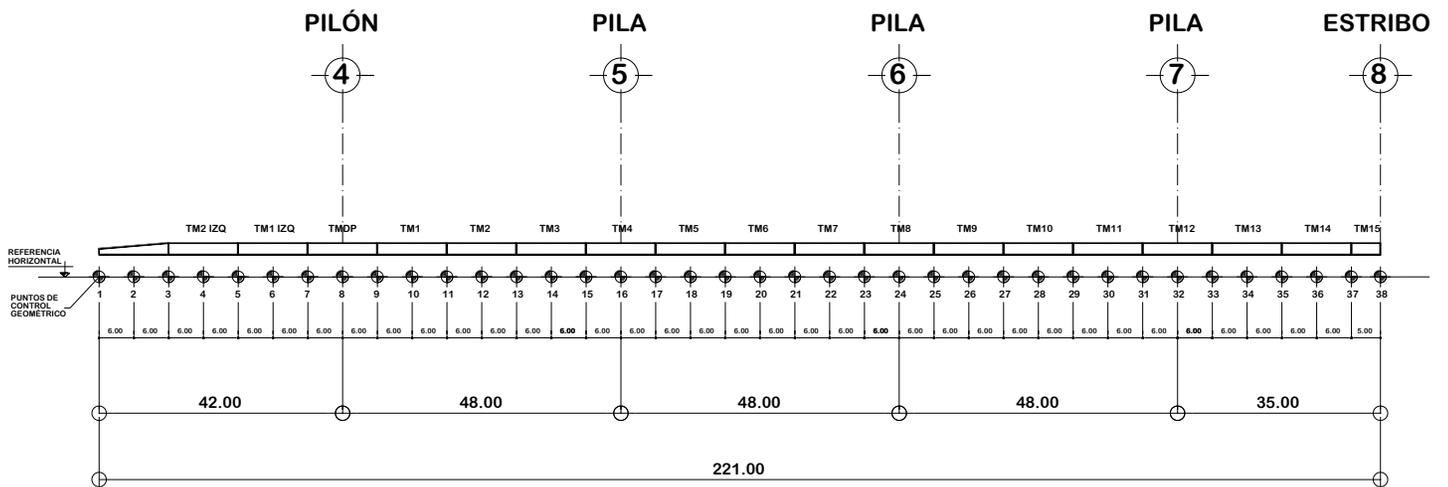


Figura 5.27. Puntos de control geométrico

Tabla 5.2. Control geométrico teórico

DESPLAZAMIENTO VERTICAL EN CENTÍMETROS

| ETAPA                           | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     | 19     | 20     | 21     | 22     | 23     | 24     | 25     | 26     | 27     | 28     | 29     | 30     | 31     | 32     | 33     | 34     | 35     | 36     | 37     |  |  |  |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|
| Empuje nariz                    | -0.056  |         |         |         |         |         |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje nariz                    | -0.409  | -0.162  |         |         |         |         |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 2 izq.            | -1.469  | -0.862  | -0.339  |         |         |         |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 2 izq.            | -3.618  | -2.473  | -1.413  | -0.537  |         |         |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 1 izq.            | -8.706  | -6.519  | -4.417  | -2.499  | -0.921  |         |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 1 izq. a 32.5m    | -11.709 | -8.986  | -6.347  | -3.892  | -1.776  | -0.319  |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| FUERZA DE GATEO, 17.19Ton       | 0.000   | -0.666  | -0.916  | -0.809  | -0.482  | -0.106  |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela de pila           | 0.667   | 0.000   | -0.678  | -1.059  | -1.086  | -0.785  | -0.315  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela de pila           | 0.736   | 0.410   | 0.000   | -0.558  | -0.939  | -0.999  | -0.743  | -0.306 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 1 der.            | -0.174  | 0.002   | 0.093   | 0.000   | -0.381  | -0.732  | -0.847  | -0.665 | -0.277 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 1 der.            | -3.588  | -2.451  | -1.398  | -0.529  | 0.000   | -0.074  | -0.342  | -0.513 | -0.444 | -0.196 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 2 der.            | -11.240 | -8.547  | -5.938  | -3.513  | -1.428  | 0.000   | 0.412   | 0.294  | 0.061  | -0.080 | -0.069 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 2 der.            | -25.930 | -20.845 | -15.845 | -11.028 | -6.551  | -2.732  | 0.000   | 1.126  | 1.271  | 0.941  | 0.493  | 0.145  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 3 der.            | -50.043 | -41.662 | -33.364 | -25.252 | -17.478 | -10.362 | -4.334  | 0.000  | 2.003  | 2.410  | 1.923  | 1.086  | 0.335  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 3 der. a 45.75m   | -71.966 | -60.910 | -49.938 | -39.150 | -28.701 | -18.911 | -10.207 | -3.199 | 0.000  | 3.120  | 3.223  | 2.358  | 1.178  | 0.235  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| FUERZA DE GATEO, 29.59Ton       | 0.000   | -1.984  | -3.193  | -3.651  | -3.487  | -2.764  | -1.677  | -0.541 | 0.000  | 0.183  | -0.008 | -0.169 | -0.177 | -0.057 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 4 der.            | 2.021   | 0.000   | -1.999  | -3.494  | -4.336  | -4.423  | -3.800  | -2.619 | -1.184 | 0.000  | 0.358  | 0.260  | 0.040  | -0.091 | -0.072 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 4 der.            | 3.321   | 1.703   | 0.000   | -1.840  | -3.347  | -4.241  | -4.399  | -3.814 | -2.630 | -1.194 | 0.000  | 0.349  | 0.236  | 0.013  | -0.111 | -0.081 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 5 der.            | 3.297   | 2.315   | 1.250   | 0.000   | -1.527  | -2.894  | -3.770  | -3.966 | -3.447 | -2.376 | -1.067 | 0.000  | 0.263  | 0.117  | -0.094 | -0.183 | -0.106 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 5 der.            | 0.003   | 0.242   | 0.397   | 0.368   | 0.000   | -0.966  | -2.026  | -2.791 | -3.019 | -2.670 | -1.856 | -0.828 | 0.000  | 0.129  | -0.058 | -0.249 | -0.280 | -0.141 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 6 der.            | -8.663  | -6.485  | -4.391  | -2.482  | -0.912  | 0.000   | -0.101  | -0.674 | -1.252 | -1.570 | -1.512 | -1.094 | -0.479 | 0.000  | -0.062 | -0.314 | -0.480 | -0.433 | -0.198 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 6 der.            | -25.563 | -20.539 | -15.600 | -10.845 | -6.429  | -2.671  | 0.000   | 1.065  | 1.157  | 0.789  | 0.326  | -0.004 | -0.104 | -0.034 | 0.000  | -0.298 | -0.618 | -0.738 | -0.581 | -0.242 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 7 der.            | -54.105 | -45.143 | -36.266 | -27.572 | -19.219 | -11.523 | -4.914  | 0.000  | 2.580  | 3.501  | 3.405  | 2.764  | 1.937  | 1.164  | 0.538  | 0.000  | -0.610 | -1.032 | -1.097 | -0.806 | -0.321 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 7 der. a 45.75m   | -79.679 | -67.611 | -55.628 | -43.828 | -32.368 | -21.566 | -11.851 | -3.831 | 0.000  | 4.480  | 5.418  | 5.125  | 4.129  | 2.868  | 1.636  | 0.574  | 0.000  | -1.065 | -1.377 | -1.227 | -0.731 | -0.167 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| FUERZA DE GATEO, 27.89Ton       | 0.000   | -1.777  | -2.827  | -3.181  | -2.969  | -2.267  | -1.285  | -0.354 | 0.000  | -0.379 | -1.003 | -1.515 | -1.695 | -1.474 | -0.928 | -0.288 | 0.000  | -0.102 | -0.338 | -0.434 | -0.318 | -0.084 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 8 der.            | 1.856   | 0.000   | -1.838  | -3.194  | -3.929  | -3.953  | -3.326  | -2.212 | -0.931 | 0.000  | -0.005 | -0.504 | -1.079 | -1.435 | -1.425 | -1.051 | -0.466 | 0.000  | -0.077 | -0.343 | -0.508 | -0.448 | -0.200 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 8 der.            | 3.006   | 1.545   | 0.000   | -1.683  | -3.051  | -3.835  | -3.928  | -3.335 | -2.218 | -0.937 | 0.000  | -0.024 | -0.551 | -1.141 | -1.498 | -1.478 | -1.086 | -0.481 | 0.000  | -0.071 | -0.333 | -0.501 | -0.450 | -0.203 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 9 der.            | 2.802   | 1.986   | 1.085   | 0.000   | -1.364  | -2.583  | -3.342  | -3.468 | -2.941 | -1.938 | -0.792 | 0.000  | -0.140 | -0.733 | -1.342 | -1.686 | -1.631 | -1.185 | -0.521 | 0.000  | -0.052 | -0.318 | -0.506 | -0.463 | -0.206 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 9 der.            | -0.737  | -0.312  | 0.028   | 0.184   | 0.000   | -0.782  | -1.676  | -2.308 | -2.456 | -2.096 | -1.357 | -0.513 | 0.000  | -0.330 | -1.024 | -1.669 | -1.998 | -1.881 | -1.341 | -0.590 | 0.000  | -0.020 | -0.279 | -0.472 | -0.431 | -0.192 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 10 der.           | -9.744  | -7.350  | -5.040  | -2.914  | -1.128  | 0.000   | 0.115   | -0.264 | -0.687 | -0.909 | -0.834 | -0.435 | -0.108 | 0.000  | -0.597 | -1.442 | -2.144 | -2.444 | -2.229 | -1.568 | -0.693 | 0.000  | 0.053  | -0.189 | -0.393 | -0.383 | -0.176 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 10 der.           | -27.203 | -21.906 | -16.693 | -11.665 | -6.976  | -2.944  | 0.000   | 1.337  | 1.676  | 1.506  | 1.167  | 0.857  | 0.641  | 0.433  | 0.000  | -0.970 | -2.034 | -2.818 | -3.083 | -2.757 | -1.936 | -0.878 | 0.000  | 0.135  | -0.098 | -0.318 | -0.338 | -0.161 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 11 der.           | -56.445 | -47.149 | -37.937 | -28.909 | -20.221 | -12.191 | -5.248  | 0.000  | 2.912  | 4.136  | 4.284  | 3.792  | 2.985  | 2.068  | 1.104  | 0.000  | -1.421 | -2.743 | -3.610 | -3.825 | -3.356 | -2.332 | -1.046 | 0.000  | 0.190  | -0.038 | -0.279 | -0.328 | -0.169 |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 11 der. a 45.00m  | -76.788 | -65.015 | -53.326 | -41.822 | -30.657 | -20.150 | -10.729 | -3.005 | 0.000  | 4.913  | 5.887  | 5.698  | 4.803  | 3.562  | 2.192  | 0.760  | 0.000  | -2.467 | -3.688 | -4.249 | -4.058 | -3.184 | -1.861 | -0.498 | 0.000  | 0.174  | -0.088 | -0.260 | -0.223 | -0.049 |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| FUERZA DE GATEO, 27.65Ton       | 0.000   | -1.741  | -2.763  | -3.097  | -2.872  | -2.168  | -1.196  | -0.289 | 0.000  | -0.282 | -0.759 | -1.103 | -1.142 | -0.863 | -0.395 | -0.023 | 0.000  | -0.972 | -1.804 | -2.351 | -2.422 | -1.987 | -1.179 | -0.304 | 0.000  | -0.107 | -0.376 | -0.472 | -0.326 | -0.065 |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 12 der.           | 1.922   | 0.000   | -1.902  | -3.314  | -4.091  | -4.141  | -3.515  | -2.375 | -1.032 | 0.000  | 0.140  | -0.194 | -0.616 | -0.859 | -0.807 | -0.494 | -0.101 | 0.000  | -0.646 | -1.559 | -2.314 | -2.648 | -2.462 | -1.769 | -0.788 | 0.000  | 0.059  | -0.198 | -0.405 | -0.392 | -0.179 |        |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 12 der.           | 3.131   | 1.607   | 0.000   | -1.745  | -3.168  | -3.996  | -4.115  | -3.525 | -2.382 | -1.038 | 0.000  | 0.124  | -0.235 | -0.667 | -0.906 | -0.840 | -0.505 | -0.099 | 0.000  | -0.659 | -1.592 | -2.376 | -2.751 | -2.558 | -1.816 | -0.640 | 0.000  | 0.062  | -0.192 | -0.401 | -0.390 | -0.180 |        |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 13 der. Sin nariz |         |         | 1.867   | 0.000   | -1.889  | -3.410  | -4.291  | -4.392 | -3.725 | -2.501 | -1.082 | 0.000  | 0.135  | -0.218 | -0.644 | -0.881 | -0.815 | -0.481 | -0.080 | 0.000  | -0.677 | -1.638 | -2.459 | -2.830 | -2.591 | -1.823 | -0.802 | 0.000  | 0.061  | -0.199 | -0.410 | -0.398 | -0.182 |        |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 13 der. Sin nariz |         |         | 2.537   | 1.303   | 0.000   | -1.528  | -2.851  | -3.648 | -3.747 | -3.178 | -2.120 | -0.898 | 0.000  | 0.009  | -0.411 | -0.860 | -1.085 | -0.977 | -0.581 | -0.126 | 0.000  | -0.656 | -1.612 | -2.425 | -2.771 | -2.530 | -1.777 | -0.781 | 0.000  | 0.045  | -0.219 | -0.426 | -0.405 | -0.184 |        |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 14 der. Sin nariz |         |         | 0.364   | 0.380   | 0.327   | 0.000   | -0.862  | -1.795 | -2.424 | -2.575 | -2.223 | -1.474 | -0.588 | 0.000  | -0.197 | -0.735 | -1.229 | -1.437 | -1.259 | -0.773 | -0.218 | 0.000  | -0.574 | -1.491 | -2.285 | -2.638 | -2.423 | -1.706 | -0.747 | 0.000  | 0.030  | -0.239 | -0.440 | -0.412 | -0.186 |        |        |  |  |  |
| Empuje dovela 14 der. Sin nariz |         |         | -6.925  | -4.856  | -2.857  | -1.130  | 0.000   | 0.126  | -0.222 | -0.647 | -0.897 | -0.856 | -0.545 | -0.149 | 0.000  | -0.504 | -1.224 | -1.795 | -1.984 | -1.724 | -1.107 | -0.393 | 0.000  | -0.495 | -1.398 | -2.194 | -2.560 | -2.364 | -1.671 | -0.735 | 0.000  | 0.022  | -0.242 | -0.441 | -0.412 | -0.186 |        |  |  |  |
| Empuje dovela 15 der. Sin nariz |         |         | -22.056 | -16.971 | -11.955 | -7.213  | -3.067  | 0.000  | 1.455  | 1.850  | 1.685  | 1.306  | 0.936  | 0.660  | 0.419  | 0.000  | -0.887 | -1.837 | -2.494 | -2.655 | -2.277 | -1.482 | -0.553 | 0.000  | -0.431 | -1.299 | -2.081 | -2.451 | -2.274 | -1.607 | -0.701 | 0.000  | -0.002 | -0.293 | -0.508 | -0.480 | -0.127 |  |  |  |

## CAPÍTULO 6

### REVISIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PRINCIPALES

#### 6.1. NORMA AASHTO LRFD 2012

Las especificaciones AASHTO LRFD 2012 para diseño de puentes, están destinados a ser usados en el diseño, evaluación, rehabilitación de puentes y están bajo el mandato de la Administración Federal de Carreteras para su uso en todos los puentes que utilizan los fondos federales.

Estas especificaciones emplean la metodología de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD), utilizando factores de desarrollo del conocimiento estadístico actual de las cargas y desempeño estructural.

##### 6.1.1. Filosofía de diseño por Factores de Carga y Resistencia

Es un procedimiento de diseño probabilístico, donde se toma en cuenta la variabilidad, tanto de las cargas como del comportamiento de los elementos estructurales de manera explícita.

Los puentes se deben diseñar considerando los estados límites especificados a fin de lograr los objetivos de constructibilidad, seguridad y serviciabilidad, considerando los aspectos relacionados con la inspeccionabilidad, economía y estética.

El principio de la filosofía de Diseño por Factores de Carga y Resistencia se puede resumir con la siguiente expresión:

$$\eta \cdot \Sigma \gamma_i \cdot Q_i \leq \phi R_n = R_r$$

donde:

$Q_i$  = Efecto de las cargas.

$R_n$  = Resistencia nominal.

$R_r$  = Resistencia mayorada.

$\eta$  = Factor de modificación de carga.

$\gamma_i$  = Factor de carga.

$\phi$  = Factor de reducción de resistencia.

Los factores de carga y resistencia se calibran por ensayos de diseño para proporcionar un nivel de seguridad alto y uniforme en puentes nuevos. El nivel de seguridad se expresa por un índice de confiabilidad ( $\beta$ ) de aproximadamente  $\beta = 3.5$ , para los diferentes tipos y configuraciones de puentes. Este índice asegura una probabilidad de excedencia de que 2 de 10000 elementos o componentes diseñados se cargarían excesivamente y experimentarían un problema en algún momento durante el tiempo de vida de la estructura.

##### 6.1.2. Constructibilidad

Las cuestiones de constructibilidad (AASHTO 6.10.3) deben incluir, pero no estar limitado a, la deflexión, resistencia del acero y concreto, y la estabilidad durante las etapas críticas de construcción.

Los puentes deben ser diseñados de tal manera que no se dificulte su fabricación, montaje y que los efectos de construcción estén dentro de los límites tolerables.

Se revisan las traveses maestras que son los elementos principales del puente; con la norma AASHTO LRFD 2012 se pueden revisar los siguientes apartados:

- CONSTRUCTIBILIDAD
- ESTADO LÍMITE DE SERVICIO
- ESTADOS LÍMITE DE FATIGA Y FRACTURA
- ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

Debido a que solo se modeló la parte empujada del puente y que se requiere solo revisar las diferentes etapas de construcción, solo se revisa la superestructura por *Constructibilidad*, ya que para los otros puntos se requiere modelar el puente completo y obtener las cargas correspondientes a carga viva.

### 6.1.3. Factor de carga para construcción

Las combinaciones de carga I, III y IV (AASHTO 3.4.1) de la tabla 3.4.1-1 de la normativa AASHTO LRFD 2012 durante la etapa constructiva, el factor de ocupación para el peso de la estructura y sus accesorios, DC y DW, no serán inferior a 1.25. A menos que se especifique lo contrario por el propietario.

De acuerdo con efectos dinámicos el factor de carga de construcción no será inferior a 1.5 de acuerdo a la combinación I (AASHTO 3.4.1).

De acuerdo con efectos de viento el factor de carga de construcción en la combinación III (AASHTO 3.4.1) no deberá ser inferior a 1.25.  
(Tabla 6.3)

**Tabla 6.1. Combinaciones de carga y factores de carga AASHTO LRFD 2012 (tabla 3.4.1-1)**

| Load Combination<br>Limit State    | DC<br>DD<br>DW<br>EH<br>EV<br>ES<br>EL<br>PS<br>CR<br>SH | LL<br>IM<br>CE<br>BR<br>PL<br>LS | WA   | WS       | WL  | FR   | TU        | TG            | SE            | Use One of These at a Time |      |      |      |      |
|------------------------------------|--|----------------------------------|------|----------|-----|------|-----------|---------------|---------------|----------------------------|------|------|------|------|
|                                    |  |                                  |      |          |     |      |           |               |               | EQ                         | BL   | IC   | CT   | CV   |
| Strength I<br>(unless noted)       | $\gamma_p$   | 1.75                             | 1.00 | —        | —   | 1.00 | 0.50/1.20 | $\gamma_{TG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Strength II                        | $\gamma_p$   | 1.35                             | 1.00 | —        | —   | 1.00 | 0.50/1.20 | $\gamma_{TG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Strength III                       | $\gamma_p$   | —                                | 1.00 | 1.4<br>0 | —   | 1.00 | 0.50/1.20 | $\gamma_{TG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Strength IV                        | $\gamma_p$   | —                                | 1.00 | —        | —   | 1.00 | 0.50/1.20 | —             | —             | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Strength V                         | $\gamma_p$   | 1.35                             | 1.00 | 0.4<br>0 | 1.0 | 1.00 | 0.50/1.20 | $\gamma_{TG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Extreme<br>Event I                 | $\gamma_p$   | $\gamma_{EQ}$                    | 1.00 | —        | —   | 1.00 | —         | —             | —             | 1.00                       | —    | —    | —    | —    |
| Extreme<br>Event II                | $\gamma_p$   | 0.50                             | 1.00 | —        | —   | 1.00 | —         | —             | —             | —                          | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Service I                          | 1.00   | 1.00                             | 1.00 | 0.3<br>0 | 1.0 | 1.00 | 1.00/1.20 | $\gamma_{TG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Service II                         | 1.00   | 1.30                             | 1.00 | —        | —   | 1.00 | 1.00/1.20 | —             | —             | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Service III                        | 1.00   | 0.80                             | 1.00 | —        | —   | 1.00 | 1.00/1.20 | $\gamma_{TG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Service IV                         | 1.00   | —                                | 1.00 | 0.7<br>0 | —   | 1.00 | 1.00/1.20 | —             | 1.0           | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Fatigue I—<br>LL, IM & CE<br>only  | —  | 1.50                             | —    | —        | —   | —    | —         | —             | —             | —                          | —    | —    | —    | —    |
| Fatigue II—<br>LL, IM & CE<br>only | —  | 0.75                             | —    | —        | —   | —    | —         | —             | —             | —                          | —    | —    | —    | —    |

## 6.2. MEMORIA DE CÁLCULO

De acuerdo con el análisis en el programa SAP2000 se obtuvieron los siguientes elementos mecánicos máximos con los que se revisaron cada una de las dovelas de acuerdo a su etapa de construcción.

Tabla 6.2. Elementos mecánicos máximos de la fase en volado

| MOMENTOS Y CORTANTES MÁXIMOS DE DOVELAS APOYADAS Y EN VOLADIZO |        |                        |                            |                            |                             |                             |
|--|--------|------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ETAPA  | CLARO  | LONGITUD DEL CLARO (m) | MOMENTO MÁX NEGATIVO (t*m) | MOMENTO MÁX POSITIVO (t*m) | CORTANTE MÁX NEGATIVO (ton) | CORTANTE MÁX POSITIVO (ton) |
| 11   | 1      | 32.5                   | -405.18                    | 0.00                       | 0.00                        | 30.33                       |
| 27   | 2      | 45.75                  | -923.89                    | 0.00                       | -53.59                      | 49.83                       |
|  | 1      | 35                     | -923.89                    | 217.00                     | -53.59                      | 49.83                       |
| 43   | 3      | 45.75                  | -923.89                    | 0.00                       | -48.25                      | 49.83                       |
|  | 2      | 48                     | -923.89                    | 51.54                      | -48.25                      | 8.02                        |
|  | 1      | 35                     | -156.04                    | 115.14                     | -15.39                      | 24.54                       |
| 59   | 4      | 45                     | -886.76                    | 0.00                       | -45.37                      | 49.16                       |
|  | 3      | 48                     | -886.76                    | 0.00                       | -45.37                      | 11.11                       |
|  | 2      | 48                     | -70.73                     | 185.63                     | -24.43                      | 29.60                       |
|  | 1      | 35                     | -208.52                    | 42.51                      | -23.22                      | 14.21                       |
| 74   | VOLADO | 30                     | -518.73                    | 0.00                       | -35.49                      | 34.54                       |
|  | 4      | 48                     | -518.73                    | 26.02                      | -35.49                      | 19.32                       |
|  | 3      | 48                     | -149.37                    | 133.65                     | -24.51                      | 26.95                       |
|  | 2      | 48                     | -225.15                    | 109.25                     | -25.53                      | 23.09                       |
|  | 1      | 35                     | -164.26                    | 52.54                      | -20.32                      | 16.05                       |

En esta tabla se presentan los elementos mecánicos máximos de las etapas de construcción más críticas, estos resultados se presentan en cada etapa de construcción del puente antes de llegar a la pila, por lo que se tiene un volado y posteriormente se va realizando el empuje de las demás dovelas, entonces van quedando apoyadas en las pilas por lo tanto se presentan distintos resultados en cada volado de cada pila hasta llegar al último empuje donde quedan dos dovelas en volado para iniciar la fase de construcción por medio de tirantes.

Tabla 6.3. Elementos mecánicos máximos de la fase apoyada

| MOMENTOS Y CORTANTES MÁXIMOS EN DOVELAS APOYADAS |             |                        |                            |                            |                             |                             |
|--|-------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ETAPA  | CLARO       | LONGITUD DEL CLARO (m) | MOMENTO MÁX NEGATIVO (t*m) | MOMENTO MÁX POSITIVO (t*m) | CORTANTE MÁX NEGATIVO (ton) | CORTANTE MÁX POSITIVO (ton) |
| 12   | 1           | 35                     | -149.26                    | 83.23                      | -9.57                       | 23.91                       |
| 28   | 2           | 48                     | -272.75                    | 196.09                     | -27.43                      | 36.71                       |
|  | 1           | 35                     | -272.75                    | 41.44                      | -27.43                      | 14.00                       |
| 44   | 3           | 48                     | -307.30                    | 181.28                     | -31.38                      | 37.43                       |
|  | 2           | 48                     | -306.97                    | 105.78                     | -31.38                      | 25.33                       |
|  | 1           | 35                     | -163.14                    | 57.40                      | -22.30                      | 17.29                       |
| 60   | 4           | 48                     | -293.47                    | 186.99                     | -29.99                      | 37.15                       |
|  | 3           | 48                     | -293.47                    | 83.44                      | -29.99                      | 26.71                       |
|  | 2           | 48                     | -215.65                    | 129.29                     | -27.85                      | 25.67                       |
|  | 1           | 35                     | -169.87                    | 48.93                      | -21.63                      | 15.97                       |
| 64   | 4 SIN NARIZ | 48                     | -301.96                    | 237.50                     | -29.92                      | 37.49                       |
|  | 3 SIN NARIZ | 48                     | -301.96                    | 83.63                      | -29.92                      | 25.84                       |
|  | 2 SIN NARIZ | 48                     | -211.07                    | 125.98                     | -27.50                      | 25.34                       |
|  | 1 SIN NARIZ | 35                     | -174.51                    | 46.51                      | -21.71                      | 16.27                       |

En esta tabla se presentan los elementos mecánicos máximos de las etapas de construcción críticas, en este caso se presentan los elementos mecánicos de las dovelas en su posición de apoyado, ya que cuando se aplica la fuerza de gateo correspondiente para recuperar la flecha antes de cada pila, quedan totalmente apoyadas por lo que presentan distintos resultados.

Cabe señalar que en el momento de las fases en volado, las travesaños maestras presentan el patín superior a tensión y el patín inferior a compresión; pero al momento de revisar las travesaños maestras totalmente apoyadas (sin volado) la forma de trabajar de los patines se invierte, por lo que es un dato importante a la hora de hacer la revisión por constructibilidad con la norma AASHTO LRFD 2012.

### 6.2.1. Resumen de momentos y cortantes

Se presenta un resumen por medio de una gráfica (figura 6.1 y figura 6.2) de los elementos mecánicos máximos (momentos y cortantes) en cada fase de empujado, en donde se divide el tramo empujado en 5 diferentes secciones de acuerdo con el cambio del espesor de patín que presentan las dovelas.

Se observa el intervalo de valores de momento y cortante a los que estarán sometidos durante el inicio y final del empujado de cada una de las dovelas, de acuerdo con los valores en cada etapa de empujado de los elementos mecánicos, se realizan las revisiones de diseño de acuerdo con la normativa AASHTO LRFD 2012 por *constructibilidad*. Donde “S” se refiere a cada una de las secciones en las que se divide la superestructura de acuerdo con su espesor de patín.

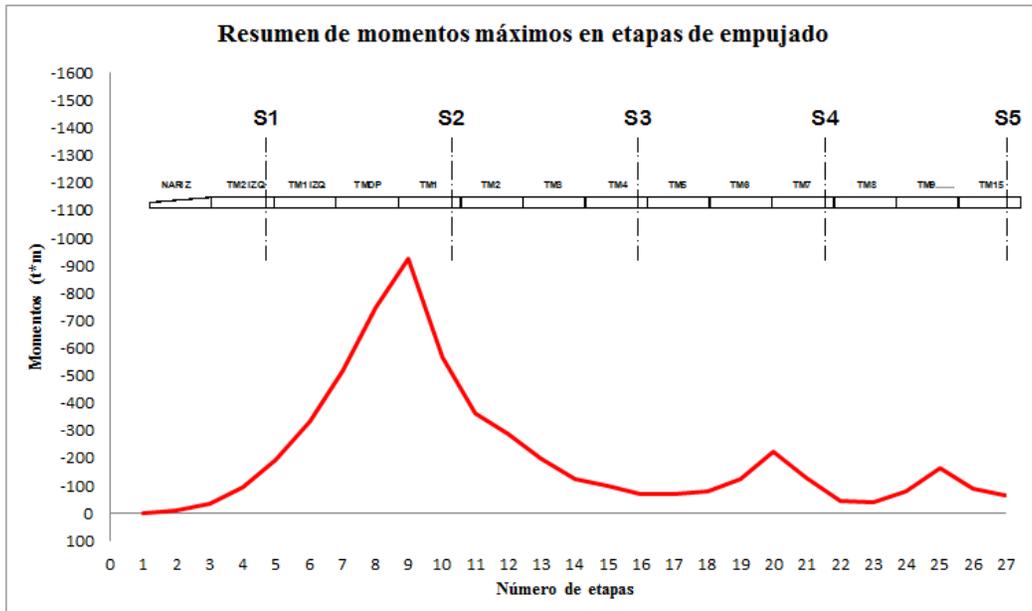


Figura 6.1. Resumen de momentos

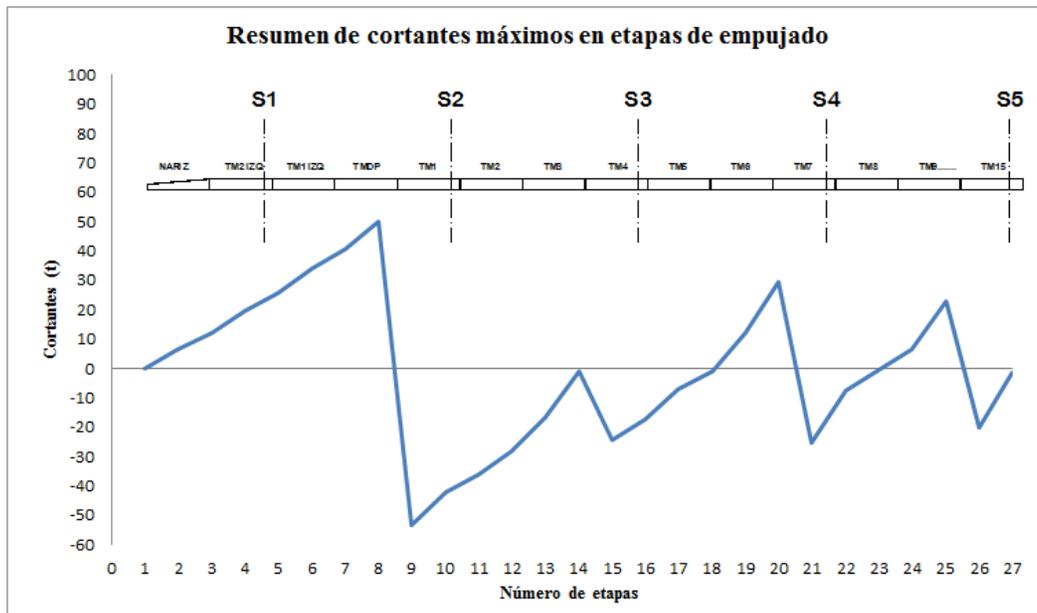


Figura 6.2. Resumen de cortantes

Se presenta una memoria de cálculo de una de las dovelas del tramo empujado del puente ante los elementos mecánicos máximos obtenidos en el análisis por etapas constructivas del puente. Las demás revisiones se encontrarán en el apartado apéndice.

6.2.2. TM2 IZQ

Se presenta la revisión de los elementos estructurales en la etapa de construcción en volado.

**TM2 IZQ, M = -923.89t\*m = -80190.12k-in, V = 49.83t = 109.86kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO                                  |              |                 |  |             |  |
|---|--------------|-----------------|--|-------------|--|
| Variable/Fórmula                                    | Valor        | Unidades        | Comentarios  | Pág. AASHTO |  |
| <b>REVISIÓN TM2 IZQ VOLADO</b>                      |              |                 |  |             |  |
| AASHTO LRFD 2012                                    |              |                 |  |             |  |
| Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]    |              |                 |  |             |  |
|   |              |                 |  |             |  |
| <b>*General</b>                                     |              |                 |  |             |  |
| Región a momento [Positivo / Negativo]              |              |                 |  |             |  |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]          | No-compuesta |                 |  |             |  |
| <b>*Geometría</b>                                   |              |                 |  |             |  |
| tw =  | 0.75         | in              | Espesor del alma   |             |  |
| bfc =   | 24.0         | in              | Ancho completo del patín a compresión  |             |  |
| tfc =   | 1.75         | in              | Espesor del patín a compresión   |             |  |
| bft =   | 16.0         | in              | Ancho completo del patín a tensión   |             |  |
| tft =   | 1.75         | in              | Espesor del patín a tensión  |             |  |
| D =   | 72.1         | in              | Altura del alma  |             |  |
| DT =  | 75.6         | in              | Altura completa del perfil   |             |  |
| <b>*Propiedades geométricas</b>                     |              |                 |  |             |  |
| At =  | 123.89       | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |             |  |
| Ix =  | 116478.13    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |             |  |
| Iy =  | 2618.06      | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |             |  |
| rx =  | 30.66        | in              | Radio de giro en el eje x  |             |  |
| ry =  | 4.60         | in              | Radio de giro en el eje y  |             |  |
| Sxsup =   | 2775.81      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |             |  |
| Sxinf =   | 3467.70      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |             |  |
| Sysup =   | 218.03       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |             |  |
| Syinf =   | 218.03       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |             |  |
| Zx =  | 3540.56      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |             |  |
| Zy =  | 372.83       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |             |  |
| J =   | 81.75        | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |             |  |
| Ca =  | 2505214.72   | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |             |  |
| <b>*Propiedades del material</b>                    |              |                 |  |             |  |
| E =   | 29000.0      | ksi             | Módulo de Young del acero  |             |  |
| Fyf =   | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |             |  |
| Fyw =   | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |             |  |
| Fyc =   | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |             |  |
| Fyt =   | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |             |  |
| Fyr =   | 35.0         | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |             |  |
| nota: Fyr = min ( 0.7Fyc, Fyw), Fyr ≥ 0.5Fyc        |              |                 |  |             |  |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>            |              |                 |  |             |  |
| Mu =  | -80190.12    | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |             |  |
| Vu =  | 109.86       | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |             |  |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>    |              |                 |  |             |  |
| DC = FC   | 1.25         | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         | 3 – 18      |  |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>  |              |                 |  |             |  |
| φf =  | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   | 6 – 41      |  |
| φv =  | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |             |  |
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>                        |              |                 |  |             |  |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{Sx_{sup}} \right) =$ | -36.11       | ksi             | Esfuerzo en el patín a tensión   |             |  |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{Sx_{inf}} \right) =$ | -28.91       | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión  |             |  |

|  |   |        |        |       |   |         |
|--|---|--------|--------|-------|---|---------|
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>   |   |        |        |       | 6 – 132   |         |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>                                 |   |        |        |       | 6 – 132   |         |
| <u>Revisión 1</u>  |   |        |        |       |   |         |
| $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyc$  |   |        | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  | 6 – 132 |
| $fl \leq 0.6fyt$   |   |        |        |       |   |         |
| fl =   |   |        | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| Rh =   |   |        | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124 |
| Por lo tanto   |   |        |        |       |   |         |
| $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyc$  |   |        |        |       |   |         |
| -28.91   | < | 50     | OK     | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <u>Revisión 2</u>  |   |        |        |       |   |         |
| $fbu + \frac{1}{3}fl \leq \phi f Fnc$  |   |        | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |         |
| Cálculo de Fnc   |   |        | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión   | 6 – 154 |
| $Si \lambda f \leq \lambda pf$   |   |        | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  | 6 – 154 |
| $\lambda f = \frac{bfc}{2tfc} =$   |   |        | 6.86   | [ - ] |   |         |
| $\lambda pf = 0.38 \sqrt{\frac{E}{Fyc}} =$   |   |        | 9.15   | [ - ] |   |         |
| 6.86   | < | 9.15   | OK     |       | CUMPLE  |         |
| Se usara Fnc = Rb Rh Fyc   |   |        |        |       |   |         |
| Rb =   |   |        | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 125 |
| $Si \frac{D}{tw} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} \text{ ó } \frac{2Dc}{tw} \leq \lambda rw \text{ se usara } Rb = 1.0$ |   |        |        |       |   |         |
| Cálculo de Dc  |   |        | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   | 6 – 328 |
| $Dc = \left( \frac{-fc}{ fc  + ft} \right) d - tfc =$  |   |        | -32.81 | in    |   |         |
| Cálculo de K   |   |        | [ - ]  | [ - ] | Coeficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]   | 6 – 121 |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{Dc}{D} \right)^2} \right) =$   |   |        | 43.40  | [ - ] |   |         |
| Cálculo de λrw   |   |        | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   | 6 – 126 |
| $\lambda rw = 5.7 \sqrt{\frac{E}{Fyc}} =$  |   |        | 137.27 | [ - ] |   |         |
| Se revisan las condiciones   |   |        |        |       |   |         |
| $\frac{D}{tw} =$   |   |        | 96.33  | [ - ] |   |         |
| $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$   |   |        | 150.72 | [ - ] |   |         |
| 96.33  | < | 150.72 | OK     |       | CUMPLE  |         |

|   |  |        |    |         |       |   |         |
|---|--|--------|----|---------|-------|---|---------|
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 87.73   | [ - ] |   |         |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27  | [ - ] |   |         |
| 87.73   | <  | 137.27 | OK |         |       | CUMPLE  |         |
| Se usara Rb =   |  |        |    | 1.0     | [ - ] |   |         |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |         |       |   |         |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50      | ksi   |   |         |
| Por lo tanto  |  |        |    |         |       |   |         |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |         |       |   |         |
| -28.91  | <  | 50     | OK |         | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |         |       |   |         |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [ - ]   | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma   | 6 – 132 |
| Calculo de Fcrw   |  |        |    | [ - ]   | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ]  | 6 – 121 |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 122.08  | ksi   |   |         |
| Por lo tanto  |  |        |    |         |       |   |         |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |         |       |   |         |
| -28.91  | <  | 122.08 | OK |         | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |         |       |   | 6 – 134 |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [ - ]   | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el limite elástico mínimo especificado   | 6 – 134 |
| fl =  |  |        |    | 0.0     | ksi   | Esfuerzo por flexion lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0     | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124 |
| Por lo tanto  |  |        |    |         |       |   |         |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |         |       |   |         |
| -36.11  | <  | 50     | OK |         | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |         |       |   |         |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [ - ]   | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción   | 6 – 135 |
| Cálculo de Vcr  |  |        |    |         |       | Cortante resistente al pandeo [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ]  | 6 – 165 |
|   | $Vn = Vcr = CVp$                                     |        |    | [ - ]   | [ - ] |   | 6 – 165 |
|   | $Vp = 0.58 Fyw D tw$                                 |        |    | 1562.94 | kip   | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]   | 6 – 165 |
| Cálculo de C  |  |        |    | [ - ]   | [ - ] | Relacion de la resistencia al pandeo por corte  | 6 – 164 |

|  |   |         |     |     |     |                     |  |
|--|---|---------|-----|-----|-----|---------------------|--|
| $Si \frac{D}{tw} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{Fy_w}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |     |     |     |                     |  |
| Se revisan las condiciones   |   |         |     |     |     |                     |  |
| $\frac{D}{tw} =$   |   | 96.33   | [-] |     |     |                     |  |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{Fy_w}} =$  |   | 177.69  | [-] |     |     |                     |  |
| 96.33  | < | 177.69  | OK  |     |     | CUMPLE              |  |
| Se usara C=  |   |         | 1.0 | [-] |     |                     |  |
| Por lo tanto   |   |         |     |     |     |                     |  |
| $Vn = Vcr = CVp$   |   | 1562.94 | kip |     |     |                     |  |
| $Vu \leq \phi v Vcr$   |   |         |     |     |     |                     |  |
| 109.86   | < | 1562.94 | OK  |     | kip | CUMPLE LA CONDICIÓN |  |

### 6.2.3. Resumen de esfuerzos

Durante el empujado las dovelas estuvieron sujetas a una combinación de esfuerzos por flexión y carga axial. En este caso la superestructura no se encontraría estacionaria, se encontraría en una posición en la que tomaría momentos.

De acuerdo con la revisión del diseño por constructibilidad, se calculó la envolvente de esfuerzos tanto superiores como inferiores. La figura 6.3 muestra los máximos esfuerzos a los que estuvieron sujetas las dovelas, así como la nariz durante el proceso de empujado. En esta figura se puede observar cuales son las dovelas que estuvieron sujetas a esfuerzos mayores.

La revisión por constructibilidad (AASHTO 6.10.3.2) dice que el esfuerzo máximo permisible que puede resistir la superestructura es de 50 ksi (acero grado A50, 3515 kg/cm<sup>2</sup> esfuerzo de fluencia de acuerdo con AASHTO tabla 6.4.1-1), se observa que este valor no se rebasa en ninguna dovela en sus distintas fases de empujado.

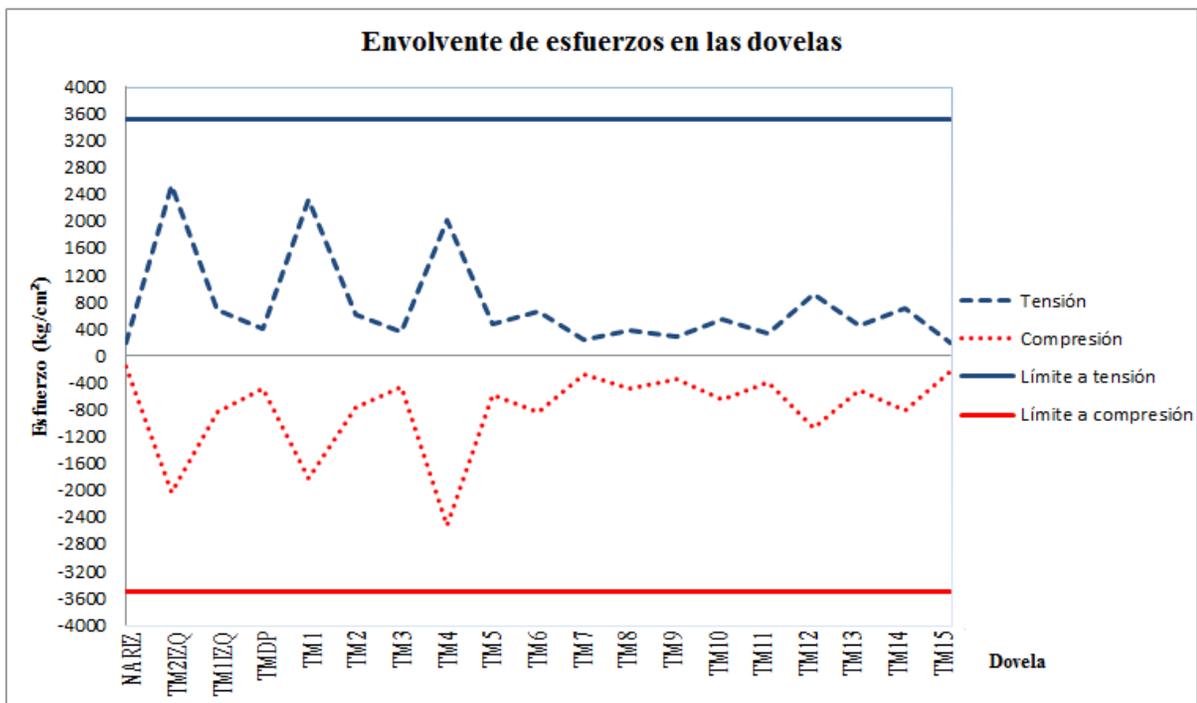


Figura 6.3. Envolvente de esfuerzos en las dovelas durante el empujado

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1. CONCLUSIONES

El sistema constructivo de empuje de puentes, es un sistema utilizado con mayor frecuencia para construir puentes en gran parte del mundo. Es un sistema donde se necesita un análisis minucioso del comportamiento estructural ante las flechas que se presentarán durante la etapa de empujado y, sobre todo, ante los esfuerzos a los que será sometido el tablero.

La obtención de las propiedades geométricas de las distintas secciones de las traveses maestras, es una de las partes más importantes del análisis, ya que estas no sólo se consideraron en el modelo matemático sino que también fueron utilizadas para la revisión de los principales elementos antes mencionados. Es recomendable utilizar los planos del proyecto para que el modelo sea lo mas semejante a la realidad y tener cuidado con las características de cada pieza a modelar.

Los apoyos móviles donde se encuentra apoyada la superestructura antes del empuje en el patio de fabricación son importantes para conocer el comportamiento de la superestructura antes y al momento del empuje y saber los efectos locales que derivan de ellos, al igual de comprender cual es la mejor distancia que debe de haber entre apoyo móvil antes del empujado para evitar alguna deformación objetable de la superestructura.

Al realizar las simulaciones del proceso de empujado a cada 2 m, 4 m, 4 m, 2 m, nos permite obtener un análisis detallado para poder comparar con los resultados que se dan en campo.

La estructura auxiliar (nariz de lanzamiento), ejerce una influencia deseada en la notable disminución de los momentos flexionantes. Esto se debe a que es mucho más ligera que las dovelas del puente, por lo tanto disminuye considerablemente el momento y la flecha que se produce.

Los resultados a los que se les dio mayor seguimiento, fueron las flechas o deflexiones verticales en la punta de la nariz de lanzamiento. Como era de esperarse, las flechas máximas que se obtuvieron fueron en los claros de 48 m. Mientras que en el claro de 35 m comparado con el claro que queda en voladizo en la última fase de empujado antes de empezar el lanzado de tirantes que es de 30 m, da una flecha mayor, ya que se realiza sin nariz de lanzamiento, observando considerablemente como la nariz (por ser mas ligera) ayuda a reducir la flecha que se genera.

El control geométrico teórico muestra el grado de deformación que presentará el puente, donde pueden ocurrir cambios en la operación de montaje o condiciones de carga y de frontera que afectan el comportamiento de la superestructura y por lo tanto el diseño de los elementos, por lo que teniendo estos datos se puede observar si se presenta alguna anomalía en la construcción y poder controlar las fases del mismo por si en algún momento existe algo anormal en obra comparado con el análisis.

Los niveles de esfuerzos en patines superior a tensión e inferior a compresión en las dovelas, se observan valores máximos para el voladizo que alcanzan el orden de  $2538.78 \text{ kg/cm}^2$  (36.11 ksi) y  $2032.57 \text{ kg/cm}^2$  (28.91 ksi), respectivamente. Estos esfuerzos se compararon con los permisibles para el acero a flexión tipo A50 de acuerdo al ASHTO LRFD por constructibilidad con un esfuerzo de fluencia de  $3515 \text{ kg/cm}^2$  (50 ksi), por lo que ninguno de los resultados obtenidos supera este valor. Por lo tanto los esfuerzos registrados en las dovelas de acero se encuentran por debajo del

límite permisible de esfuerzo para acero grado A50 ( $3515 \text{ kg/cm}^2$ ), lo que no pone en peligro el comportamiento de la estructura.

De acuerdo con el análisis realizado en este trabajo se observa que la nariz de lanzamiento a utilizar en el empujado del puente puede resistir un momento máximo de  $650 \text{ t}\cdot\text{m}$ , por lo que resiste niveles de esfuerzos últimos en patines superior a tensión e inferior a compresión en voladizo del orden de  $3495.66 \text{ kg/cm}^2$  (49.72 ksi) y  $2929.69 \text{ kg/cm}^2$  (41.67 ksi), respectivamente. Estos esfuerzos se comparan con los permisibles para el acero a flexión tipo A50, de acuerdo con ASHTO LRFD 2012 para un acero con esfuerzo de fluencia de  $3515 \text{ kg/cm}^2$  (50 ksi), por constructibilidad, ninguno de los resultados obtenidos supera este valor. Pero en el análisis, realmente la nariz solo alcanza esfuerzos del orden de  $198.27 \text{ kg/cm}^2$  (2.82 ksi) en el patín a tensión y  $165.92 \text{ kg/cm}^2$  (2.36 ksi) en el patín a compresión. Por lo tanto los esfuerzos registrados en la nariz de lanzamiento se encuentran por debajo del límite permisible de esfuerzo para acero grado A50 ( $3515 \text{ kg/cm}^2$ ).

El análisis por etapas constructivas brinda la posibilidad al proyectista de obtener valores de deformación, esfuerzo, elementos mecánicos, etc., en diferentes etapas del proceso de construcción, lo que permite tomar en cuenta modificaciones que se hagan antes, durante, y después de la construcción de la estructura.

## 7.2. RECOMENDACIONES

Del presente trabajo es posible indicar las siguientes recomendaciones:

- Modelar un puente empujado con elementos tipo barra arroja resultados satisfactorios, siempre y cuando las piezas se modelen adecuadamente para que se generen satisfactoriamente sus propiedades geométricas y agregar sus propiedades de material correspondientes, por lo que se recomienda trabajar el modelo de acuerdo con los planos del proyecto.
- Durante el proceso constructivo del puente es recomendable colocar instrumentación para hacer un monitoreo del comportamiento del puente durante la etapa de empujado, como pueden ser niveles de esfuerzos, deflexiones, desplazamientos, temperatura, velocidad del viento, etc. Las secciones que se monitorean pueden ser las estudiadas en este trabajo, como son patín superior e inferior y el alma de las travesaños maestras, así como su desplazamiento vertical.
- Realizar las revisiones pertinentes con la norma vigente AASHTO LRFD, ya que es fundamental la revisión de las dovelas ante diferentes estados límite durante su fase de construcción, así como en su fase de servicio.
- Al concluir el puente se podría dejar un sistema de monitoreo para estimar el comportamiento del puente durante su vida útil.
- Modelar con elementos frame facilita el tiempo de trabajo a emplear en el modelo ya que se pueden obtener de una manera más versátil los efectos de torsión, deformación axial y biaxial del elemento barra, así como, definir apropiadamente las secciones a modelar y cargarlas con su peso propio, múltiples cargas puntuales y múltiples cargas distribuidas, mientras que con el elemento tipo Shell se pueden introducir por igual todas estas especificaciones antes mencionadas pero, para obtener resultados cercanos al valor de la solución analítica, se debe discretizar muy bien el modelo. Por lo que recomiendo utilizar el elemento que sea de su agrado, ya que con los dos puedes obtener resultados satisfactorios de acuerdo con lo que se este estudiando.

**CAPÍTULO 8****BIBLIOGRAFÍA**

Adrián Pozos Estrada. Universidad Nacional Autónoma de México. 2002. México D.F. “Aspectos básicos en el diseño y análisis de puentes atirantados.” Tesis Profesional.

“AASHTO LRFD 2012” Bridge Design Specifications 6th Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Carlos Humberto Herrera. “Curso de manejo programa SAP 2000 diseño y análisis por medio de elemento finito.

CSI Computer and Structures, Inc. Berkeley California, USA. “SAP2000 Análisis de elementos finitos y diseño de estructuras manual básico-intermedio.

CSI Computer and Structures, Inc. CARIBE. “SAP2000 integrated software for structures analysis and design (Software integrado para el análisis y diseño estructural)”

Introducción al diseño de puentes metálicos AASHTO LRFD.

Israel Iván León García. Universidad Nacional Autónoma de México. Febrero 2005. México D.F. “Modelación de la construcción por etapas de un puente atirantado en doble voladizo.” Tesis Maestría.

José Luis Blanco Claraco, Antonio González Herrera, José Manuel García Manrique. “Análisis estático de estructuras por el método matricial”. Departamento de ingeniería civil, materiales y fabricación. Universidad de Málaga.

Luis Alfonso Torre Romo. Universidad Nacional Autónoma de México. 2009. Acatlán, Edo. De México. “Procedimientos constructivos de puentes atirantados.” Tesis Profesional.

Luis Enrique Hernández Huerta. Universidad Nacional Autónoma de México. Abril 2009. México D.F. “Modelación matemática del proceso de construcción de la superestructura de un puente empujado.” Tesis Profesional.

Mar Alonso Martínez. Universidad de Oviedo. 2013. “Nuevo sistema de empuje continuo de puentes: diseño y análisis mediante simulación numérica.” Tesis Doctoral.

María Fernanda Quintana Ytza. Universidad de Montevideo. Memoria de trabajos de difusión científica y técnica. “Métodos constructivos de puentes atirantados - estudio de la distribución de fuerzas en los tirantes”.

Michael Baker Jr., Inc. November 2003. “LRFD design example for steel girder superstructure bridge”. FHWA/National Highway Institute, Washington, DC.

Raúl Alejandro Cárcamo Venegas. Universidad Austral de Chile. 2011. Valdivia. “Análisis del sistema constructivo Empuje de Puentes, aplicado a puentes mixtos.” Tesis Profesional.

Raúl Sánchez García. Universidad Nacional Autónoma de México. Enero 2010. México D.F. “Adaptación y modificación de un programa de análisis de puentes atirantados.” Tesis Maestría.

René Walther, Bernard Houriet, Walmar Isler, Pierre Mola, Jean-Francois Klein, “Cable stayed bridges”, second edition.

Revista EIA, Escuela de Ingeniería Antioquia Colombia. “Comportamiento estructural de puentes extradados durante construcción por voladizos sucesivos”. José Benjumea Royero, Mario Suarez Rodríguez, Gustavo Chio Cho.

Ronald Cesar Gómez Johnson. Universidad Nacional Autónoma de México. Abril 2008. México D.F. “Comparación entre las filosofías de diseño por esfuerzos admisibles, factores de carga y factores de carga y resistencia en el diseño de superestructuras de puentes vehiculares bajo la acción de cargas gravitacionales.” Tesis Maestría.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). “Manifestación de impacto ambiental modalidad particular del proyecto: Construcción del Puente La Concordia, en el Municipio de La Concordia, Estado de Chiapas”.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). Proyecto. Carreteras, “Proyecto de puentes y estructuras”. Proyectos de nuevos puentes y estructuras similares. Consideraciones para puentes especiales. M-PRY-CAR-6-01-008/04.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE). “Análisis de un puente atirantado construido segmentalmente con elementos prefabricados de grandes dimensiones”. Raúl Sánchez García, Cesar Carpio Pacheco, José Carlos Arce Riobóo y José Alberto Escobar Sánchez.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE). “Puentes curvos de traveses de acero y losa de concreto: sus dilemas de diseño y construcción”. Ricardo González Alcorta, Guillermo Villareal Garza y Salvador R. Marines Delgado.

Trinidad Alfonso Herrera Chávez. Universidad Nacional Autónoma de México. 2010. México D.F. “Evaluación sísmica de un puente durante el proceso constructivo de empujado.” Tesis Profesional.

[www.ssingenieria.com](http://www.ssingenieria.com) “Manual simplificado de diseño para puentes, usando SAP2000.

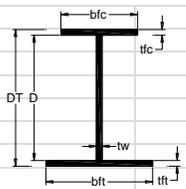
## APÉNDICE A. MEMORIAS DE CÁLCULO DEL TRAMO EMPUJADO DEL PUNTE

### A.1. NARIZ

Revisión ante elementos mecánicos máximos en la etapa de volado.

**NARIZ,  $M = - 650.00 \text{ t} \cdot \text{m} = - 56417.52 \text{ k-in}$ ,  $V = - 44.55 \text{ t} = - 98.22 \text{ kip}$**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |              |                 |  |  |             |
|--|--------------|-----------------|--|--|-------------|
| REVISIÓN NARIZ   |              |                 |  |  |             |
| AASHTO LRFD 2012   |              |                 |  |  |             |
| Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]                   |              |                 |  |  |             |
|  |              |                 |  |  |             |
|  |              |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   | Valor        | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |              |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]                             |              |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]                         | No-compuesta |                 |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |              |                 |  |  |             |
| tw =   | 0.51         | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  | 16.0         | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  | 0.75         | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  | 24.0         | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =  | 0.87         | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  | 73.9         | in              | Altura del alma  |  |             |
| Dr =   | 75.6         | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>                                    |              |                 |  |  |             |
| AT =   | 67.76        | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =   | 58294.98     | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =   | 1159.03      | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =   | 29.33        | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =   | 4.14         | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =  | 1418.30      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =  | 1692.20      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =  | 96.52        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =  | 96.52        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =   | 1858.07      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =   | 165.05       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  | 10.16        | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   | 1100120.25   | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>                                   |              |                 |  |  |             |
| E =  | 29000.0      | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =  | 35.0         | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: $F_{yr} = \min ( 0.7F_{yc}, F_{yw} ), F_{yr} \geq 0.5F_{yc}$ |              |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>                           |              |                 |  |  |             |
| Mu =   | -3199.31     | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =   | -20.53       | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                   |              |                 |  |  |             |
| DC = FC  | 1.25         | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                 |              |                 |  |  |             |
| φf =   | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φv =   | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |



|   |   |      |    |        |       |   |         |
|---|---|------|----|--------|-------|---|---------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |   |      |    |        |       |   |         |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   |   |      |    | -2.82  | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión  |         |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   |   |      |    | -2.36  | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresion   |         |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |   |      |    |        |       |   | 6 – 132 |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |   |      |    |        |       |   | 6 – 132 |
| <u>Revisión 1</u>   |   |      |    |        |       |   |         |
| $f_{bu} + fl \leq \phi_f Rh F_{yc}$   |   |      |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  | 6 – 132 |
| $fl \leq 0.6f_{yt}$   |   |      |    |        |       |   |         |
| $fl =$  |   |      |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| $Rh =$  |   |      |    | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124 |
| Por lo tanto  |   |      |    |        |       |   |         |
| $f_{bu} + fl \leq \phi_f Rh F_{yc}$   |   |      |    |        |       |   |         |
| -2.36   | < | 50   | OK |        | ksi   | <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b>  |         |
| <u>Revisión 2</u>   |   |      |    |        |       |   |         |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi_f F_{nc}$  |   |      |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |         |
| Cálculo de Fnc  |   |      |    | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexion nominal en el patin a compresión   | 6 – 154 |
| $\lambda f \leq \lambda p f$  |   |      |    | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  | 6 – 154 |
| $\lambda f = \frac{bfc}{2tfc} =$  |   |      |    | 10.68  | [ - ] |   |         |
| $\lambda p f = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   |      |    | 9.15   | [ - ] |   |         |
| 10.68   | < | 9.15 | NO |        |       | NO CUMPLE   |         |
| Por lo tanto  |   |      |    |        |       |   |         |
| $Se\ usara\ F_{nc} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{yr}}{Rh F_{yc}} \right) \left( \frac{\lambda f - \lambda p f}{\lambda r f - \lambda p f} \right) \right] Rh F_{yc}$ |   |      |    |        |       |   |         |
| Donde   |   |      |    |        |       |   |         |
| $\lambda r f = 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}} =$  |   |      |    | 16.12  | [ - ] | Límite de la relación de esbeltez para patín no compacto  | 6 – 154 |
| $Rb =$  |   |      |    | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 125 |
| $Si \frac{D}{tw} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \quad \text{ó} \quad \frac{2Dc}{tw} \leq \lambda r w \text{ se usara } Rb = 1.0$                                    |   |      |    |        |       |   |         |
| Cálculo de Dc   |   |      |    | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   | 6 – 328 |
| $Dc = \left( \frac{-fc}{ fc  + ft} \right) d - tfc =$   |   |      |    | -34.11 | in    |   |         |
| Cálculo de K  |   |      |    | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [ AASHTO 6.10.1.9 ]  | 6 – 121 |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{Dc}{D} \right)^2} \right) =$  |   |      |    | 42.29  | [ - ] |   |         |
| Cálculo de $\lambda r w$  |   |      |    | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   | 6 – 126 |
| $\lambda r w = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   |   |      |    | 137.27 | [ - ] |   |         |

|   |   |        |    |        |   |
|---|---|--------|----|--------|---|
| Se revisan las condiciones  |   |        |    |        |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$  |        |    | 144.46 | [ - ]   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} =$   |        |    | 148.79 | [ - ]   |
| 144.46  | <   | 148.79 | OK |        | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$  |        |    | 133.28 | [ - ]   |
|   | $\lambda_{rw} =$  |        |    | 137.27 | [ - ]   |
| 133.28  | <   | 137.27 | OK |        | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |   |        |    |        |   |
|   |   |        |    | 1.0    | [ - ]   |
| Cálculo de Fnc  |   |        |    |        |   |
|   | $F_{nc} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left( \frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_b R_h F_{yc} =$ |        |    | 46.70  | ksi   |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |   |
|   | $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi f F_{nc}$   |        |    |        |   |
| -2.36   | <   | 46.70  | OK | ksi    | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |   |        |    |        |   |
|   | $f_{bu} \leq \phi f F_{crw}$  |        |    | [ - ]  | [ - ]   |
|   |   |        |    |        | Asegura que no sufra pandeo el alma   |
|   |   |        |    |        | 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |   |        |    |        |   |
|   |   |        |    | [ - ]  | ksi   |
|   | $F_{crw} = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$   |        |    | 52.89  | ksi   |
|   |   |        |    |        | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ]  |
|   |   |        |    |        | 6 – 121   |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |   |
|   | $f_{bu} \leq \phi f F_{crw}$  |        |    |        |   |
| -2.36   | <   | 52.89  | OK | ksi    | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |   |        |    |        |   |
|   | $f_{bu} + f_l \leq \phi f R_h F_{yt}$   |        |    | [ - ]  | [ - ]   |
|   |   |        |    |        | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado   |
|   |   |        |    |        | 6 – 134   |
| fl =  |   |        |    | 0.0    | ksi   |
|   |   |        |    |        | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] |
|   |   |        |    |        | 6 – 300   |
| Rh =  |   |        |    | 1.0    | [ - ]   |
|   |   |        |    |        | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  |
|   |   |        |    |        | 6 – 124   |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |   |
|   | $f_{bu} + f_l \leq \phi f R_h F_{yt}$   |        |    |        |   |
| -2.82   | <   | 50     | OK | ksi    | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |   |        |    |        |   |
|   | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |        |    | [ - ]  | kip   |
|   |   |        |    |        | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción   |
|   |   |        |    |        | 6 – 135   |

|                            |   |         |       |   |                     |  |
|----------------------------|---|---------|-------|---|---------------------|--|
| Cálculo de $V_{cr}$        |   |         |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] |                     | 6 - 165  |
|                            | $V_n = V_{cr} = CV_p$   |         | [ - ] | [ - ]   |                     | 6 - 165  |
|                            | $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   | 1097.41 | kip   | Fuerza cortante plástico [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2 ]         |                     | 6 - 165  |
| Cálculo de C               |   |         |       | [ - ]   | [ - ]               | Relación de la resistencia al pandeo por corte |
|                            | $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |         |       |   |                     |  |
| Se revisan las condiciones |   |         |       |   |                     |  |
|                            | $\frac{D}{t_w} =$   | 144.46  | [ - ] |   |                     |  |
|                            | $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   | 175.41  | [ - ] |   |                     |  |
| 144.46                     | <   | 175.41  | OK    |   | CUMPLE              |  |
| Se usara C=                |   |         |       | 1.0   | [ - ]               |  |
| Por lo tanto               |   |         |       |   |                     |  |
|                            | $V_n = V_{cr} = CV_p$   | 1097.41 | kip   |   |                     |  |
|                            | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         |       |   |                     |  |
| -20.53                     | <   | 1097.41 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN |  |

**A.2. TM2 IZQ**

Se presenta la revisión de los elementos estructurales en la etapa de construcción apoyado.

**TM2 IZQ,  $M = - 307.30 \text{ t}\cdot\text{m} = - 26672.47 \text{ k-in}$ ,  $V = + 37.43 \text{ t} = + 82.52 \text{ kip}$**

| MEMORIA DE CÁLCULO  |              |                 |  |  |             |
|---|--------------|-----------------|--|--|-------------|
| REVISIÓN TM2 IZQ APOYADO  |              |                 |  |  |             |
| AASHTO LRFD 2012  |              |                 |  |  |             |
| Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]                      |              |                 |  |  |             |
|   |              |                 |  |  |             |
|   |              |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula  | Valor        | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>   |              |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]                                |              |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]                            | No-compuesta |                 |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>   |              |                 |  |  |             |
| tw =  | 0.75         | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =   | 16.0         | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| trc =   | 1.75         | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =   | 24.0         | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =   | 1.75         | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =   | 72.0         | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =  | 75.6         | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>                                       |              |                 |  |  |             |
| AT =  | 123.97       | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =  | 116574.13    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =  | 2621.00      | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =  | 30.66        | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =  | 4.60         | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =   | 2777.97      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =   | 3470.76      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =   | 218.27       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =   | 218.27       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =  | 3543.32      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =  | 373.25       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =   | 82.00        | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =  | 2507900.23   | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>                                      |              |                 |  |  |             |
| E =   | 29000.0      | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =   | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =   | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =   | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =   | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =   | 35.0         | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: $F_{yr} = \min ( 0.7F_{yc}, F_{yw} )$ , $F_{yr} \geq 0.5F_{yc}$ |              |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>                              |              |                 |  |  |             |
| Mu =  | -26672.47    | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =  | 82.52        | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                      |              |                 |  |  |             |
| DC = FC   | 1.25         | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                    |              |                 |  |  |             |
| φf =  | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φv =  | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |

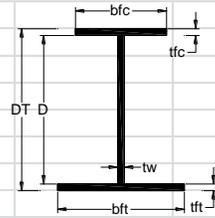
|   |        |       |   |                                |
|---|--------|-------|---|--------------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |        |       |   |                                |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   | -12.00 | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión   |                                |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   | -9.61  | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión  |                                |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |        |       |   | 6 – 132                        |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |        |       |   | 6 – 132                        |
| <u>Revisión 1</u>   |        |       |   |                                |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  | 6 – 132                        |
| $fl \leq 0.6 f_{yt}$  |        |       |   |                                |
| $fl =$  | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300                        |
| $R_h =$   | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]   | 6 – 124                        |
| Por lo tanto  |        |       |   |                                |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  |        |       |   |                                |
| -12.00  | <      | 50    | OK  | ksi <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>   |        |       |   |                                |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi F_{nc}$  | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |                                |
| Cálculo de $F_{nc}$   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión   | 6 – 154                        |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  | 6 – 154                        |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} =$  | 4.56   | [ - ] |   |                                |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   | 9.15   | [ - ] |   |                                |
| 4.56  | <      | 9.15  | OK  | CUMPLE                         |
| $Se \text{ usara } F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$   |        |       |   |                                |
| $R_b =$   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.1 ]   | 6 – 125                        |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |        |       |   |                                |
| Cálculo de $D_c$  | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   | 6 – 328                        |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  | -32.81 | in    |   |                                |
| Cálculo de $K$  | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]  | 6 – 121                        |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   | 43.40  | [ - ] |   |                                |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   | 6 – 126                        |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  | 137.27 | [ - ] |   |                                |

|   |  |        |    |        |       |   |
|---|--|--------|----|--------|-------|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |       |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 96.32  | [ - ] |   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 150.73 | [ - ] |   |
| 96.32   | <  | 150.73 | OK |        |       | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 87.72  | [ - ] |   |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [ - ] |   |
| 87.72   | <  | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |       |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [ - ] |   |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi   |   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |       |   |
| -12.00  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 122.11 | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ] 6 – 121  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |       |   |
| -12.00  | <  | 122.11 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ] 6 – 124  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |       |   |
| -9.61   | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |       |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [ - ]  | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción 6 – 135   |

|   |   |         |       |   |                     |
|---|---|---------|-------|---|---------------------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |       | Cortante resistente al pandeo [ AASHTO Eq.6.10.9. | 6 – 165             |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | [ - ] | [ - ]   | 6 – 165             |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   | 1562.92 | kip   | Fuerza cortante plástico [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2 | 6 – 165             |
| Cálculo de C  |   |         |       | Relación de la resistencia al pandeo por corte    | 6 – 164             |
|   |   |         | [ - ] | [ - ]   |                     |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |       |   |                     |
| Se revisan las condiciones  |   |         |       |   |                     |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   | 96.32   | [ - ] |   |                     |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   | 177.70  | [ - ] |   |                     |
| 96.32   | < | 177.70  | OK    |   | CUMPLE              |
| Se usara C=   |   |         |       | 1.0   | [ - ]               |
| Por lo tanto  |   |         |       |   |                     |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   | 1562.92 | kip   |   |                     |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |       |   |                     |
| 82.52   | < | 1562.92 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN |

**TM2 IZQ, M = + 181.28 t\*m = + 15734.41 k-in, V = - 31.38 t = - 69.18 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO                                      |            |                 |  |  |             |
|---|------------|-----------------|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM2 IZQ APOYADO</b>                         |            |                 |  |  |             |
| <b>AASHTO LRFD 2012</b>                                 |            |                 |  |  |             |
| <b>Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]</b> |            |                 |  |  |             |
|   |            |                 |  |  |             |
|   |            |                 |  |  |             |
|   |            |                 |  |  |             |
|   |            |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula  | Valor      | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>   |            |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]                  |            |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]              |            | No-compuesta    |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>                                       |            |                 |  |  |             |
| tw =  | 0.75       | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =   | 16.0       | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =   | 1.75       | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =   | 24.0       | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =   | 1.75       | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =   | 72.0       | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =  | 75.6       | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>                         |            |                 |  |  |             |
| AT =  | 123.97     | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =  | 116574.13  | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =  | 2621.00    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =  | 30.66      | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =  | 4.60       | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =   | 2777.97    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =   | 3470.76    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =   | 218.27     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =   | 218.27     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =  | 3543.32    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =  | 373.25     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =   | 82.00      | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =  | 2507900.23 | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>                        |            |                 |  |  |             |
| E =   | 29000.0    | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =   | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =   | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =   | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =   | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =   | 35.0       | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: Fyr = min ( 0.7Fyc, Fyw ), Fyr ≥ 0.5Fyc           |            |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>                |            |                 |  |  |             |
| Mu =  | 15734.41   | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =  | -69.18     | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>        |            |                 |  |  |             |
| DC = FC   | 1.25       | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>      |            |                 |  |  |             |
| φf =  | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φv =  | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |



|   |   |        |       |   |                     |
|---|---|--------|-------|---|---------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |   |        |       |   |                     |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   |   | 7.08   | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión   |                     |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   |   | 5.67   | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión  |                     |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |   |        |       |   | 6 – 132             |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |   |        |       |   | 6 – 132             |
| <u>Revisión 1</u>   |   |        |       |   |                     |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  | 6 – 132             |
| $fl \leq 0.6 f_{yt}$  |   |        |       |   |                     |
| $fl =$  |   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300             |
| $R_h =$   |   | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]   | 6 – 124             |
| Por lo tanto  |   |        |       |   |                     |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  |   |        |       |   |                     |
| 7.08  | < | 50     | OK    | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN |
| <u>Revisión 2</u>   |   |        |       |   |                     |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi F_{nc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |                     |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión   | 6 – 154             |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  | 6 – 154             |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} =$  |   | 4.56   | [ - ] |   |                     |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   |   | 9.15   | [ - ] |   |                     |
| 4.56  | < | 9.15   | OK    |   | CUMPLE              |
| $Se usara F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$  |   |        |       |   |                     |
| $R_b =$   |   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.1 ]   | 6 – 125             |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |   |        |       |   |                     |
| Cálculo de $D_c$  |   | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   | 6 – 328             |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  |   | -32.81 | in    |   |                     |
| Cálculo de $K$  |   | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]  | 6 – 121             |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   |   | 43.40  | [ - ] |   |                     |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   |   | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   | 6 – 126             |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   | 137.27 | [ - ] |   |                     |

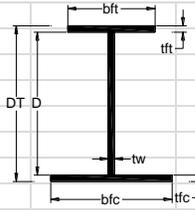
|   |  |        |    |        |       |   |
|---|--|--------|----|--------|-------|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |       |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 96.32  | [ - ] |   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 150.73 | [ - ] |   |
| 96.32   | <  | 150.73 | OK |        |       | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 87.72  | [ - ] |   |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [ - ] |   |
| 87.72   | <  | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |       |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [ - ] |   |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi   |   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |       |   |
| 7.08  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 122.11 | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ] 6 – 121  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |       |   |
| 7.08  | <  | 122.11 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ] 6 – 124  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |       |   |
| 5.67  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |       |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [ - ]  | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción 6 – 135   |

|  |   |         |       |       |   |                     |
|--|---|---------|-------|-------|---|---------------------|
| Cálculo de $V_{cr}$  |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo [ AASHTO Eq.6.10.9. | 6 – 165             |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$  |   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165             |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D tw$   |   | 1562.92 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2 | 6 – 165             |
| Cálculo de C   |   |         | [ - ] | [ - ] | Relación de la resistencia al pandeo por corte    | 6 – 164             |
| $\text{Si } \frac{D}{tw} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |       |       |   |                     |
| Se revisan las condiciones   |   |         |       |       |   |                     |
| $\frac{D}{tw} =$   |   | 96.32   |       | [ - ] |   |                     |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$  |   | 177.70  |       | [ - ] |   |                     |
| 96.32  | < | 177.70  | OK    |       | CUMPLE  |                     |
| Se usara C=  |   |         |       | 1.0   | [ - ]   |                     |
| Por lo tanto   |   |         |       |       |   |                     |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$  |   | 1562.92 |       | kip   |   |                     |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$   |   |         |       |       |   |                     |
| -69.18   | < | 1562.92 | OK    |       | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN |

**A.3. TM1 IZQ, TMDP, TM1**

Se presenta la revisión de los elementos estructurales en la etapa de construcción en volado.

**TM1 IZQ, TMDP, TM1,  $M = - 923.89 \text{ t}\cdot\text{m} = - 80190.12 \text{ k}\cdot\text{in}$ ,  $V = + 49.83 \text{ t} = + 109.86 \text{ kip}$**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |            |                 |  |  |             |        |
|--|------------|-----------------|--|--|-------------|--------|
| REVISIÓN TM1 IZQ, TMDP Y TM1 VOLADO  |            |                 |  |  |             |        |
| AASTHO LRFD 2012   |            |                 |  |  |             |        |
| Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]                                   |            |                 |  |  |             |        |
| Variable/Fórmula   | Valor      | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |        |
|  |            |                 |  |  |             |        |
| <b>*General</b>  |            |                 |  |  |             |        |
| Región a momento [Positivo / Negativo]   |            |                 |  |  |             |        |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]      No-compuesta                       |            |                 |  |  |             |        |
| <b>*Geometria</b>  |            |                 |  |  |             |        |
| tw =   | 0.75       | in              | Espesor del alma   |  |             |        |
| bfc =  | 24.0       | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |        |
| tfc =  | 2.01       | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |        |
| bft =  | 16.0       | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |        |
| tft =  | 2.01       | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |        |
| D =  | 71.5       | in              | Altura del alma  |  |             |        |
| DT =   | 75.6       | in              | Altura completa del perfil   |  |             |        |
| <b>*Propiedades geometricas</b>  |            |                 |  |  |             |        |
| AT =   | 133.83     | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |        |
| Ix =   | 128817.23  | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |        |
| Iy =   | 3003.46    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |        |
| rx =   | 31.03      | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |        |
| ry =   | 4.74       | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |        |
| Sxsup =  | 3052.06    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |        |
| Sxinf =  | 3863.22    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |        |
| Sysup =  | 250.12     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |        |
| Syinf =  | 250.12     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |        |
| Zx =   | 3895.41    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |        |
| Zy =   | 427.71     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |        |
| J =  | 118.19     | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |        |
| Ca =   | 2854324.04 | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |        |
| <b>*Propiedades del material</b>   |            |                 |  |  |             |        |
| E =  | 29000.0    | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |        |
| Fyf =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |        |
| Fyw =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |        |
| Fyc =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |        |
| Fyt =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |        |
| Fyr =  | 35.0       | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |        |
| nota: $F_{yr} = \min ( 0.7F_{yc}, F_{yw} ), F_{yr} \geq 0.5F_{yc}$                 |            |                 |  |  |             |        |
| <b>*Elementos mecanicos del análisis</b>   |            |                 |  |  |             |        |
| Mu =   | -80190.12  | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |        |
| Vu =   | 109.86     | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |        |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                                   |            |                 |  |  |             |        |
| DC = FC  | 1.25       | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  |             | 3 - 18 |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                                 |            |                 |  |  |             |        |
| $\phi_f$ =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  |             | 6 - 41 |
| $\phi_v$ =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |        |

|   |        |       |  |                                |
|---|--------|-------|--|--------------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |        |       |  |                                |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   | -32.84 | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión   |                                |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   | -25.95 | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión  |                                |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |        |       |  | 6 – 132                        |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |        |       |  | 6 – 132                        |
| <u>Revisión 1</u>   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico   | 6 – 132                        |
| $f_l \leq 0.6 f_{yt}$   |        |       |  |                                |
| $f_l =$   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300                        |
| $R_h =$   | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124                        |
| Por lo tanto  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   |        |       |  |                                |
| -25.95  | <      | 50    | OK   | ksi <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi_f F_{nc}$   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión   |                                |
| Cálculo de $F_{nc}$   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión  | 6 – 154                        |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]   | 6 – 154                        |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2 t_{fc}} =$   | 5.98   | [ - ] |  |                                |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   | 9.15   | [ - ] |  |                                |
| 5.98  | <      | 9.15  | OK   | CUMPLE                         |
| $Se usara F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$  |        |       |  |                                |
| $R_b =$   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10 ]   | 6 – 125                        |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |        |       |  |                                |
| Cálculo de $D_c$  | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]  | 6 – 328                        |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  | -32.46 | in    |  |                                |
| Cálculo de $K$  | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]   | 6 – 121                        |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   | 43.72  | [ - ] |  |                                |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 126                        |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  | 137.27 | [ - ] |  |                                |

|   |  |        |    |        |     |   |
|---|--|--------|----|--------|-----|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |     |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 95.63  | [-] |   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 151.27 | [-] |   |
| 95.63   | <  | 151.27 | OK |        |     | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 86.78  | [-] |   |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [-] |   |
| 86.78   | <  | 137.27 | OK |        |     | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |     |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [-] |   |
| Calculo de Fnc  |  |        |    |        |     |   |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi |   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |     |   |
| -25.95  | <  | 50     | OK |        | ksi | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [-]    | [-] | Asegura que no sufra pandeo el alma 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |     |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 124.76 | ksi | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ] 6 – 121  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |     |   |
| -25.95  | <  | 124.76 | OK |        | ksi | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [-]    | [-] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [-] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ] 6 – 124  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |     |   |
| -32.84  | <  | 50     | OK |        | ksi | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |     |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [-]    | kip | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas críticas de construcción 6 – 135   |

|   |   |         |       |   |                     |
|---|---|---------|-------|---|---------------------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165             |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   | [ - ]   | [ - ] |   | 6 – 165             |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   | 1551.81 | kip   | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]           | 6 – 165             |
| Cálculo de C  |   |         |       | Relación de la resistencia al pandeo por corte              | 6 – 164             |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |       |   |                     |
| Se revisan las condiciones  |   |         |       |   |                     |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   | 95.63   | [ - ] |   |                     |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   | 178.34  | [ - ] |   |                     |
| 95.63   | < | 178.34  | OK    | CUMPLE  |                     |
| Se usara C=   |   |         |       | 1.0   | [ - ]               |
| Por lo tanto  |   |         |       |   |                     |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   | 1551.81 | kip   |   |                     |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |       |   |                     |
| 109.86  | < | 1551.81 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN |

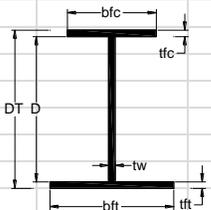


|  |        |       |  |                                |
|--|--------|-------|--|--------------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>   |        |       |  |                                |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$  | -10.92 | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión  |                                |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$  | -8.63  | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión   |                                |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>   |        |       |  | 6 – 132                        |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>   |        |       |  | 6 – 132                        |
| <u>Revisión 1</u>  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F R_h F_{yc}$  | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico   | 6 – 132                        |
| $f_l \leq 0.6 f_{yt}$  |        |       |  |                                |
| $f_l =$  | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300                        |
| $R_h =$  | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124                        |
| Por lo tanto   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F R_h F_{yc}$  |        |       |  |                                |
| -10.92   | <      | 50    | OK   | ksi <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi F F_{nc}$  | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión   |                                |
| Cálculo de $F_{nc}$  | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión  | 6 – 154                        |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$   | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]   | 6 – 154                        |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2 t_{fc}} =$  | 3.98   | [ - ] |  |                                |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  | 9.15   | [ - ] |  |                                |
| 3.98   | <      | 9.15  | OK   | CUMPLE                         |
| $Se \text{ usara } F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$  |        |       |  |                                |
| $R_b =$  | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [AASHTO 6.10.1.10.2]   | 6 – 125                        |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2Dc}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |        |       |  |                                |
| Cálculo de $D_c$   | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]  | 6 – 328                        |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$   | -32.46 | in    |  |                                |
| Cálculo de $K$   | [ - ]  | [ - ] | Coficiente de pandeo en alma [ AASHTO 6.10.1.9 ]   | 6 – 121                        |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$  | 43.72  | [ - ] |  |                                |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$  | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 126                        |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   | 137.27 | [ - ] |  |                                |

|   |  |        |    |        |     |   |
|---|--|--------|----|--------|-----|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |     |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 95.63  | [-] |   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 151.27 | [-] |   |
| 95.63   | <  | 151.27 | OK |        |     | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 86.78  | [-] |   |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [-] |   |
| 86.78   | <  | 137.27 | OK |        |     | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |     |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [-] |   |
| Calculo de Fnc  |  |        |    |        |     |   |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi |   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |     |   |
| -10.92  | <  | 50     | OK |        | ksi | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [-]    | [-] | Asegura que no sufra pandeo el alma 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |     |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 124.76 | ksi | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ] 6 – 121  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |     |   |
| -10.92  | <  | 124.76 | OK |        | ksi | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [-]    | [-] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [-] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ] 6 – 124  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |     |   |
| -8.63   | <  | 50     | OK |        | ksi | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |     |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [-]    | kip | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción 6 – 135   |

|   |   |         |         |       |   |         |
|---|---|---------|---------|-------|---|---------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |         |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165 |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | [ - ]   | [ - ] |   | 6 – 165 |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   |         | 1551.81 | kip   | Fuerza cortante plástico [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2 ]         | 6 – 165 |
| Cálculo de C  |   |         | [ - ]   | [ - ] | Relación de la resistencia al pandeo por corte              | 6 – 164 |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |         |       |   |         |
| Se revisan las condiciones  |   |         |         |       |   |         |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   |         | 95.63   | [ - ] |   |         |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   |         | 178.34  | [ - ] |   |         |
| 95.63   | < | 178.34  | OK      |       | CUMPLE  |         |
| Se usara C=   |   |         | 1.0     | [ - ] |   |         |
| Por lo tanto  |   |         |         |       |   |         |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | 1551.81 | kip   |   |         |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |         |       |   |         |
| 82.52   | < | 1551.81 | OK      | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |

**TM1 IZQ, TMDP, TM1, M = + 181.28 t\*m = + 15734.41 k-in, V = - 31.38 t = - 69.18 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |              |                 |  |  |             |
|--|--------------|-----------------|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM1 IZQ, TMDP Y TM1 APOYADO</b>  |              |                 |  |  |             |
| <b>AASHTO LRFD 2012</b>  |              |                 |  |  |             |
| <b>Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]</b>  |              |                 |  |  |             |
|                          |              |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   | Valor        | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |              |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]   |              |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]   | No-compuesta |                 |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |              |                 |  |  |             |
| tw =   | 0.75         | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  | 16.0         | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  | 2.01         | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  | 24.0         | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =  | 2.01         | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  | 71.5         | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =   | 75.6         | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>  |              |                 |  |  |             |
| AT =   | 133.83       | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| I <sub>x</sub> =   | 128817.23    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| I <sub>y</sub> =   | 3003.46      | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| r <sub>x</sub> =   | 31.03        | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| r <sub>y</sub> =   | 4.74         | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| S <sub>xsup</sub> =  | 3052.06      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| S <sub>xinf</sub> =  | 3863.22      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| S <sub>ysup</sub> =  | 250.12       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| S <sub>yinf</sub> =  | 250.12       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Z <sub>x</sub> =   | 3895.41      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Z <sub>y</sub> =   | 427.71       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  | 118.19       | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   | 2854324.04   | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>   |              |                 |  |  |             |
| E =  | 29000.0      | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| F <sub>yf</sub> =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| F <sub>yw</sub> =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| F <sub>yc</sub> =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| F <sub>yt</sub> =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| F <sub>yr</sub> =  | 35.0         | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: F <sub>yr</sub> = min ( 0.7F <sub>yc</sub> , F <sub>yw</sub> ), F <sub>yr</sub> ≥ 0.5F <sub>yc</sub> |              |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>   |              |                 |  |  |             |
| M <sub>u</sub> =   | 15734.41     | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| V <sub>u</sub> =   | -69.18       | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>   |              |                 |  |  |             |
| DC = FC  | 1.25         | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>   |              |                 |  |  |             |
| φ <sub>f</sub> =   | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φ <sub>v</sub> =   | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |

|  |        |       |  |                                |
|--|--------|-------|--|--------------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>   |        |       |  |                                |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$  | 6.44   | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión  |                                |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$  | 5.09   | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión   |                                |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>   |        |       |  | 6 – 132                        |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>   |        |       |  | 6 – 132                        |
| <u>Revisión 1</u>  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F R_h F_{yc}$  | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico   |                                |
| $f_l \leq 0.6 f_{yt}$  |        |       |  |                                |
| $f_l =$  | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] |                                |
| $R_h =$  | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  |                                |
| Por lo tanto   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F R_h F_{yc}$  |        |       |  |                                |
| 6.44   | <      | 50    | OK   | ksi <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi F F_{nc}$  | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión   |                                |
| Cálculo de $F_{nc}$  | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión  |                                |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$   | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]   |                                |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2 t_{fc}} =$  | 3.98   | [ - ] |  |                                |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  | 9.15   | [ - ] |  |                                |
| 3.98   | <      | 9.15  | OK   | CUMPLE                         |
| $Se usara F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$   |        |       |  |                                |
| $R_b =$  | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [AASHTO 6.10.1.10.2]   |                                |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2Dc}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |        |       |  |                                |
| Cálculo de $D_c$   | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]  |                                |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$   | -32.46 | in    |  |                                |
| Cálculo de $K$   | [ - ]  | [ - ] | Coeficiente de pandeo en alma [ AASHTO 6.10.1.9 ]  |                                |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$  | 43.72  | [ - ] |  |                                |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$  | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  |                                |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   | 137.27 | [ - ] |  |                                |

|   |  |        |    |        |     |   |
|---|--|--------|----|--------|-----|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |     |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 95.63  | [-] |   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 151.27 | [-] |   |
| 95.63   | <  | 151.27 | OK |        |     | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 86.78  | [-] |   |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [-] |   |
| 86.78   | <  | 137.27 | OK |        |     | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |     |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [-] |   |
| Calculo de Fnc  |  |        |    |        |     |   |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi |   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |     |   |
| 6.44  | <  | 50     | OK |        | ksi | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [-]    | [-] | Asegura que no sufra pandeo el alma 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |     |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 124.76 | ksi | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ] 6 – 121  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |     |   |
| 6.44  | <  | 124.76 | OK |        | ksi | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [-]    | [-] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [-] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ] 6 – 124  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |     |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |     |   |
| 5.09  | <  | 50     | OK |        | ksi | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |     |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [-]    | kip | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas críticas de construcción 6 – 135   |

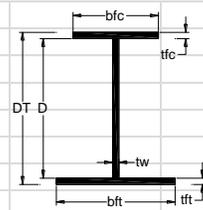
|   |   |         |         |       |   |         |
|---|---|---------|---------|-------|---|---------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |         |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165 |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | [ - ]   | [ - ] |   | 6 – 165 |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   |         | 1551.81 | kip   | Fuerza cortante plástico [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2 ]         | 6 – 165 |
| Cálculo de C  |   |         | [ - ]   | [ - ] | Relación de la resistencia al pandeo por corte              | 6 – 164 |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |         |       |   |         |
| Se revisan las condiciones  |   |         |         |       |   |         |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   |         | 95.63   | [ - ] |   |         |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   |         | 178.34  | [ - ] |   |         |
| 95.63   | < | 178.34  | OK      |       | CUMPLE  |         |
| Se usara C=   |   |         | 1.0     | [ - ] |   |         |
| Por lo tanto  |   |         |         |       |   |         |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | 1551.81 | kip   |   |         |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |         |       |   |         |
| -69.18  | < | 1551.81 | OK      | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |

**A.4. TM2, TM3, TM4**

Se presenta la revisión de los elementos estructurales en la etapa de construcción en volado.

**TM2, TM3, TM4, M = - 923.89 t\*m = - 80190.12 k-in, V = + 49.83 t = + 109.86 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |  |                |                 |  |  |             |
|--|--|----------------|-----------------|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM2, TM3 Y TM4 APOYADO</b>                             |  |                |                 |  |  |             |
| <b>AASHTO LRFD 2012</b>  |  |                |                 |  |  |             |
| <b>Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]</b>            |  |                |                 |  |  |             |
|  |  |                |                 |  |  |             |
|  |  |                |                 |  |  |             |
|  |  |                |                 |  |  |             |
|  |  |                |                 |  |  |             |
|  |  |                |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   |  | Valor          | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |  |                |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]                             |  |                |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]                         |  |                |                 |  |  |             |
| No-compuesta   |  |                |                 |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |  |                |                 |  |  |             |
| tw =   |  | 0.75           | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  |  | 16.0           | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  |  | 1.77           | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  |  | 24.0           | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =  |  | 1.77           | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  |  | 72.0           | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =   |  | 75.6           | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>                                    |  |                |                 |  |  |             |
| AT =   |  | 124.73         | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =   |  | 117522.74      | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =   |  | 2650.42        | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =   |  | 30.70          | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =   |  | 4.61           | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =  |  | 2799.23        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =  |  | 3501.11        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =  |  | 220.72         | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =  |  | 220.72         | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =   |  | 3570.49        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =   |  | 377.44         | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  |  | 84.44          | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   |  | 2534726.13     | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>                                   |  |                |                 |  |  |             |
| E =  |  | 29000.0        | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =  |  | 50.0           | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =  |  | 50.0           | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =  |  | 50.0           | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =  |  | 50.0           | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =  |  | 35.0           | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: $F_{yr} = \min ( 0.7F_{yc}, F_{yw} ), F_{yr} \geq 0.5F_{yc}$ |  |                |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>                           |  |                |                 |  |  |             |
| Mu =   |  | -80190.12 k-in |                 | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =   |  | 109.86 kip     |                 | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                   |  |                |                 |  |  |             |
| DC = FC  |  | 1.25           | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |

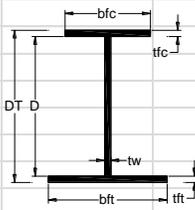


|   |   |        |       |  |                     |
|---|---|--------|-------|--|---------------------|
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>  |   |        |       |  | 6 – 41              |
| $\phi_f =$  |   | 1.0    | [ - ] | Factor de resistencia para flexión   |                     |
| $\phi_v =$  |   | 1.0    | [ - ] | Factor de resistencia para cortante  |                     |
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |   |        |       |  |                     |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   |   | -35.81 | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión  |                     |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   |   | -28.63 | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión   |                     |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |   |        |       |  | 6 – 132             |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |   |        |       |  | 6 – 132             |
| <u>Revisión 1</u>   |   |        |       |  |                     |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico   | 6 – 132             |
| $f_l \leq 0.6 f_{yt}$   |   |        |       |  |                     |
| $f_l =$   |   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300             |
| $R_h =$   |   | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124             |
| Por lo tanto  |   |        |       |  |                     |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   |   |        |       |  |                     |
| -35.81  | < | 50     | OK    | ksi  | CUMPLE LA CONDICIÓN |
| <u>Revisión 2</u>   |   |        |       |  |                     |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi_f F_{nc}$   |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión   |                     |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión  | 6 – 154             |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]   | 6 – 154             |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} =$  |   | 4.51   | [ - ] |  |                     |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   |   | 9.15   | [ - ] |  |                     |
| 4.51  | < | 9.15   | OK    |  | CUMPLE              |
| $Se \text{ usara } F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$   |   |        |       |  |                     |
| $R_b =$   |   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10 ]   | 6 – 125             |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |   |        |       |  |                     |
| Cálculo de $D_c$  |   | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]  | 6 – 328             |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  |   | -32.78 | in    |  |                     |
| Cálculo de $K$  |   | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]   | 6 – 121             |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   |   | 43.43  | [ - ] |  |                     |

|   |   |        |    |        |       |  |         |
|---|---|--------|----|--------|-------|--|---------|
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 126 |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$                                      |   |        |    | 137.27 | [ - ] |  |         |
| Se revisan las condiciones  |   |        |    |        |       |  |         |
| $\frac{D}{tw} =$  |   |        |    | 96.26  | [ - ] |  |         |
| $0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} =$   |   |        |    | 150.77 | [ - ] |  |         |
| 96.26   | < | 150.77 | OK |        |       | CUMPLE   |         |
| $\frac{2Dc}{tw} =$  |   |        |    | 87.64  | [ - ] |  |         |
| $\lambda_{rw} =$  |   |        |    | 137.27 | [ - ] |  |         |
| 87.64   | < | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE   |         |
| Se usara $R_b =$  |   |        |    | 1.0    | [ - ] |  |         |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   |        |    |        |       |  |         |
| $F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$   |   |        |    | 50     | ksi   |  |         |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi_f F_{nc}$                                       |   |        |    |        |       |  |         |
| -35.81  | < | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |
| <a href="#">Revisión 3</a>  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} \leq \phi_f F_{crw}$  |   |        |    |        |       | Asegura que no sufra pandeo el alma  | 6 – 132 |
| Cálculo de $F_{crw}$  |   |        |    |        |       | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ]   | 6 – 121 |
| $F_{crw} = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$                             |   |        |    | 122.32 | ksi   |  |         |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} \leq \phi_f F_{crw}$  |   |        |    |        |       |  |         |
| -35.81  | < | 122.32 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |   |        |    |        |       |  | 6 – 134 |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yt}$   |   |        |    |        |       | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado  | 6 – 134 |
| $f_l =$   |   |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| $R_h =$   |   |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124 |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yt}$   |   |        |    |        |       |  |         |
| -28.63  | < | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |

|   |   |         |       |       |   |         |
|---|---|---------|-------|-------|---|---------|
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b> |   |         |       |       |   |         |
|   | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         | [ - ] | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas críticas de construcción | 6 – 135 |
| Cálculo de $V_{cr}$                             |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ]                             | 6 – 165 |
|   | $V_n = V_{cr} = CV_p$   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165 |
|   | $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   | 1562.06 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]                                       | 6 – 165 |
| Cálculo de C                                    |   |         |       |       | Relacion de la resistencia al pandeo por corte  | 6 – 164 |
|   | $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |         |       |       |   |         |
| Se revisan las condiciones                      |   |         |       |       |   |         |
|   | $\frac{D}{t_w} =$   | 96.26   |       | [ - ] |   |         |
|   | $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   | 177.76  |       | [ - ] |   |         |
| 96.26   | <   | 177.76  | OK    |       | CUMPLE  |         |
| Se usara C=                                     |   |         |       |       | 1.0   | [ - ]   |
| Por lo tanto                                    |   |         |       |       |   |         |
|   | $V_n = V_{cr} = CV_p$   | 1562.06 |       | kip   |   |         |
|   | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         |       |       |   |         |
| 109.86  | <   | 1562.06 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |

**TM2, TM3, TM4, M = + 217.00 t\*m = + 18834.77 k-in, V = - 53.59 t = - 118.15 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |               |                 |  |  |  |             |
|--|---------------|-----------------|--|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM2, TM3 Y TM4 APOYADO</b>   |               |                 |  |  |  |             |
| <b>AASHTO LRFD 2012</b>  |               |                 |  |  |  |             |
| <b>Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]</b>  |               |                 |  |  |  |             |
|                          |               |                 |  |  |  |             |
| Variable/Fórmula   | Valor         | Unidades        | Comentarios  |  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |               |                 |  |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]   |               |                 |  |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta] No-compuesta  |               |                 |  |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |               |                 |  |  |  |             |
| tw =   | 0.75          | in              | Espesor del alma   |  |  |             |
| bfc =  | 16.0          | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |  |             |
| tfc =  | 1.77          | in              | Espesor del patín a compresión   |  |  |             |
| bft =  | 24.0          | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |  |             |
| tft =  | 1.77          | in              | Espesor del patín a tensión  |  |  |             |
| D =  | 72.0          | in              | Altura del alma  |  |  |             |
| DT =   | 75.6          | in              | Altura completa del perfil   |  |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>  |               |                 |  |  |  |             |
| AT =   | 124.73        | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |  |             |
| I <sub>x</sub> =   | 117522.74     | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |  |             |
| I <sub>y</sub> =   | 2650.42       | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |  |             |
| r <sub>x</sub> =   | 30.70         | in              | Radio de giro en el eje x  |  |  |             |
| r <sub>y</sub> =   | 4.61          | in              | Radio de giro en el eje y  |  |  |             |
| S <sub>xsup</sub> =  | 2799.23       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |  |             |
| S <sub>xinf</sub> =  | 3501.11       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |  |             |
| S <sub>ysup</sub> =  | 220.72        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |  |             |
| S <sub>yinf</sub> =  | 220.72        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |  |             |
| Z <sub>x</sub> =   | 3570.49       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |  |             |
| Z <sub>y</sub> =   | 377.44        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |  |             |
| J =  | 84.44         | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |  |             |
| Ca =   | 2534726.13    | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>   |               |                 |  |  |  |             |
| E =  | 29000.0       | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |  |             |
| F <sub>yf</sub> =  | 50.0          | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |  |             |
| F <sub>yw</sub> =  | 50.0          | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |  |             |
| F <sub>yc</sub> =  | 50.0          | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |  |             |
| F <sub>yt</sub> =  | 50.0          | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |  |             |
| F <sub>yr</sub> =  | 35.0          | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |  |             |
| nota: F <sub>yr</sub> = min ( 0.7F <sub>yc</sub> , F <sub>yw</sub> ), F <sub>yr</sub> ≥ 0.5F <sub>yc</sub> |               |                 |  |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>   |               |                 |  |  |  |             |
| M <sub>u</sub> =   | 18834.77 k-in |                 | Momento último del análisis del modelo   |  |  |             |
| V <sub>u</sub> =   | -118.15 kip   |                 | Cortante último del análisis del modelo  |  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>   |               |                 |  |  |  |             |
| DC = FC  | 1.25          | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>   |               |                 |  |  |  |             |
| φ <sub>f</sub> =   | 1.0           | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  |  | 6 – 41      |
| φ <sub>v</sub> =   | 1.0           | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |  |             |

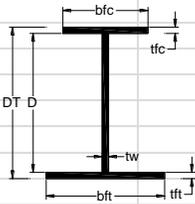
|   |   |        |       |   |                     |
|---|---|--------|-------|---|---------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |   |        |       |   |                     |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   |   | 8.41   | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión   |                     |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   |   | 6.72   | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión  |                     |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |   |        |       |   | 6 – 132             |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |   |        |       |   | 6 – 132             |
| <u>Revisión 1</u>   |   |        |       |   |                     |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  | 6 – 132             |
| $fl \leq 0.6 f_y t$   |   |        |       |   |                     |
| $fl =$  |   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300             |
| $R_h =$   |   | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]   | 6 – 124             |
| Por lo tanto  |   |        |       |   |                     |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  |   |        |       |   |                     |
| 8.41  | < | 50     | OK    | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN |
| <u>Revisión 2</u>   |   |        |       |   |                     |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi F_{nc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |                     |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión   | 6 – 154             |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  | 6 – 154             |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} =$  |   | 4.51   | [ - ] |   |                     |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   |   | 9.15   | [ - ] |   |                     |
| 4.51  | < | 9.15   | OK    |   | CUMPLE              |
| $Se usara F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$  |   |        |       |   |                     |
| $R_b =$   |   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 125             |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |   |        |       |   |                     |
| Cálculo de $D_c$  |   | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   | 6 – 328             |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  |   | -32.78 | in    |   |                     |
| Cálculo de $K$  |   | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]  | 6 – 121             |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   |   | 43.43  | [ - ] |   |                     |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   |   | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   | 6 – 126             |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   | 137.27 | [ - ] |   |                     |

|   |  |        |    |        |       |   |
|---|--|--------|----|--------|-------|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |       |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 96.26  | [ - ] |   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 150.77 | [ - ] |   |
| 96.26   | <  | 150.77 | OK |        |       | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 87.64  | [ - ] |   |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [ - ] |   |
| 87.64   | <  | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |       |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [ - ] |   |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi   |   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |       |   |
| 8.41  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 122.32 | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ] 6 – 121  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |       |   |
| 8.41  | <  | 122.32 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ] 6 – 124  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |       |   |
| 6.72  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |       |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [ - ]  | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas críticas de construcción 6 – 135   |

|   |   |         |       |       |   |                     |
|---|---|---------|-------|-------|---|---------------------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165             |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165             |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   | 1562.06 | kip   |       | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]           | 6 – 165             |
| Cálculo de C  |   |         | [ - ] | [ - ] | Relacion de la resistencia al pandeo por corte              | 6 – 164             |
| $\text{Si } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |       |       |   |                     |
| Se revisan las condiciones  |   |         |       |       |   |                     |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   | 96.26   | [ - ] |       |   |                     |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   | 177.76  | [ - ] |       |   |                     |
| 96.26   | < | 177.76  | OK    |       | CUMPLE  |                     |
| Se usara C=   |   |         |       | 1.0   | [ - ]   |                     |
| Por lo tanto  |   |         |       |       |   |                     |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   | 1562.06 | kip   |       |   |                     |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |       |       |   |                     |
| -118.15   | < | 1562.06 | OK    |       | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN |

Se presenta la revisión de los elementos estructurales en la etapa de construcción apoyada.

**TM2, TM3, TM4, M = - 306.97 t\*m = - 26643.82 k-in, V = + 25.33 t = + 55.84 kip**

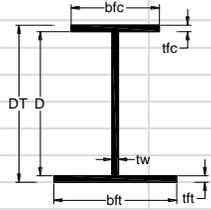
| MEMORIA DE CÁLCULO   |              |                 |  |  |             |
|--|--------------|-----------------|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM2, TM3 Y TM4 APOYADO</b>   |              |                 |  |  |             |
| AASHTO LRFD 2012   |              |                 |  |  |             |
| Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]                                   |              |                 |  |  |             |
|  |              |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   | Valor        | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |              |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]   |              |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]   | No-compuesta |                 |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |              |                 |  |  |             |
| tw =   | 0.75         | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  | 16.0         | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  | 1.77         | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  | 24.0         | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =  | 1.77         | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  | 72.0         | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =   | 75.6         | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>  |              |                 |  |  |             |
| AT =   | 124.73       | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =   | 117522.74    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =   | 2650.42      | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =   | 30.70        | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =   | 4.61         | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =  | 2799.23      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =  | 3501.11      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =  | 220.72       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =  | 220.72       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =   | 3570.49      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =   | 377.44       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  | 84.44        | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   | 2534726.13   | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>   |              |                 |  |  |             |
| E =  | 29000.0      | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =  | 35.0         | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: Fyr = min ( 0.7Fyc, Fyw), Fyr ≥ 0.5Fyc                                       |              |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>   |              |                 |  |  |             |
| Mu =   | -26643.82    | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =   | 55.84        | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                                   |              |                 |  |  |             |
| DC = FC  | 1.25         | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                                 |              |                 |  |  |             |
| φf =   | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φv =   | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |

|   |        |       |  |                                |
|---|--------|-------|--|--------------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |        |       |  |                                |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   | -11.90 | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión  |                                |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   | -9.51  | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión   |                                |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |        |       |  | 6 – 132                        |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |        |       |  | 6 – 132                        |
| <u>Revisión 1</u>   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico   |                                |
| $f_l \leq 0.6 f_{yt}$   |        |       |  |                                |
| $f_l =$   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] |                                |
| $R_h =$   | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  |                                |
| Por lo tanto  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   |        |       |  |                                |
| -11.90  | <      | 50    | OK   | ksi <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi_f F_{nc}$   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión   |                                |
| Cálculo de $F_{nc}$   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión  |                                |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]   |                                |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2 t_{fc}} =$   | 4.51   | [ - ] |  |                                |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   | 9.15   | [ - ] |  |                                |
| 4.51  | <      | 9.15  | OK   | CUMPLE                         |
| $Se usara F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$  |        |       |  |                                |
| $R_b =$   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   |                                |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |        |       |  |                                |
| Cálculo de $D_c$  | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]  |                                |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  | -32.78 | in    |  |                                |
| Cálculo de $K$  | [ - ]  | [ - ] | Coeficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]  |                                |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   | 43.43  | [ - ] |  |                                |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   |                                |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  | 137.27 | [ - ] |  |                                |

|   |  |        |    |        |       |   |         |
|---|--|--------|----|--------|-------|---|---------|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 96.26  | [ - ] |   |         |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 150.77 | [ - ] |   |         |
| 96.26   | <  | 150.77 | OK |        |       | CUMPLE  |         |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 87.64  | [ - ] |   |         |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [ - ] |   |         |
| 87.64   | <  | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE  |         |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |       |   |         |
|   |  |        |    | 1.0    | [ - ] |   |         |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi   |   |         |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |       |   |         |
| -11.90  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma   | 6 – 132 |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 122.32 | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexion [ AASHTO 6.10.1.9 ]  | 6 – 121 |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |       |   |         |
| -11.90  | <  | 122.32 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado   | 6 – 134 |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124 |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |       |   |         |
| -9.51   | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [ - ]  | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción   | 6 – 135 |

|   |   |         |       |       |   |         |
|---|---|---------|-------|-------|---|---------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165 |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165 |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   | 1562.06 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2           | 6 – 165 |
| Cálculo de C  |   |         | [ - ] | [ - ] | Relación de la resistencia al pandeo por corte              | 6 – 164 |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |       |       |   |         |
| Se revisan las condiciones  |   |         |       |       |   |         |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   | 96.26   |       | [ - ] |   |         |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   | 177.76  |       | [ - ] |   |         |
| 96.26   | < | 177.76  | OK    |       | CUMPLE  |         |
| Se usara C=   |   |         |       | 1.0   | [ - ]   |         |
| Por lo tanto  |   |         |       |       |   |         |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   | 1562.06 |       | kip   |   |         |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |       |       |   |         |
| 55.84   | < | 1562.06 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |

**TM2, TM3, TM4, M = + 105.78 t\*m = + 9181.30 k-in, V = - 31.38 t = - 69.18 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |              |                 |  |  |             |
|--|--------------|-----------------|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM2, TM3 Y TM4 APOYADO</b>   |              |                 |  |  |             |
| <b>AASHTO LRFD 2012</b>  |              |                 |  |  |             |
| <b>Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]</b>                            |              |                 |  |  |             |
|  |              |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   | Valor        | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |              |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]   |              |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta] No-compuesta                            |              |                 |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |              |                 |  |  |             |
| tw =   | 0.75         | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  | 16.0         | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  | 1.77         | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  | 24.0         | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =  | 1.77         | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  | 72.0         | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =   | 75.6         | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>  |              |                 |  |  |             |
| AT =   | 124.73       | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =   | 117522.74    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =   | 2650.42      | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =   | 30.70        | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =   | 4.61         | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =  | 2799.23      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =  | 3501.11      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =  | 220.72       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =  | 220.72       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =   | 3570.49      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =   | 377.44       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  | 84.44        | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   | 2534726.13   | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>   |              |                 |  |  |             |
| E =  | 29000.0      | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =  | 35.0         | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: Fyr = min ( 0.7Fyc, Fyw ), Fyr ≥ 0.5Fyc                                      |              |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>   |              |                 |  |  |             |
| Mu =   | 9181.30 k-in |                 | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =   | -69.18 kip   |                 | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                                   |              |                 |  |  |             |
| DC = FC  | 1.25         | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                                 |              |                 |  |  |             |
| φf =   | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φv =   | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |

|  |        |       |  |                                |
|--|--------|-------|--|--------------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>   |        |       |  |                                |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$  | 4.10   | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión  |                                |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$  | 3.28   | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión   |                                |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>   |        |       |  | 6 – 132                        |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>   |        |       |  | 6 – 132                        |
| <u>Revisión 1</u>  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F_y R_h$   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico   |                                |
| $f_l \leq 0.6 f_y t$   |        |       |  |                                |
| $f_l =$  | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] |                                |
| $R_h =$  | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  |                                |
| Por lo tanto   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F_y R_h$   |        |       |  |                                |
| 4.10   | <      | 50    | OK   | ksi <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi F_{nc}$  | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión   |                                |
| Cálculo de $F_{nc}$  | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión  |                                |
| $\lambda_f \leq \lambda_{pf}$  | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]   |                                |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2 t_{fc}} =$  | 4.51   | [ - ] |  |                                |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  | 9.15   | [ - ] |  |                                |
| 4.51   | <      | 9.15  | OK   | CUMPLE                         |
| $Se\ usara\ F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$   |        |       |  |                                |
| $R_b =$  | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   |                                |
| $Si\ \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \quad \text{ó} \quad \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |        |       |  |                                |
| Cálculo de $D_c$   | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]  |                                |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$   | -32.78 | in    |  |                                |
| Cálculo de $K$   | [ - ]  | [ - ] | Coeficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]  |                                |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$  | 43.43  | [ - ] |  |                                |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$  | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   |                                |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   | 137.27 | [ - ] |  |                                |

|   |  |        |    |        |       |   |
|---|--|--------|----|--------|-------|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |       |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 96.26  | [ - ] |   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 150.77 | [ - ] |   |
| 96.26   | <  | 150.77 | OK |        |       | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 87.64  | [ - ] |   |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [ - ] |   |
| 87.64   | <  | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |       |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [ - ] |   |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi   |   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |       |   |
| 4.10  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 122.32 | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexion [ AASHTO 6.10.1.9 ] 6 – 121  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |       |   |
| 4.10  | <  | 122.32 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ] 6 – 124  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |       |   |
| 3.28  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |       |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [ - ]  | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción 6 – 135   |

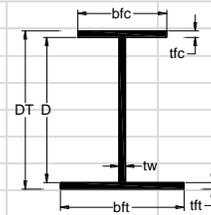
|   |   |         |       |       |   |         |
|---|---|---------|-------|-------|---|---------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165 |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165 |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   | 1562.06 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2           | 6 – 165 |
| Cálculo de C  |   |         | [ - ] | [ - ] | Relación de la resistencia al pandeo por corte              | 6 – 164 |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |       |       |   |         |
| Se revisan las condiciones  |   |         |       |       |   |         |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   | 96.26   |       | [ - ] |   |         |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   | 177.76  |       | [ - ] |   |         |
| 96.26   | < | 177.76  | OK    |       | CUMPLE  |         |
| Se usara C=   |   |         |       | 1.0   | [ - ]   |         |
| Por lo tanto  |   |         |       |       |   |         |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   | 1562.06 |       | kip   |   |         |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |       |       |   |         |
| -69.18  | < | 1562.06 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |

**A.5. TM5, TM6, TM7**

Se presenta la revisión de los elementos estructurales en la etapa de construcción en volado.

**TM5, TM6, TM7,  $M = - 156.04 \text{ t}\cdot\text{m} = - 13543.68 \text{ k}\cdot\text{in}$ ,  $V = + 24.54 \text{ t} = + 54.10 \text{ kip}$**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |  |            |                 |  |  |             |
|--|--|------------|-----------------|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM5, TM6 Y TM7 APOYADO</b>                             |  |            |                 |  |  |             |
| AASHTO LRFD 2012   |  |            |                 |  |  |             |
| Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]                   |  |            |                 |  |  |             |
|  |  |            |                 |  |  |             |
|  |  |            |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   |  | Valor      | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |  |            |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]                             |  |            |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]                         |  |            | No-compuesta    |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |  |            |                 |  |  |             |
| tw =   |  | 0.75       | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  |  | 16.0       | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  |  | 1.50       | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  |  | 24.0       | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =  |  | 1.50       | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  |  | 72.6       | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =   |  | 75.6       | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>                                    |  |            |                 |  |  |             |
| AT =   |  | 114.12     | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =   |  | 104136.31  | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =   |  | 2238.54    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =   |  | 30.21      | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =   |  | 4.43       | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =  |  | 2498.82    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =  |  | 3073.96    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =  |  | 186.42     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =  |  | 186.42     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =   |  | 3188.90    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =   |  | 318.78     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  |  | 54.98      | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   |  | 2156455.71 | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>                                   |  |            |                 |  |  |             |
| E =  |  | 29000.0    | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =  |  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =  |  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =  |  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =  |  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =  |  | 35.0       | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: $F_{yr} = \min ( 0.7F_{yc}, F_{yw} ), F_{yr} \geq 0.5F_{yc}$ |  |            |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>                           |  |            |                 |  |  |             |
| Mu =   |  | -13543.68  | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =   |  | 54.10      | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                   |  |            |                 |  |  |             |
| DC = FC  |  | 1.25       | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |



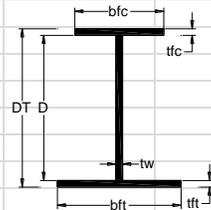
|  |   |        |       |  |                            |
|--|---|--------|-------|--|----------------------------|
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>   |   |        |       |  | 6 - 41                     |
| $\phi_f =$   |   | 1.0    | [ - ] | Factor de resistencia para flexión   |                            |
| $\phi_v =$   |   | 1.0    | [ - ] | Factor de resistencia para cortante  |                            |
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>   |   |        |       |  |                            |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$  |   | -6.78  | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión  |                            |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$  |   | -5.51  | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión   |                            |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>   |   |        |       |  | 6 - 132                    |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>   |   |        |       |  | 6 - 132                    |
| <u>Revisión 1</u>  |   |        |       |  |                            |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el limite elastico   | 6 - 132                    |
| $f_l \leq 0.6 f_{yt}$  |   |        |       |  |                            |
| $f_l =$  |   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexion lateral, en patines a tensión o compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 - 300                    |
| $R_h =$  |   | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 - 124                    |
| Por lo tanto   |   |        |       |  |                            |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$  |   |        |       |  |                            |
| -6.78  | < | 50     | OK    | ksi  | <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>  |   |        |       |  |                            |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi_f F_{nc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión   |                            |
| Cálculo de $F_{nc}$  |   |        |       |  |                            |
| $\text{Si } \lambda_f \leq \lambda_{pf}$   |   | [ - ]  | [ - ] | Resistencia a la flexion nominal en el patín a compresión  | 6 - 154                    |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} =$   |   | 5.34   | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]   | 6 - 154                    |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   | 9.15   | [ - ] |  |                            |
| 5.34   | < | 9.15   | OK    |  | CUMPLE                     |
| $Se\ usara\ F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$   |   |        |       |  |                            |
| $R_b =$  |   | [ - ]  | [ - ] | Factor caida de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10 ]   | 6 - 125                    |
| $Si \frac{D}{tw} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \quad \text{ó} \quad \frac{2Dc}{tw} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |   |        |       |  |                            |
| Cálculo de $D_c$   |   |        |       |  |                            |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$   |   | -33.21 | in    | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]  | 6 - 328                    |
| Cálculo de $K$   |   |        |       |  |                            |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{d} \right)^2} \right) =$  |   | 42.97  | [ - ] | Coficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]   | 6 - 121                    |

|   |   |        |    |        |       |  |         |
|---|---|--------|----|--------|-------|--|---------|
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 126 |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$                                      |   |        |    | 137.27 | [ - ] |  |         |
| Se revisan las condiciones  |   |        |    |        |       |  |         |
| $\frac{D}{tw} =$  |   |        |    | 97.00  | [ - ] |  |         |
| $0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} =$   |   |        |    | 149.98 | [ - ] |  |         |
| 97.00   | < | 149.98 | OK |        |       | CUMPLE   |         |
| $\frac{2Dc}{tw} =$  |   |        |    | 88.78  | [ - ] |  |         |
| $\lambda_{rw} =$  |   |        |    | 137.27 | [ - ] |  |         |
| 88.78   | < | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE   |         |
| Se usara $R_b =$  |   |        |    | 1.0    | [ - ] |  |         |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   |        |    |        |       |  |         |
| $F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$   |   |        |    | 50     | ksi   |  |         |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi F_{nc}$   |   |        |    |        |       |  |         |
| -6.78   | < | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |
| <a href="#">Revisión 3</a>  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} \leq \phi F_{crw}$  |   |        |    |        |       | Asegura que no sufra pandeo el alma  | 6 – 132 |
| Cálculo de $F_{crw}$  |   |        |    |        |       | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ]   | 6 – 121 |
| $F_{crw} = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$                             |   |        |    | 119.20 | ksi   |  |         |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} \leq \phi F_{crw}$  |   |        |    |        |       |  |         |
| -6.78   | < | 119.20 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |   |        |    |        |       |  | 6 – 134 |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F_h F_{yt}$   |   |        |    |        |       | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado  | 6 – 134 |
| $f_l =$   |   |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| $R_h =$   |   |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124 |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F_h F_{yt}$   |   |        |    |        |       |  |         |
| -5.51   | < | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |

|  |   |         |       |       |   |       |         |
|--|---|---------|-------|-------|---|-------|---------|
| *Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ] |   |         |       |       |   |       |         |
|  | $Vu \leq \phi_v Vcr$  |         | [ - ] | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas críticas de construcción |       | 6 - 135 |
| Cálculo de $Vcr$                         |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ]                             |       | 6 - 165 |
|  | $Vn = Vcr = CVp$  |         | [ - ] | [ - ] |   |       | 6 - 165 |
|  | $Vp = 0.58 Fyw D tw$  | 1574.02 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]                                       |       | 6 - 165 |
| Cálculo de C                             |   |         |       |       | Relación de la resistencia al pandeo por corte  |       | 6 - 164 |
|  | $Si \frac{D}{tw} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{Fyw}} \text{ se usara } C = 1.0$ |         |       |       |   |       |         |
| Se revisan las condiciones               |   |         |       |       |   |       |         |
|  | $\frac{D}{tw} =$  | 97.00   |       | [ - ] |   |       |         |
|  | $1.12 \sqrt{\frac{EK}{Fyw}} =$  | 176.82  |       | [ - ] |   |       |         |
| 97.00                                    | <   | 176.82  | OK    |       | CUMPLE  |       |         |
| Se usara C=                              |   |         |       |       | 1.0   | [ - ] |         |
| Por lo tanto                             |   |         |       |       |   |       |         |
|  | $Vn = Vcr = CVp$  | 1574.02 |       | kip   |   |       |         |
|  | $Vu \leq \phi_v Vcr$  |         |       |       |   |       |         |
| 54.10                                    | <   | 1574.02 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |       |         |

**TM5, TM6, TM7, M = + 115.14 t\*m = + 9993.71 k-in, V = - 15.39 t = - 33.93 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |            |                 |  |  |             |
|--|------------|-----------------|--|--|-------------|
| REVISIÓN TM5, TM6 Y TM7 APOYADO  |            |                 |  |  |             |
| AASHTO LRFD 2012   |            |                 |  |  |             |
| Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]   |            |                 |  |  |             |
|  |            |                 |  |  |             |
|  |            |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   | Valor      | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |            |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]   |            |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]   |            | No-compuesta    |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |            |                 |  |  |             |
| tw =   | 0.75       | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  | 16.0       | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  | 1.50       | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  | 24.0       | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =  | 1.50       | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  | 72.6       | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =   | 75.6       | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>  |            |                 |  |  |             |
| AT =   | 114.12     | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| I <sub>x</sub> =   | 104136.31  | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| I <sub>y</sub> =   | 2238.54    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| r <sub>x</sub> =   | 30.21      | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| r <sub>y</sub> =   | 4.43       | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| S <sub>xsup</sub> =  | 2498.82    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| S <sub>xinf</sub> =  | 3073.96    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| S <sub>ysup</sub> =  | 186.42     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| S <sub>yinf</sub> =  | 186.42     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Z <sub>x</sub> =   | 3188.90    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Z <sub>y</sub> =   | 318.78     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  | 54.98      | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   | 2156455.71 | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>   |            |                 |  |  |             |
| E =  | 29000.0    | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| F <sub>yf</sub> =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| F <sub>yw</sub> =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| F <sub>yc</sub> =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| F <sub>yt</sub> =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| F <sub>yr</sub> =  | 35.0       | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: F <sub>yr</sub> = min ( 0.7F <sub>yc</sub> , F <sub>yw</sub> ), F <sub>yr</sub> ≥ 0.5F <sub>yc</sub> |            |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>   |            |                 |  |  |             |
| M <sub>u</sub> =   | 9993.71    | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| V <sub>u</sub> =   | -33.93     | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>   |            |                 |  |  |             |
| DC = FC  | 1.25       | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>   |            |                 |  |  |             |
| φ <sub>f</sub> =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φ <sub>v</sub> =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |



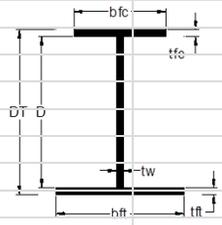
|   |   |        |       |   |                            |
|---|---|--------|-------|---|----------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |   |        |       |   |                            |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   |   | 5.00   | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión   |                            |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   |   | 4.06   | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión  |                            |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |   |        |       |   | 6 – 132                    |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |   |        |       |   | 6 – 132                    |
| <u>Revisión 1</u>   |   |        |       |   |                            |
| $f_{bu} + fl \leq \phi F R_h F_{yc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  | 6 – 132                    |
| $fl \leq 0.6 f_{yt}$  |   |        |       |   |                            |
| $fl =$  |   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión o compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300                    |
| $R_h =$   |   | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]   | 6 – 124                    |
| Por lo tanto  |   |        |       |   |                            |
| $f_{bu} + fl \leq \phi F R_h F_{yc}$  |   |        |       |   |                            |
| 5.00  | < | 50     | OK    | ksi   | <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>   |   |        |       |   |                            |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi F_{nc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |                            |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión   | 6 – 154                    |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  | 6 – 154                    |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2 t_{fc}} =$   |   | 5.34   | [ - ] |   |                            |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   |   | 9.15   | [ - ] |   |                            |
| 5.34  | < | 9.15   | OK    |   | <b>CUMPLE</b>              |
| $Se usara F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$  |   |        |       |   |                            |
| $R_b =$   |   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 125                    |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |   |        |       |   |                            |
| Cálculo de $D_c$  |   | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   | 6 – 328                    |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  |   | -33.21 | in    |   |                            |
| Cálculo de $K$  |   | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]  | 6 – 121                    |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   |   | 42.97  | [ - ] |   |                            |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   |   | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   | 6 – 126                    |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   | 137.27 | [ - ] |   |                            |

|   |  |        |    |        |       |   |
|---|--|--------|----|--------|-------|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |       |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 97.00  | [ - ] |   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 149.98 | [ - ] |   |
| 97.00   | <  | 149.98 | OK |        |       | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 88.78  | [ - ] |   |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [ - ] |   |
| 88.78   | <  | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |       |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [ - ] |   |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi   |   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |       |   |
| 5.00  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 119.20 | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ] 6 – 121  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |       |   |
| 5.00  | <  | 119.20 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ] 6 – 124  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |       |   |
| 4.06  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |       |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [ - ]  | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas críticas de construcción 6 – 135   |

|                            |   |         |       |       |   |   |
|----------------------------|---|---------|-------|-------|---|---|
| Cálculo de $V_{cr}$        |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165   |
|                            | $V_n = V_{cr} = CV_p$   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165   |
|                            | $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   | 1574.02 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]           | 6 – 165   |
| Cálculo de C               |   |         |       | [ - ] | [ - ]   | Relación de la resistencia al pandeo por corte<br>6 – 164 |
|                            | $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |         |       |       |   |   |
| Se revisan las condiciones |   |         |       |       |   |   |
|                            | $\frac{D}{t_w} =$   | 97.00   |       | [ - ] |   |   |
|                            | $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   | 176.82  |       | [ - ] |   |   |
| 97.00                      | <   | 176.82  | OK    |       | CUMPLE  |   |
| Se usara C=                |   |         |       | 1.0   | [ - ]   |   |
| Por lo tanto               |   |         |       |       |   |   |
|                            | $V_n = V_{cr} = CV_p$   | 1574.02 |       | kip   |   |   |
|                            | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         |       |       |   |   |
| -33.93                     | <   | 1574.02 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |   |

Se presenta la revisión de los elementos estructurales en la etapa de construcción apoyada.

**TM5, TM6, TM7, M = - 215.65 t\*m = - 18717.60 k-in, V = + 25.67 t = + 56.59 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |            |                 |  |  |  |             |
|--|------------|-----------------|--|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM5, TM6 Y TM7 APOYADO</b>   |            |                 |  |  |  |             |
| <b>AASHTO LRFD 2012</b>  |            |                 |  |  |  |             |
| <b>Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]</b>                            |            |                 |  |  |  |             |
|  |            |                 |  |  |  |             |
| Variable/Fórmula   | Valor      | Unidades        | Comentarios  |  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |            |                 |  |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]   |            |                 |  |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta] No-compuesta                            |            |                 |  |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |            |                 |  |  |  |             |
| tw =   | 0.75       | in              | Espesor del alma   |  |  |             |
| bfc =  | 16.0       | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |  |             |
| tfc =  | 1.50       | in              | Espesor del patín a compresión   |  |  |             |
| bft =  | 24.0       | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |  |             |
| tft =  | 1.50       | in              | Espesor del patín a tensión  |  |  |             |
| D =  | 72.6       | in              | Altura del alma  |  |  |             |
| DT =   | 75.6       | in              | Altura completa del perfil   |  |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>  |            |                 |  |  |  |             |
| AT =   | 114.12     | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |  |             |
| Ix =   | 104136.31  | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |  |             |
| Iy =   | 2238.54    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |  |             |
| rx =   | 30.21      | in              | Radio de giro en el eje x  |  |  |             |
| ry =   | 4.43       | in              | Radio de giro en el eje y  |  |  |             |
| Sxsup =  | 2498.82    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |  |             |
| Sxinf =  | 3073.96    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |  |             |
| Sysup =  | 186.42     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |  |             |
| Syinf =  | 186.42     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |  |             |
| Zx =   | 3188.90    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |  |             |
| Zy =   | 318.78     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |  |             |
| J =  | 54.98      | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |  |             |
| Ca =   | 2156455.71 | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>   |            |                 |  |  |  |             |
| E =  | 29000.0    | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |  |             |
| Fyf =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |  |             |
| Fyw =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |  |             |
| Fyc =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |  |             |
| Fyt =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |  |             |
| Fyr =  | 35.0       | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |  |             |
| nota: Fyr = min ( 0.7Fyc, Fyw), Fyr ≥ 0.5Fyc                                       |            |                 |  |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>   |            |                 |  |  |  |             |
| Mu =   | -18717.60  | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |  |             |
| Vu =   | 56.59      | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                                   |            |                 |  |  |  |             |
| DC = FC  | 1.25       | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                                 |            |                 |  |  |  |             |
| φr =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  |  | 6 – 41      |
| φv =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |  |             |

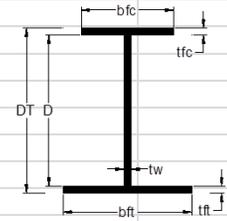
|   |        |       |  |                                |
|---|--------|-------|--|--------------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |        |       |  |                                |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   | -9.36  | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión  |                                |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   | -7.61  | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión   |                                |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |        |       |  | 6 – 132                        |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |        |       |  | 6 – 132                        |
| <u>Revisión 1</u>   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico   | 6 – 132                        |
| $f_l \leq 0.6 f_{yt}$   |        |       |  |                                |
| $f_l =$   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300                        |
| $R_h =$   | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124                        |
| Por lo tanto  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   |        |       |  |                                |
| -9.36   | <      | 50    | OK   | ksi <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi_f F_{nc}$   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión   |                                |
| Cálculo de $F_{nc}$   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión  | 6 – 154                        |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]   | 6 – 154                        |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} =$  | 5.34   | [ - ] |  |                                |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   | 9.15   | [ - ] |  |                                |
| 5.34  | <      | 9.15  | OK   | CUMPLE                         |
| $Se \text{ usara } F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$   |        |       |  |                                |
| $R_b =$   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   | 6 – 125                        |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |        |       |  |                                |
| Cálculo de $D_c$  | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]  | 6 – 328                        |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  | -33.21 | in    |  |                                |
| Cálculo de $K$  | [ - ]  | [ - ] | Coficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]   | 6 – 121                        |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   | 42.97  | [ - ] |  |                                |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 126                        |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  | 137.27 | [ - ] |  |                                |

|   |  |        |    |        |       |   |         |
|---|--|--------|----|--------|-------|---|---------|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 97.00  | [ - ] |   |         |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 149.98 | [ - ] |   |         |
| 97.00   | <  | 149.98 | OK |        |       | CUMPLE  |         |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 88.78  | [ - ] |   |         |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [ - ] |   |         |
| 88.78   | <  | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE  |         |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |       |   |         |
|   |  |        |    | 1.0    | [ - ] |   |         |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi   |   |         |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |       |   |         |
| -9.36   | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma   | 6 – 132 |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 119.20 | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ]  | 6 – 121 |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |       |   |         |
| -9.36   | <  | 119.20 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado   | 6 – 134 |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexion lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124 |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |       |   |         |
| -7.61   | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |       |   |         |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [ - ]  | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción   | 6 – 135 |

|   |   |         |       |       |   |                     |
|---|---|---------|-------|-------|---|---------------------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165             |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165             |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   | 1574.02 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]           | 6 – 165             |
| Cálculo de C  |   |         | [ - ] | [ - ] | Relación de la resistencia al pandeo por corte              | 6 – 164             |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |       |       |   |                     |
| Se revisan las condiciones  |   |         |       |       |   |                     |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   | 97.00   |       | [ - ] |   |                     |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   | 176.82  |       | [ - ] |   |                     |
| 97.00   | < | 176.82  | OK    |       | CUMPLE  |                     |
| Se usara C=   |   |         |       | 1.0   | [ - ]   |                     |
| Por lo tanto  |   |         |       |       |   |                     |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   | 1574.02 |       | kip   |   |                     |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |       |       |   |                     |
| 56.59   | < | 1574.02 | OK    |       | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN |

**TM5, TM6, TM7, M = + 129.29 t\*m = + 11221.88 k-in, V = - 27.85 t = - 61.40 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |               |                 |  |  |             |
|--|---------------|-----------------|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM5, TM6 Y TM7 APOYADO</b>                             |               |                 |  |  |             |
| <b>AASHTO LRFD 2012</b>  |               |                 |  |  |             |
| <b>Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]</b>            |               |                 |  |  |             |
|  |               |                 |  |  |             |
|  |               |                 |  |  |             |
|  |               |                 |  |  |             |
|  |               |                 |  |  |             |
|  |               |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   | Valor         | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |               |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]                             |               |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]                         |               | No-compuesta    |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |               |                 |  |  |             |
| tw =   | 0.75          | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  | 16.0          | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  | 1.50          | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  | 24.0          | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| ftt =  | 1.50          | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  | 72.6          | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =   | 75.6          | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>                                    |               |                 |  |  |             |
| AT =   | 114.12        | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =   | 104136.31     | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =   | 2238.54       | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =   | 30.21         | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =   | 4.43          | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =  | 2498.82       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =  | 3073.96       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =  | 186.42        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =  | 186.42        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =   | 3188.90       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =   | 318.78        | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  | 54.98         | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   | 2156455.71    | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>                                   |               |                 |  |  |             |
| E =  | 29000.0       | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =  | 50.0          | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =  | 50.0          | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =  | 50.0          | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =  | 50.0          | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =  | 35.0          | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: $F_{yr} = \min ( 0.7F_{yc}, F_{yw} ), F_{yr} \geq 0.5F_{yc}$ |               |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>                           |               |                 |  |  |             |
| Mu =   | 11221.88 k-in |                 | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =   | -61.40 kip    |                 | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                   |               |                 |  |  |             |
| DC = FC  | 1.25          | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                 |               |                 |  |  |             |
| φf =   | 1.0           | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φv =   | 1.0           | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |



|   |   |        |       |   |
|---|---|--------|-------|---|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |   |        |       |   |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   |   | 5.61   | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión   |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   |   | 4.56   | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión  |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |   |        |       |   |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |   |        |       |   |
| <u>Revisión 1</u>   |   |        |       |   |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  |
| $fl \leq 0.6 f_{yt}$  |   |        |       |   |
| $fl =$  |   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] |
| $R_h =$   |   | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]   |
| Por lo tanto  |   |        |       |   |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  |   |        |       |   |
| 5.61  | < | 50     | OK    | ksi <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b>  |
| <u>Revisión 2</u>   |   |        |       |   |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi F_{nc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión   |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} =$  |   | 5.34   | [ - ] |   |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   |   | 9.15   | [ - ] |   |
| 5.34  | < | 9.15   | OK    | CUMPLE  |
| $Se \text{ usara } F_{nc} = R_b R_h F_{yc}$   |   |        |       |   |
| $R_b =$   |   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$ |   |        |       |   |
| Cálculo de $D_c$  |   | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  |   | -33.21 | in    |   |
| Cálculo de $K$  |   | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]  |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   |   | 42.97  | [ - ] |   |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   |   | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   | 137.27 | [ - ] |   |

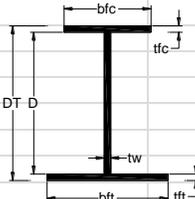
|   |  |        |    |        |       |   |
|---|--|--------|----|--------|-------|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |       |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$                                     |        |    | 97.00  | [ - ] |   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$                       |        |    | 149.98 | [ - ] |   |
| 97.00   | <  | 149.98 | OK |        |       | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$                                   |        |    | 88.78  | [ - ] |   |
|   | $\lambda rw =$                                       |        |    | 137.27 | [ - ] |   |
| 88.78   | <  | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |       |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [ - ] |   |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fnc = Rb Rh Fyc$                                    |        |    | 50     | ksi   |   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$               |        |    |        |       |   |
| 5.61  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |       |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$ |        |    | 119.20 | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ] 6 – 121  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$                               |        |    |        |       |   |
| 5.61  | <  | 119.20 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexion lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] 6 – 300 |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ] 6 – 124  |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |       |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$                        |        |    |        |       |   |
| 4.56  | <  | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |       |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$                                 |        |    | [ - ]  | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción 6 – 135   |

|   |   |         |       |       |   |                     |
|---|---|---------|-------|-------|---|---------------------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165             |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165             |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   | 1574.02 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]           | 6 – 165             |
| Cálculo de C  |   |         | [ - ] | [ - ] | Relación de la resistencia al pandeo por corte              | 6 – 164             |
| $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |       |       |   |                     |
| Se revisan las condiciones  |   |         |       |       |   |                     |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   | 97.00   |       | [ - ] |   |                     |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   | 176.82  |       | [ - ] |   |                     |
| 97.00   | < | 176.82  | OK    |       | CUMPLE  |                     |
| Se usara C=   |   |         |       | 1.0   | [ - ]   |                     |
| Por lo tanto  |   |         |       |       |   |                     |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   | 1574.02 |       | kip   |   |                     |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |       |       |   |                     |
| -61.40  | < | 1574.02 | OK    |       | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN |

**A.6. TM8-TM15**

Se presenta la revisión de los elementos estructurales en la etapa de construcción en volado.

**TM8-TM15,  $M = - 225.15 \text{ t} \cdot \text{m} = - 19542.16 \text{ k-in}$ ,  $V = + 23.09 \text{ t} = + 50.90 \text{ kip}$**

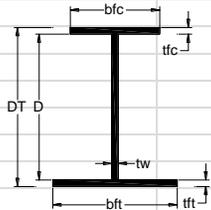
| MEMORIA DE CÁLCULO   |            |                 |  |  |             |  |
|--|------------|-----------------|--|--|-------------|--|
| Variable/Fórmula   | Valor      | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |  |
| <b>REVISIÓN TM8-TM15 APOYADO</b>                                   |            |                 |  |  |             |  |
| <b>AASHTO LRFD 2012</b>  |            |                 |  |  |             |  |
| <b>Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]</b>            |            |                 |  |  |             |  |
|  |            |                 |                  |  |             |  |
| <b>*General</b>  |            |                 |  |  |             |  |
| Región a momento [Positivo / Negativo]                             |            |                 |  |  |             |  |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]      No-compuesta       |            |                 |  |  |             |  |
| <b>*Geometría</b>  |            |                 |  |  |             |  |
| tw =   | 0.75       | in              | Espesor del alma   |  |             |  |
| bfc =  | 16.0       | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |  |
| tfc =  | 0.75       | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |  |
| bft =  | 24.0       | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |  |
| tft =  | 1.50       | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |  |
| D =  | 73.3       | in              | Altura del alma  |  |             |  |
| DT =   | 75.6       | in              | Altura completa del perfil   |  |             |  |
| <b>*Propiedades geométricas</b>                                    |            |                 |  |  |             |  |
| AT =   | 84.76      | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |  |
| Ix =   | 65472.05   | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |  |
| Iy =   | 1375.14    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |  |
| rx =   | 27.79      | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |  |
| ry =   | 4.03       | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |  |
| Sxsup =  | 1617.41    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |  |
| Sxinf =  | 1866.80    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |  |
| Sysup =  | 114.52     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |  |
| Syinf =  | 114.52     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |  |
| Zx =   | 2380.26    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |  |
| Zy =   | 195.83     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |  |
| J =  | 31.63      | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |  |
| Ca =   | 1100120.25 | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |  |
| <b>*Propiedades del material</b>                                   |            |                 |  |  |             |  |
| E =  | 29000.0    | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |  |
| Fyf =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |  |
| Fyw =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |  |
| Fyc =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |  |
| Fyt =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |  |
| Fyr =  | 35.0       | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |  |
| nota: $F_{yr} = \min ( 0.7F_{yc}, F_{yw} ), F_{yr} \geq 0.5F_{yc}$ |            |                 |  |  |             |  |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>                           |            |                 |  |  |             |  |
| Mu =   | -19542.16  | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |  |
| Vu =   | 50.90      | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |  |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                   |            |                 |  |  |             |  |
| DC = FC  | 1.25       | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |  |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                 |            |                 |  |  |             |  |
| $\phi_f$ =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |  |
| $\phi_v$ =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |  |

|   |        |       |  |                                |
|---|--------|-------|--|--------------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |        |       |  |                                |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{Sx_{sup}} \right) =$   | -15.10 | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión  |                                |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{Sx_{inf}} \right) =$   | -13.09 | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión   |                                |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |        |       |  | 6 – 132                        |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |        |       |  | 6 – 132                        |
| <u>Revisión 1</u>   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico   | 6 – 132                        |
| $f_l \leq 0.6 f_{yt}$   |        |       |  |                                |
| $f_l =$   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300                        |
| $R_h =$   | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124                        |
| Por lo tanto  |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi_f R_h F_{yc}$   |        |       |  |                                |
| -15.10  | <      | 50    | OK   | ksi <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>   |        |       |  |                                |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi_f F_{nc}$   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión   |                                |
| Cálculo de $F_{nc}$   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión  | 6 – 154                        |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]   | 6 – 154                        |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} =$  | 10.68  | [ - ] |  |                                |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   | 9.15   | [ - ] |  |                                |
| 10.68   | <      | 9.15  | NO   | NO CUMPLE                      |
| Por lo tanto  |        |       |  |                                |
| $Se \text{ usara } F_{nc} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left( \frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_b R_h F_{yc}$ |        |       |  |                                |
| Donde   |        |       |  |                                |
| $\lambda_{rf} = 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}} =$   | 16.12  | [ - ] | Límite de la relación de esbeltez para patín no compacto   | 6 – 154                        |
| $R_b =$   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   | 6 – 125                        |
| $Si \frac{D}{tw} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2D_c}{tw} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$   |        |       |  |                                |
| Cálculo de $D_c$  | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]  | 6 – 328                        |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  | -34.72 | in    |  |                                |
| Cálculo de $K$  | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [ AASHTO 6.10.1.9 ]   | 6 – 121                        |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   | 40.11  | [ - ] |  |                                |
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 126                        |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  | 137.27 | [ - ] |  |                                |

|   |  |        |    |        |   |
|---|--|--------|----|--------|---|
| Se revisan las condiciones  |  |        |    |        |   |
|   | $\frac{D}{tw} =$   |        |    | 98.00  | [ - ]   |
|   | $0.95 \sqrt{\frac{EK}{Fyc}} =$   |        |    | 144.90 | [ - ]   |
| 98.00   | <  | 144.90 | OK |        | CUMPLE  |
|   | $\frac{2Dc}{tw} =$   |        |    | 92.84  | [ - ]   |
|   | $\lambda rw =$   |        |    | 137.27 | [ - ]   |
| 92.84   | <  | 137.27 | OK |        | CUMPLE  |
| Se usara Rb =   |  |        |    |        |   |
|   |  |        |    | 1.0    | [ - ]   |
| Cálculo de Fnc  |  |        |    |        |   |
|   | $Fnc = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{Fyr}{Rh Fyc} \right) \left( \frac{\lambda f - \lambda pf}{\lambda rf - \lambda pf} \right) \right] Rb Rh Fyc =$ |        |    | 46.70  | ksi   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |   |
|   | $fbu + \frac{1}{3} fl \leq \phi f Fnc$   |        |    |        |   |
| -15.10  | <  | 46.70  | OK | ksi    | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <u>Revisión 3</u>   |  |        |    |        |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$   |        |    | [ - ]  | [ - ]   |
|   |  |        |    |        | Asegura que no sufra pandeo el alma   |
|   |  |        |    |        | 6 – 132   |
| Cálculo de Fcrw   |  |        |    |        |   |
|   | $Fcrw = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$   |        |    | 109.01 | ksi   |
|   |  |        |    |        | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ]  |
|   |  |        |    |        | 6 – 121   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |   |
|   | $fbu \leq \phi f Fcrw$   |        |    |        |   |
| -15.10  | <  | 109.01 | OK | ksi    | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b> |  |        |    |        |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$  |        |    | [ - ]  | [ - ]   |
|   |  |        |    |        | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado   |
|   |  |        |    |        | 6 – 134   |
| fl =  |  |        |    | 0.0    | ksi   |
|   |  |        |    |        | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] |
|   |  |        |    |        | 6 – 300   |
| Rh =  |  |        |    | 1.0    | [ - ]   |
|   |  |        |    |        | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  |
|   |  |        |    |        | 6 – 124   |
| Por lo tanto  |  |        |    |        |   |
|   | $fbu + fl \leq \phi f Rh Fyt$  |        |    |        |   |
| -13.09  | <  | 50     | OK | ksi    | CUMPLE LA CONDICIÓN   |
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b>                                     |  |        |    |        |   |
|   | $Vu \leq \phi v Vcr$   |        |    | [ - ]  | kip   |
|   |  |        |    |        | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas criticas de construcción   |
|   |  |        |    |        | 6 – 135   |

|   |   |         |       |       |   |         |
|---|---|---------|-------|-------|---|---------|
| Cálculo de $V_{cr}$   |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo<br>[ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ] | 6 – 165 |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165 |
| $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |   | 1590.25 | kip   |       | Fuerza cortante plástico [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2 ]         | 6 – 165 |
| Cálculo de C  |   |         | [ - ] | [ - ] | Relación de la resistencia al pandeo por corte              | 6 – 164 |
| $\text{Si } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |   |         |       |       |   |         |
| Se revisan las condiciones  |   |         |       |       |   |         |
| $\frac{D}{t_w} =$   |   | 98.00   | [ - ] |       |   |         |
| $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |   | 170.83  | [ - ] |       |   |         |
| 98.00   | < | 170.83  | OK    |       | CUMPLE  |         |
| Se usara C=   |   |         | 1.0   | [ - ] |   |         |
| Por lo tanto  |   |         |       |       |   |         |
| $V_n = V_{cr} = CV_p$   |   | 1590.25 | kip   |       |   |         |
| $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |   |         |       |       |   |         |
| 50.90   | < | 1590.25 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |

TM8-TM15,  $M = + 109.25 \text{ t} \cdot \text{m} = + 9482.48 \text{ k-in}$ ,  $V = - 25.53 \text{ t} = - 56.28 \text{ kip}$

| MEMORIA DE CÁLCULO   |            |                 |  |  |             |
|--|------------|-----------------|--|--|-------------|
| <b>REVISIÓN TM8-TM15 APOYADO</b>   |            |                 |  |  |             |
| <b>AASHTO LRFD 2012</b>  |            |                 |  |  |             |
| <b>Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]</b>                            |            |                 |  |  |             |
|  |            |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   | Valor      | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |            |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]   |            |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta] No-compuesta                            |            |                 |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |            |                 |  |  |             |
| tw =   | 0.75       | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  | 16.0       | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  | 0.75       | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  | 24.0       | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =  | 1.50       | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  | 73.3       | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =   | 75.6       | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>  |            |                 |  |  |             |
| AT =   | 84.76      | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| I <sub>x</sub> =   | 65472.05   | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| I <sub>y</sub> =   | 1375.14    | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| r <sub>x</sub> =   | 27.79      | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| r <sub>y</sub> =   | 4.03       | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| S <sub>xsup</sub> =  | 1617.41    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| S <sub>xinf</sub> =  | 1866.80    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| S <sub>ysup</sub> =  | 114.52     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| S <sub>yinf</sub> =  | 114.52     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Z <sub>x</sub> =   | 2380.26    | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Z <sub>y</sub> =   | 195.83     | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  | 31.63      | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   | 1100120.25 | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>   |            |                 |  |  |             |
| E =  | 29000.0    | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| F <sub>yf</sub> =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| F <sub>yw</sub> =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| F <sub>yc</sub> =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| F <sub>yt</sub> =  | 50.0       | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| F <sub>yr</sub> =  | 35.0       | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: $F_{yr} = \min ( 0.7F_{yc}, F_{yw} ), F_{yr} \geq 0.5F_{yc}$                 |            |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>   |            |                 |  |  |             |
| M <sub>u</sub> =   | 9482.48    | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| V <sub>u</sub> =   | -56.28     | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                                   |            |                 |  |  |             |
| DC = FC  | 1.25       | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                                 |            |                 |  |  |             |
| φ <sub>f</sub> =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φ <sub>v</sub> =   | 1.0        | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |

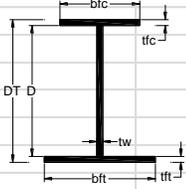
|   |   |        |       |   |                            |
|---|---|--------|-------|---|----------------------------|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |   |        |       |   |                            |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   |   | 7.33   | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión   |                            |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   |   | 6.35   | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión  |                            |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |   |        |       |   | 6 – 132                    |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |   |        |       |   | 6 – 132                    |
| <u>Revisión 1</u>   |   |        |       |   |                            |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  | 6 – 132                    |
| $fl \leq 0.6 f_{yt}$  |   |        |       |   |                            |
| fl =  |   | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300                    |
| Rh =  |   | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124                    |
| Por lo tanto  |   |        |       |   |                            |
| $f_{bu} + fl \leq \phi f R_h F_{yc}$  |   |        |       |   |                            |
| 7.33  | < | 50     | OK    | ksi   | <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b> |
| <u>Revisión 2</u>   |   |        |       |   |                            |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi F_{nc}$  |   | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |                            |
| Cálculo de Fnc  |   | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexion nominal en el patín a compresión   | 6 – 154                    |
| Si $\lambda f \leq \lambda p f$   |   | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  | 6 – 154                    |
| $\lambda f = \frac{b_{fc}}{2 t_{fc}} =$   |   | 10.68  | [ - ] |   |                            |
| $\lambda p f = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   | 9.15   | [ - ] |   |                            |
| 10.68   | < | 9.15   | NO    |   | NO CUMPLE                  |
| Por lo tanto  |   |        |       |   |                            |
| $Se\ usara\ F_{nc} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left( \frac{\lambda f - \lambda p f}{\lambda r f - \lambda p f} \right) \right] R_b R_h F_{yc}$ |   |        |       |   |                            |
| Donde   |   |        |       |   |                            |
| $\lambda r f = 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}} =$  |   | 16.12  | [ - ] | Límite de la relación de esbeltez para patín no compacto  | 6 – 154                    |
| Rb =  |   | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 125                    |
| Si $\frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}}$ ó $\frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda r w$ se usara $R_b = 1.0$  |   |        |       |   |                            |
| Cálculo de Dc   |   | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   | 6 – 328                    |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t_{fc} =$  |   | -34.72 | in    |   |                            |
| Cálculo de K  |   | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [ AASHTO 6.10.1.9 ]  | 6 – 121                    |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{d} \right)^2} \right) =$   |   | 40.11  | [ - ] |   |                            |

|   |   |        |    |        |       |  |         |
|---|---|--------|----|--------|-------|--|---------|
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 126 |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   |        |    | 137.27 | [ - ] |  |         |
| Se revisan las condiciones  |   |        |    |        |       |  |         |
| $\frac{D}{tw} =$  |   |        |    | 98.00  | [ - ] |  |         |
| $0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} =$   |   |        |    | 144.90 | [ - ] |  |         |
| 98.00   | < | 144.90 | OK |        |       | CUMPLE   |         |
| $\frac{2Dc}{tw} =$  |   |        |    | 92.84  | [ - ] |  |         |
| $\lambda_{rw} =$  |   |        |    | 137.27 | [ - ] |  |         |
| 92.84   | < | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE   |         |
| Se usara $R_b =$  |   |        |    | 1.0    | [ - ] |  |         |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   |        |    | 46.70  | ksi   |  |         |
| $F_{nc} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left( \frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_b R_h F_{yc} =$ |   |        |    |        |       |  |         |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi F_{nc}$   |   |        |    |        |       |  |         |
| 7.33  | < | 46.70  | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |
| <u>Revisión 3</u>   |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} \leq \phi F_{crw}$  |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma  | 6 – 132 |
| Cálculo de $F_{crw}$  |   |        |    | [ - ]  | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ]   | 6 – 121 |
| $F_{crw} = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$   |   |        |    | 109.01 | ksi   |  |         |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} \leq \phi F_{crw}$  |   |        |    |        |       |  |         |
| 7.33  | < | 109.01 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b>   |   |        |    |        |       |  | 6 – 134 |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F_{yt}$   |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado  | 6 – 134 |
| $f_l =$   |   |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| $R_h =$   |   |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124 |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F_{yt}$   |   |        |    |        |       |  |         |
| 6.35  | < | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |

|   |   |         |       |       |   |         |
|---|---|---------|-------|-------|---|---------|
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b> |   |         |       |       |   |         |
|   | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         | [ - ] | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas críticas de construcción | 6 – 135 |
| Cálculo de $V_{cr}$                             |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ]                                | 6 – 165 |
|   | $V_n = V_{cr} = CV_p$   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 – 165 |
|   | $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   | 1590.25 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2 ]                                     | 6 – 165 |
| Cálculo de C                                    |   |         |       |       | Relación de la resistencia al pandeo por corte  | 6 – 164 |
|   | $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |         |       |       |   |         |
| Se revisan las condiciones                      |   |         |       |       |   |         |
|   | $\frac{D}{t_w} =$   | 98.00   | [ - ] |       |   |         |
|   | $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   | 170.83  | [ - ] |       |   |         |
| 98.00   | <   | 170.83  | OK    |       | CUMPLE  |         |
| Se usara C=                                     |   |         |       |       | 1.0   | [ - ]   |
| Por lo tanto                                    |   |         |       |       |   |         |
|   | $V_n = V_{cr} = CV_p$   | 1590.25 |       | kip   |   |         |
|   | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         |       |       |   |         |
| -56.28  | <   | 1590.25 | OK    | kip   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |

Se presenta la revisión de los elementos estructurales en la etapa de construcción apoyada.

**TM8-TM15, M = - 174.51 t\*m = - 15146.80 k-in, V = + 16.27 t = + 35.87 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO  |  |              |                 |  |  |             |
|---|--|--------------|-----------------|--|--|-------------|
| AASHTO LRFD 2012  |  |              |                 |  |  |             |
| Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]                                    |  |              |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula  |  | Valor        | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
|  |  |              |                 |  |  |             |
| <b>*General</b>   |  |              |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]  |  |              |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]  |  | No-compuesta |                 |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>   |  |              |                 |  |  |             |
| tw =  |  | 0.75         | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =   |  | 16.0         | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =   |  | 0.75         | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =   |  | 24.0         | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =   |  | 1.50         | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =   |  | 73.3         | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =  |  | 75.6         | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>   |  |              |                 |  |  |             |
| AT =  |  | 84.76        | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =  |  | 65472.05     | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =  |  | 1375.14      | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =  |  | 27.79        | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =  |  | 4.03         | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =   |  | 1617.41      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =   |  | 1866.80      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =   |  | 114.52       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =   |  | 114.52       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =  |  | 2380.26      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =  |  | 195.83       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =   |  | 31.63        | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =  |  | 1100120.25   | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>  |  |              |                 |  |  |             |
| E =   |  | 29000.0      | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =   |  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =   |  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =   |  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =   |  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =   |  | 35.0         | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: Fyr = min ( 0.7Fyc, Fyw), Fyr ≥ 0.5Fyc  |  |              |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>  |  |              |                 |  |  |             |
| Mu =  |  | -15146.80    | k-in            | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =  |  | 35.87        | kip             | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                                    |  |              |                 |  |  |             |
| DC = FC   |  | 1.25         | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                                  |  |              |                 |  |  |             |
| φf =  |  | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φv =  |  | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |

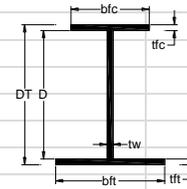
|   |   |      |        |       |   |
|---|---|------|--------|-------|---|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |   |      |        |       |   |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   |   |      | -11.71 | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión   |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   |   |      | -10.14 | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión  |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |   |      |        |       |   |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriestrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |   |      |        |       |   |
| <u>Revisión 1</u>   |   |      |        |       |   |
| $f_{bu} + fl \leq \phi_f R_h F_{yc}$  |   |      | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  |
| $fl \leq 0.6 f_{yt}$  |   |      |        |       |   |
| fl =  |   |      | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriestrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] |
| Rh =  |   |      | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  |
| Por lo tanto  |   |      |        |       |   |
| $f_{bu} + fl \leq \phi_f R_h F_{yc}$  |   |      |        |       |   |
| -11.71  | < | 50   | OK     | ksi   | <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b>  |
| <u>Revisión 2</u>   |   |      |        |       |   |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi_f F_{nc}$  |   |      | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |
| Calculo de Fnc  |   |      | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión   |
| $Si \lambda_f \leq \lambda_{pf}$  |   |      | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  |
| $\lambda_f = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} =$  |   |      | 10.68  | [ - ] |   |
| $\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$   |   |      | 9.15   | [ - ] |   |
| 10.68   | < | 9.15 | NO     |       | NO CUMPLE   |
| Por lo tanto  |   |      |        |       |   |
| $Se \text{ usara } F_{nc} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left( \frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_b R_h F_{yc}$ |   |      |        |       |   |
| Donde   |   |      |        |       |   |
| $\lambda_{rf} = 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}} =$   |   |      | 16.12  | [ - ] | Límite de la relación de esbeltez para patín no compacto  |
| Rb =  |   |      | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  |
| $Si \frac{D}{tw} \leq 0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} \text{ ó } \frac{2Dc}{tw} \leq \lambda_{rw} \text{ se usara } R_b = 1.0$  |   |      |        |       |   |
| Cálculo de Dc   |   |      | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   |
| $Dc = \left( \frac{-fc}{ fc  + ft} \right) d - t_{fc} =$  |   |      | -34.72 | in    |   |
| Cálculo de K  |   |      | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]  |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{Dc}{D} \right)^2} \right) =$  |   |      | 40.11  | [ - ] |   |

|   |   |        |    |        |       |   |         |
|---|---|--------|----|--------|-------|---|---------|
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]   | 6 – 126 |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   |        |    | 137.27 | [ - ] |   |         |
| Se revisan las condiciones  |   |        |    |        |       |   |         |
| $\frac{D}{tw} =$  |   |        |    | 98.00  | [ - ] |   |         |
| $0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} =$   |   |        |    | 144.90 | [ - ] |   |         |
| 98.00   | < | 144.90 | OK |        |       | CUMPLE  |         |
| $\frac{2Dc}{tw} =$  |   |        |    | 92.84  | [ - ] |   |         |
| $\lambda_{rw} =$  |   |        |    | 137.27 | [ - ] |   |         |
| 92.84   | < | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE  |         |
| Se usara $R_b =$  |   |        |    | 1.0    | [ - ] |   |         |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   |        |    |        |       |   |         |
| $F_{nc} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left( \frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_b R_h F_{yc} =$ |   |        |    | 46.70  | ksi   |   |         |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |   |         |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi F_{nc}$  |   |        |    |        |       |   |         |
| -11.71  | < | 46.70  | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <u>Revisión 3</u>   |   |        |    |        |       |   |         |
| $f_{bu} \leq \phi F_{crw}$  |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma   | 6 – 132 |
| Cálculo de $F_{crw}$  |   |        |    |        |       |   |         |
| $F_{crw} = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$   |   |        |    | 109.01 | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ]  | 6 – 121 |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |   |         |
| $f_{bu} \leq \phi F_{crw}$  |   |        |    |        |       |   |         |
| -11.71  | < | 109.01 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b>   |   |        |    |        |       |   |         |
| $f_{bu} + fl \leq \phi F_{yt}$  |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado   | 6 – 134 |
| $fl =$  |   |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| $R_h =$   |   |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]   | 6 – 124 |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |   |         |
| $f_{bu} + fl \leq \phi F_{yt}$  |   |        |    |        |       |   |         |
| -10.14  | < | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN   |         |

|   |   |         |         |       |   |  |         |
|---|---|---------|---------|-------|---|--|---------|
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b> |   |         |         |       |   |  |         |
|   | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         | [ - ]   | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas críticas de construcción |  | 6 – 135 |
| Cálculo de $V_{cr}$                             |   |         |         |       | Cortante resistente al pandeo [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ]                                |  | 6 – 165 |
|   | $V_n = V_{cr} = CV_p$   |         | [ - ]   | [ - ] |   |  | 6 – 165 |
|   | $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   |         | 1590.25 | kip   | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]                                       |  | 6 – 165 |
| Cálculo de C                                    |   |         | [ - ]   | [ - ] | Relación de la resistencia al pandeo por corte  |  | 6 – 164 |
|   | $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |         |         |       |   |  |         |
| Se revisan las condiciones                      |   |         |         |       |   |  |         |
|   | $\frac{D}{t_w} =$   |         | 98.00   | [ - ] |   |  |         |
|   | $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   |         | 170.83  | [ - ] |   |  |         |
| 98.00   | <   | 170.83  | OK      |       | CUMPLE  |  |         |
| Se usara C=                                     |   |         | 1.0     | [ - ] |   |  |         |
| Por lo tanto                                    |   |         |         |       |   |  |         |
|   | $V_n = V_{cr} = CV_p$   |         | 1590.25 | kip   |   |  |         |
|   | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         |         |       |   |  |         |
| 35.87   | <   | 1590.25 | OK      | kip   | <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b>  |  |         |

**TM8-TM15, M = + 46.51 t\*m = + 4036.89 k-in, V = - 21.71 t = - 47.86 kip**

| MEMORIA DE CÁLCULO   |  |              |                 |  |  |             |
|--|--|--------------|-----------------|--|--|-------------|
| AASHTO LRFD 2012   |  |              |                 |  |  |             |
| Revisión por Constructibilidad [ AASHTO 6.10.3 ]                   |  |              |                 |  |  |             |
|  |  |              |                 |  |  |             |
| Variable/Fórmula   |  | Valor        | Unidades        | Comentarios  |  | Pág. AASHTO |
| <b>*General</b>  |  |              |                 |  |  |             |
| Región a momento [Positivo / Negativo]                             |  |              |                 |  |  |             |
| Tipo de sección [Compuesta / No-compuesta]                         |  | No-compuesta |                 |  |  |             |
| <b>*Geometría</b>  |  |              |                 |  |  |             |
| tw =   |  | 0.75         | in              | Espesor del alma   |  |             |
| bfc =  |  | 16.0         | in              | Ancho completo del patín a compresión  |  |             |
| tfc =  |  | 0.75         | in              | Espesor del patín a compresión   |  |             |
| bft =  |  | 24.0         | in              | Ancho completo del patín a tensión   |  |             |
| tft =  |  | 1.50         | in              | Espesor del patín a tensión  |  |             |
| D =  |  | 73.3         | in              | Altura del alma  |  |             |
| DT =   |  | 75.6         | in              | Altura completa del perfil   |  |             |
| <b>*Propiedades geométricas</b>                                    |  |              |                 |  |  |             |
| AT =   |  | 84.76        | in <sup>2</sup> | Área total de la sección   |  |             |
| Ix =   |  | 65472.05     | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje x   |  |             |
| Iy =   |  | 1375.14      | in <sup>4</sup> | Momento de inercia en el eje y   |  |             |
| rx =   |  | 27.79        | in              | Radio de giro en el eje x  |  |             |
| ry =   |  | 4.03         | in              | Radio de giro en el eje y  |  |             |
| Sxsup =  |  | 1617.41      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje x  |  |             |
| Sxinf =  |  | 1866.80      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje x  |  |             |
| Sysup =  |  | 114.52       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico superior en el eje y  |  |             |
| Syinf =  |  | 114.52       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección elástico inferior en el eje y  |  |             |
| Zx =   |  | 2380.26      | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje x   |  |             |
| Zy =   |  | 195.83       | in <sup>3</sup> | Módulo de sección plástico en el eje y   |  |             |
| J =  |  | 31.63        | in <sup>4</sup> | Constante de torsión de Saint Venant   |  |             |
| Ca =   |  | 1100120.25   | in <sup>6</sup> | Constante de torsión por Alabeo  |  |             |
| <b>*Propiedades del material</b>                                   |  |              |                 |  |  |             |
| E =  |  | 29000.0      | ksi             | Módulo de Young del acero  |  |             |
| Fyf =  |  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima de los patines  |  |             |
| Fyw =  |  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia mínima del alma  |  |             |
| Fyc =  |  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a compresión   |  |             |
| Fyt =  |  | 50.0         | ksi             | Resistencia de fluencia del patín a tensión  |  |             |
| Fyr =  |  | 35.0         | ksi             | Esfuerzo en el patín a compresión al inicio de la flexión nominal dentro de la sección transversal |  |             |
| nota: $F_{yr} = \min ( 0.7F_{yc}, F_{yw} ), F_{yr} \geq 0.5F_{yc}$ |  |              |                 |  |  |             |
| <b>*Elementos mecánicos del análisis</b>                           |  |              |                 |  |  |             |
| Mu =   |  | 4036.89 k-in |                 | Momento último del análisis del modelo   |  |             |
| Vu =   |  | -47.86 kip   |                 | Cortante último del análisis del modelo  |  |             |
| <b>*Factor de carga [ AASHTO Tabla 3.4.1-2 ]</b>                   |  |              |                 |  |  |             |
| DC = FC  |  | 1.25         | [ - ]           | Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales                         |  | 3 – 18      |
| <b>*Factores de resistencia [ AASHTO 6.5.4.2 ]</b>                 |  |              |                 |  |  |             |
| φf =   |  | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para flexión   |  | 6 – 41      |
| φv =   |  | 1.0          | [ - ]           | Factor de resistencia para cortante  |  |             |



|   |   |      |        |       |   |
|---|---|------|--------|-------|---|
| <b>*Cálculo de esfuerzos</b>  |   |      |        |       |   |
| $f_{buc} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xsup}} \right) =$   |   |      | 3.12   | ksi   | Esfuerzo en el patín a compresión   |
| $f_{but} = FC \left( \frac{Mu}{S_{xinf}} \right) =$   |   |      | 2.70   | ksi   | Esfuerzo en el patín a tensión  |
| <b>FLEXIÓN [ AASHTO 6.10.3.2 ]</b>  |   |      |        |       |   |
| <b>*Revisión de patín a compresión discretamente arriestrado [ AASHTO 6.10.3.2.1 ]</b>  |   |      |        |       |   |
| <u>Revisión 1</u>   |   |      |        |       |   |
| $f_{bu} + fl \leq \phi F R_h F_{yc}$  |   |      | [ - ]  | [ - ] | Asegura el máximo esfuerzo combinado en el patín a compresión que no exceda el límite elástico  |
| $fl \leq 0.6 f_y t$   |   |      |        |       |   |
| fl =  |   |      | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriestrados se tomara fl como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] |
| Rh =  |   |      | 1.0    | [ - ] | Factor hibrido, para perfiles laminados se tomara Rh como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  |
| Por lo tanto  |   |      |        |       |   |
| $f_{bu} + fl \leq \phi F R_h F_{yc}$  |   |      |        |       |   |
| 3.12  | < | 50   | OK     | ksi   | <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b>  |
| <u>Revisión 2</u>   |   |      |        |       |   |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} fl \leq \phi F_{nc}$  |   |      | [ - ]  | [ - ] | Asegura que el elemento tienen la suficiente resistencia a flexión  |
| Calculo de Fnc  |   |      | [ - ]  | ksi   | Resistencia a la flexión nominal en el patín a compresión   |
| Si $\lambda f \leq \lambda p f$   |   |      | [ - ]  | [ - ] | Resistencia al pandeo local en el patín a compresión [ AASHTO 6.10.8.2.2 ]  |
| $\lambda f = \frac{b f_c}{2 t f_c} =$   |   |      | 10.68  | [ - ] |   |
| $\lambda p f = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   |      | 9.15   | [ - ] |   |
| 10.68   | < | 9.15 | NO     |       | NO CUMPLE   |
| Por lo tanto  |   |      |        |       |   |
| $Se\ usara\ F_{nc} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left( \frac{\lambda f - \lambda p f}{\lambda r f - \lambda p f} \right) \right] R_b R_h F_{yc}$ |   |      |        |       |   |
| Donde   |   |      |        |       |   |
| $\lambda r f = 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}} =$  |   |      | 16.12  | [ - ] | Límite de la relación de esbeltez para patín no compacto  |
| Rb =  |   |      | [ - ]  | [ - ] | Factor caída de carga en alma [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  |
| Si $\frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{E K}{F_{yc}}}$ ó $\frac{2 D_c}{t_w} \leq \lambda r w$ se usara Rb = 1.0   |   |      |        |       |   |
| Cálculo de Dc   |   |      | [ - ]  | [ - ] | Profundidad del alma en compresión en el rango elástico [ AASHTO D6.3.1 ]   |
| $D_c = \left( \frac{-f_c}{ f_c  + f_t} \right) d - t f_c =$   |   |      | -34.72 | in    |   |
| Cálculo de K  |   |      | [ - ]  | [ - ] | Coefficiente de pandeo en alma [AASHTO 6.10.1.9]  |
| $K = \left( \frac{9}{\left( \frac{D_c}{D} \right)^2} \right) =$   |   |      | 40.11  | [ - ] |   |

|   |   |        |    |        |       |  |         |
|---|---|--------|----|--------|-------|--|---------|
| Cálculo de $\lambda_{rw}$   |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Límite de relación de esbeltez para alma no compacta [ AASHTO 6.10.1.10.2 ]  | 6 – 126 |
| $\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} =$  |   |        |    | 137.27 | [ - ] |  |         |
| Se revisan las condiciones  |   |        |    |        |       |  |         |
| $\frac{D}{tw} =$  |   |        |    | 98.00  | [ - ] |  |         |
| $0.95 \sqrt{\frac{EK}{F_{yc}}} =$   |   |        |    | 144.90 | [ - ] |  |         |
| 98.00   | < | 144.90 | OK |        |       | CUMPLE   |         |
| $\frac{2Dc}{tw} =$  |   |        |    | 92.84  | [ - ] |  |         |
| $\lambda_{rw} =$  |   |        |    | 137.27 | [ - ] |  |         |
| 92.84   | < | 137.27 | OK |        |       | CUMPLE   |         |
| Se usara $R_b =$  |   |        |    | 1.0    | [ - ] |  |         |
| Cálculo de $F_{nc}$   |   |        |    | 46.70  | ksi   |  |         |
| $F_{nc} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left( \frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_b R_h F_{yc} =$ |   |        |    |        |       |  |         |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi F_{nc}$   |   |        |    |        |       |  |         |
| 3.12  | < | 46.70  | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |
| <u>Revisión 3</u>   |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} \leq \phi F_{crw}$  |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que no sufra pandeo el alma  | 6 – 132 |
| Cálculo de $F_{crw}$  |   |        |    | [ - ]  | ksi   | Resistencia nominal al pandeo en el alma por flexión [ AASHTO 6.10.1.9 ]   | 6 – 121 |
| $F_{crw} = \frac{0.9EK}{\left(\frac{D}{tw}\right)^2} =$   |   |        |    | 109.01 | ksi   |  |         |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} \leq \phi F_{crw}$  |   |        |    |        |       |  |         |
| 3.12  | < | 109.01 | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |
| <b>*Revisión de patín a tensión discretamente arriostrado [ AASHTO 6.10.3.2.2 ]</b>   |   |        |    |        |       |  | 6 – 134 |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F_{yt}$   |   |        |    | [ - ]  | [ - ] | Asegura que la tensión en el patín no exceda el límite elástico mínimo especificado  | 6 – 134 |
| $f_l =$   |   |        |    | 0.0    | ksi   | Esfuerzo por flexión lateral, en patines a tensión ó compresión discretamente arriostrados se tomara $f_l$ como cero [ AASHTO B6.4.2.1 ] | 6 – 300 |
| $R_h =$   |   |        |    | 1.0    | [ - ] | Factor híbrido, para perfiles laminados se tomara $R_h$ como 1.0 [ AASHTO 6.10.1.10 ]  | 6 – 124 |
| Por lo tanto  |   |        |    |        |       |  |         |
| $f_{bu} + f_l \leq \phi F_{yt}$   |   |        |    |        |       |  |         |
| 2.70  | < | 50     | OK |        | ksi   | CUMPLE LA CONDICIÓN  |         |

|   |   |         |       |       |   |         |
|---|---|---------|-------|-------|---|---------|
| <b>*Revisión a cortante [ AASHTO 6.10.3.3 ]</b> |   |         |       |       |   |         |
|   | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         | [ - ] | kip   | Se deberá cumplir este requisito en el alma durante las etapas críticas de construcción | 6 - 135 |
| Cálculo de $V_{cr}$                             |   |         |       |       | Cortante resistente al pandeo [ AASHTO Eq.6.10.9.3.3-1 ]                                | 6 - 165 |
|   | $V_n = V_{cr} = CV_p$   |         | [ - ] | [ - ] |   | 6 - 165 |
|   | $V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$   | 1590.25 |       | kip   | Fuerza cortante plástico [AASHTO Eq.6.10.9.3.3-2]                                       | 6 - 165 |
| Cálculo de C                                    |   |         |       |       | Relación de la resistencia al pandeo por corte  | 6 - 164 |
|   | $Si \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} \text{ se usara } C = 1.0$ |         |       |       |   |         |
| Se revisan las condiciones                      |   |         |       |       |   |         |
|   | $\frac{D}{t_w} =$   | 98.00   | [ - ] |       |   |         |
|   | $1.12 \sqrt{\frac{EK}{F_{yw}}} =$   | 170.83  | [ - ] |       |   |         |
| 98.00   | <   | 170.83  | OK    |       | CUMPLE  |         |
| Se usara C=                                     |   |         |       |       | 1.0 [ - ]   |         |
| Por lo tanto                                    |   |         |       |       |   |         |
|   | $V_n = V_{cr} = CV_p$   | 1590.25 |       | kip   |   |         |
|   | $V_u \leq \phi_v V_{cr}$  |         |       |       |   |         |
| -47.86  | <   | 1590.25 | OK    | kip   | <b>CUMPLE LA CONDICIÓN</b>  |         |