



ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ARRIOSTRAMIENTOS
TRANSVERSALES EN PUENTES CURVOS Y ESVIADOS SOPORTADOS POR VIGAS
METÁLICAS EN I

Belmar Alexis Mendoza Ordoñez

Kely Yojanna Tejada García

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesora

Manuela Ochoa Especialista (Esp) en Análisis y Diseño de Estructuras

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	((Mendoza Ordoñez & Tejada Garcia, 2023))
Referencia	Mendoza Ordoñez B.A & Tejada Garcia K.Y (2023) ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ARRIOSTRAMIENTOS TRANSVERSALES EN PUENTES CURVOS Y ESVIADOS SOPORTADOS POR VIGAS METÁLICAS EN I. Trabajo de grado especialización. Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XXXIV.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1 Planteamiento del problema	12
1.1 Antecedentes	12
2 Justificación.....	12
3 Objetivos	13
3.1 Objetivo general.....	13
3.2 Objetivos específicos	13
4 Marco teórico	13
5 Metodología	17
5.1 Estado del arte.....	17
6 Caso de análisis	22
6.1 Normas aplicables	22
6.2 Software utilizado	22
6.3 Descripción de la estructura de análisis.....	22
7 Modelación.....	23
7.2 Definición de los elementos y propiedades	23
8 Solicitaciones resultantes de la modelación	28
8.1 Solicitación cuerda superior.....	28
8.2 Solicitación cuerda inferior.....	32
8.3 Solicitación diagonales	35
9 Resultados	39
10 Referencias	43

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación entre los resultados obtenido de 3 casos experimentales observados en la revisión del estado del arte.....	20
Tabla 2. Límites de tensión para los elementos de los cross-frame.	39
Tabla 3. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la cuerda superior para las sollicitaciones dadas debido a la Compresión.	40
Tabla 4. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la cuerda superior para las sollicitaciones dadas debido a la Tracción.	40
Tabla 5. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la cuerda inferior para las sollicitaciones dadas debido a la Compresión.	40
Tabla 6. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la cuerda inferior para las sollicitaciones dadas debido a la Tracción.	40
Tabla 7. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la diagonal para las sollicitaciones dadas debido a la Compresión.....	41
Tabla 8. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la diagonal para las sollicitaciones dadas debido a la Tracción.	41

Lista de Figuras

Figura 1. Configuración de arrostramientos transversales.	14
Figura 2. Combinaciones de ángulos de esviaje para puentes rectos.	14
Figura 3. Combinaciones de ángulos de esviaje para puentes curvos.	15
Figura 4. Variación en altura de las vigas de sección I.	16
Figura 5. Distribución intermitente y continua de arrostramientos transversales en un puente curvo con los apoyos intermedios esviados.	17
Figura 6. Distribución intermitente de arrostramientos transversales en un puente esviado recto con un apoyo intermedio. Tomado de: (Beckmann et al., 2016).	19
Figura 7. Distribución combinada entre intermitente y continua de arrostramientos transversales en un puente esviado recto con un apoyo intermedio.	21
Figura 8. Sección transversal puente caso de estudio.	23
Figura 9. Sección transversal viga longitudinal.	24
Figura 10. Definición de cross-frame.	24
Figura 11. Definición de sección de los elementos de los cross-frame.	25
Figura 12. Definición del ángulo de esviaje en la modelación del puente.	25
Figura 13. Definición distribución continua de los cross-frame Tipo 1.	26
Figura 14. Definición distribución discontinua de los cross-frame Tipo 1.	26
Figura 15. Definición distribución continua de los cross-frame Tipo 2.	26
Figura 16. Definición distribución discontinua de los crossframe Tipo 2.	27
Figura 17. Definición distribución continua de los cross-frame Tipo 3.	27
Figura 18. Definición distribución Discontinua de los cross-frame Tipo 3.	27
Figura 19. Solicitación máxima a compresión y a tracción distribución continua Tipo 1.	28
Figura 20. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 1.	28
Figura 21. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 1.	29
Figura 22. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 2.	29
Figura 23. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 2.	29
Figura 24. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 2.	30
Figura 25. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 2.	30
Figura 26. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 3.	30
Figura 27. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 3.	31
Figura 28. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 3.	31
Figura 29. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 3.	31
Figura 30. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 1.	32
Figura 31. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 1.	32
Figura 32. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 1.	32
Figura 33. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 1.	33
Figura 34. Solicitación máxima a compresión y tracción distribución continua Tipo 2.	33
Figura 35. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 2.	33
Figura 36. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 2.	34
Figura 37. Solicitación máxima a compresión y tracción distribución continua Tipo 3.	34
Figura 38. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 3.	34
Figura 39. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 3.	35
Figura 40. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 1.	35
Figura 41. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 1.	35
Figura 42. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 1.	36
Figura 43. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 1.	36
Figura 44. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 2.	36
Figura 45. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 2.	37

Figura 46. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 2.37
Figura 47. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 2.37
Figura 48. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 3.38
Figura 49. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 3.38
Figura 50. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 3.38
Figura 51. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 3.39

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CCP-14.	Norma colombiana de diseño de puentes
NFL.	No-Load-Fit
SDLF.	Steel Dead Load Fit
TDLF.	Total Dead Load Fit
fl	Valor mínimo de demanda
Cross-frame	Arriostramientos transversales

Resumen

En este trabajo, se analiza el comportamiento de los arriostramientos transversales en puentes curvos y esviados con vigas metálicas de sección I bajo efectos de cargas gravitacionales, con el fin de establecer la configuración más óptima de dichos elementos secundarios en puentes metálicos, dependiendo del grado de inclinación del esviaje presente en los apoyos del puente. Estos apoyos pueden ser oblicuos, rectos continuos o rectos intermitentes a las vigas longitudinales.

En la primera etapa, se describe de manera general el funcionamiento de los arriostramientos transversales o cross-frame en los puentes de vigas metálicas de sección I, así como las solicitaciones a las que están sujetas y cuáles son las zonas de estos elementos con mayores solicitaciones. También se presentan las posibles configuraciones de dichos arriostramientos transversales y cuáles son los resultados experimentales obtenidos de la literatura sobre la relación que hay entre el comportamiento del puente y la configuración de sus elementos transversales.

Finalmente, como ejemplo de caso, se presentará el modelo de un puente metálico con cada una de las configuraciones posibles de los elementos transversales, para ilustrar la modelación de los elementos transversales se muestra el paso a paso de la definición de secciones y aplicación de cargas gravitacionales. Se hace un análisis de la distribución de cargas en las vigas principales, así como revisión de deflexiones y pandeo para establecer cuál es la configuración de los elementos transversales o cross-frame que permite un mejor comportamiento estructural del puente.

Palabras clave: Puente metálico, arriostramientos transversales, esviaje de puentes, vigas metálicas sección I.

Abstract

In this inform, the behavior of cross-frame in curved and skewed bridges with type I metal beam is analyzed under the gravitational load effects, in order to establish the most optimal configuration of the secondary elements in metal bridges depending on the degree of Inclination of the skewed present in the supports of the bridge, which can be oblique, continuous straight or intermittent straight to the longitudinal girder.

In the first stage, the operation of the transverse bracing or cross-frame in metal girder bridges is described in a general way, as well as the requests to which these elements are subject and which are the areas of these elements with the greatest requests. Also present the possible configurations of cross frames and what are the experimental results in the current literature on the relationship between the behavior of the bridge and the configuration of its transverse elements.

Finally, as an example case, the model of a metal bridge will be presented with each of the possible configurations for the transverse elements, a model for each configuration planted on the same bridge that will be taken as a reference, to illustrate the modeling of the transverse elements. shows the step by step definition of sections and application of gravitational loads. An analysis of the load distribution in the main beams is carried out, as well as a review of deflections such as buckling to establish the configuration of the transverse elements or cross-frame that allows better structural behavior of the bridge.

Keywords: Steel bridge, cross frame, bridge deflection, section I girder steel

Introducción

De acuerdo con la topografía accidentada de Colombia, además de la necesidad de comunicar o acortar las distancias entre las ciudades a lo largo del territorio nacional, es indispensable planificar, diseñar y construir estructuras viales que permitan circular por el territorio nacional, por lo tanto, es importante el diseño de puentes que se adapten a la geografía escarpada Colombiana. Para adaptar las vías a la topografía, se emplean puentes esviados rectos y curvos, los cuales tienen consideraciones especiales para los puentes metálicos con vigas principales tanto de sección I y sección cajón.

En los puentes metálicos se deben conocer las partes de la superestructura, que se compone de elementos principales o vigas longitudinales y de elementos secundarios o arriostramientos transversales y diafragmas y los elementos que se encargan de suministrar rigidez a las vigas como rigidizadores, atiesadores y elementos de continuidad. La configuración de estos elementos transversales determina la distribución de esfuerzos en las vigas principales y por ende su comportamiento estructural.

El esviaje presente en los apoyos de los puentes cumple un papel de suma importancia en el presente trabajo, ya que es bajo este parámetro que se realizara la revisión bibliográfica y se planteara el caso ejemplo y de análisis para establecer la relación entre el esviaje de este puente y la configuración más óptima de los elementos transversales.

Se realizará un análisis en un caso ejemplo donde se modelará el mismo puente metálico con una condición de esviaje notable y se planteará con diferentes configuraciones de los elementos trasversales. Para analizar el comportamiento individual de los elementos transversales que hace parte de la súper estructura del puente y así finalmente determinar cuál es la configuración más optima de los elementos transversales en función del comportamiento estructural de las vigas principales y en general el puente.

1 Planteamiento del problema

Se requiere verificar y analizar desde el estado del arte o revisión bibliográfica y desde la modelación como método experimental de acuerdo con la norma de diseño de puentes vigentes, la configuración más eficiente u optima de los arriostramientos transversales o cross-frame en los puentes metálicos curvos esviados y rectos esviados soportados por vigas metálicas con sección en I.

1.1 Antecedentes

Se han realizado investigaciones donde se busca presentar la configuración o disposición de los cross-frame dependiendo el ángulo de esviaje, el cual es importante una vez supera los 20 grados, ya que al superar este límite se deben disponer los elementos transversales perpendiculares a las vigas longitudinales, y se pueden configurar como continuo o intermitentes, (Mendoza et al., 2020) presenta en su investigación un puente tipo de 60 m de longitud donde pone a variar el ángulo de esviaje o esviaje de los estribos desde 20 grados hasta 65 grados donde se presenta que la distribución intermitente o discontinua distribuye mejor las cargas axiales sobre las cuerdas superiores e inferiores de la geometría de los cross frame.

2 Justificación

La Norma Colombiana de Diseño Sísmico de Puentes (CCP-14) y el código Bridge design specifications AASHTO LFRD 2012 (AASHTO 2012), especifica la configuración de los elementos secundarios o arriostramientos en los puentes metálicos vigas con sección en I de acuerdo al Artículo 6.7.4.2 Secciones I, dependiendo del grado de inclinación del esviaje se categorizan como: oblicuos, rectos continuos, rectos intermitentes a las vigas longitudinales.

Por la necesidad de conocer y entender el comportamiento individual y en conjunto de los elementos que componen la superestructura de los puentes con ángulo de esviaje superior a 20 grados, se quiere determinar una configuración óptima para los elementos secundarios o marcos cruzados, siguiendo los lineamientos mínimos de diseño de los códigos CCP-14 o AASHTO LFRD 2012.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Indagar en el comportamiento de los arrostamientos transversales en sus diferentes configuraciones o disposiciones, de acuerdo al esviaje o ángulo de esviaje en los puentes de secciones I curvos o rectos, para aplicar a un caso de estudio.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión del estado del arte el comportamiento de los arrostamientos transversales en sus diferentes configuraciones o disposiciones, de acuerdo al esviaje o ángulo de esviaje en los puentes de secciones I rectos.
- Analizar el comportamiento individual de los elementos transversales que componen la superestructura de un puente metálico mediante la modelación de este con diferentes configuraciones de los elementos transversales.

4 Marco teórico

En los puentes metálicos se presentan tipologías de armadura y arco donde el tablero es superior o inferior, vigas cajón o vigas I donde el tablero es superior, el tablero de la mayoría de los puentes metálicos es de concreto.

Los puentes de vigas de sección I y cajón se diseñan y construyen con arrostamientos transversales los cuales se encargan de transferir y distribuir las cargas verticales y laterales, además, para proporcionar estabilidad a las aletas en compresión. (Asociación colombiana de ingeniería sísmica., 2014)

En Colombia se la norma (CCP-14), el cual presenta los parámetros mínimos de diseño que deben tener todas las estructuras viales sobre el territorio nacional. Para los puentes de viga de sección I se especifica el Artículo 6.7.4.2, dependiendo del grado de inclinación del esviaje se determina la configuración y orientación de los arrostamientos transversales, los cuales pueden ser oblicuos, rectos continuos o rectos intermitentes a las vigas longitudinales.(Asociación colombiana de ingeniería sísmica., 2014)

“Los arriostramientos transversales o marcos cruzados (Cross-frame) son armaduras transversales que conectan componentes adyacentes longitudinales sometidos a flexión o dentro de una sección tubular o cajón cerrado utilizada para transferir y distribuir las cargas verticales y laterales y para proporcionar estabilidad a las aletas en compresión. A veces se utiliza también el termino diafragma”. (Asociación colombiana de ingeniería sísmica., 2014)

Respecto a los marcos cruzados o cross frame, se encuentran diferentes tipos o configuraciones, en el campo de las estructuras viales se emplean los marcos de sección X, K y Z; como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Configuración de arriostramientos transversales.

Tomado de: <https://ascelibrary.org/>

El ángulo de esviaje es el ángulo entre el eje del apoyo y una línea perpendicular al eje longitudinal del puente; es decir, una inclinación de cero grados denota un puente rectangular; a continuación, se presenta configuraciones de ángulo de esviaje en las Figuras 2 y 3.

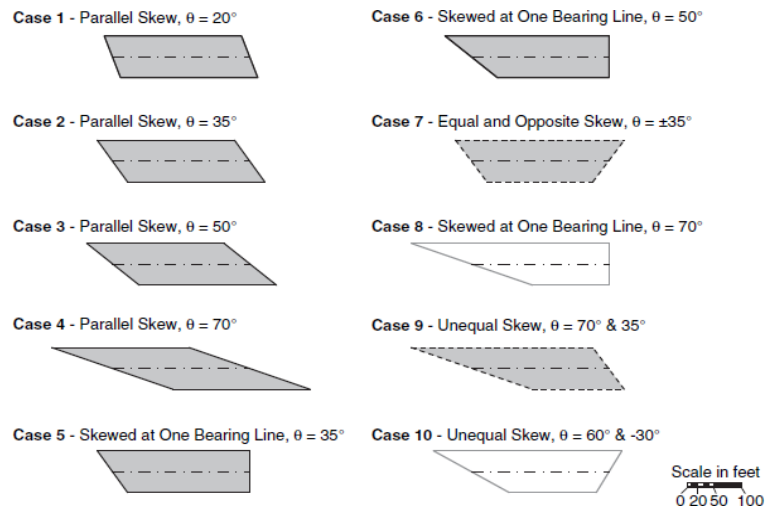


Figura 2. Combinaciones de ángulos de esviaje para puentes rectos.

Tomado de:(White et al., 2012)

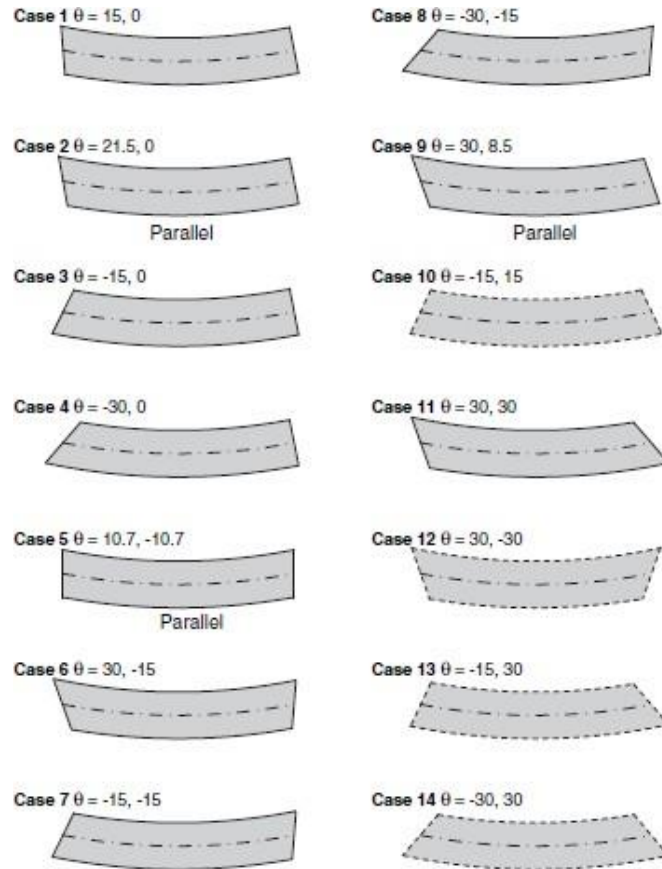


Figura 3. Combinaciones de ángulos de esviaje para puentes curvos.

Tomado de:(White et al., 2012)

Los puentes de sección I se caracterizan por presentar vigas longitudinales donde se pueden tener secciones variables en altura dependiendo de la ubicación o tramo del elemento, además de variación en el ancho de los patines y también variación en los espesores, como se observa en la Figura 4. Es una variación geométrica hacia el centro de la luz, ya que al ser puentes simplemente apoyados, en esta zona central las cargas cortantes son menores (0 en el centro), y como el momento es máximo, se puede reducir las cargas muertas disponiendo una sección menor que se traduce en un peso menor para determinar el momento generados por las cargas gravitacionales (Muerta, sobrecargas, carga viva peatonal y vehicular, etc.), también cargas laterales (Viento, sismo, impactos por colisión, etc.).



Figura 4. Variación en altura de las vigas de sección I.

Tomado de: https://www.steelconstruction.info/Design_for_steel_bridge_construction

Los arriostramientos transversales son indispensables para el diseño de los puentes metálicos, ya que se encargan de conectar las vigas adyacentes o longitudinales que transfieren o distribuyen las cargas verticales y laterales para proporcionar estabilidad a la superestructura. (Beckmann et al., 2016)

Otra función que debe afrontar los arriostramientos transversales es soportar las fuerzas internas en construcción, por el proceso constructivo, como la inclinación que debe llevar los tramos curvos de los puentes de sección I con curva horizontal. (Beckmann et al., 2016).

5 Metodología

El presente trabajo es de carácter investigativo y analítico, el cual se enfoca en estudiar el comportamiento estructural de los elementos transversales de los puentes metálicos curvos o esviados con diferentes configuraciones en la disposición de los elementos transversales, considerando las solicitaciones impuestas bajo cargas gravitacionales.

5.1 Estado del arte

- Arriostramientos transversales en puentes curvos esviados

En los puentes curvos con vigas I con estribos o apoyos intermedios esviados (ver Figura 5), se presentan desplazamientos por torsión en las vigas longitudinales por efectos de cargas gravitacionales y de construcción (Beckmann et al., 2016).

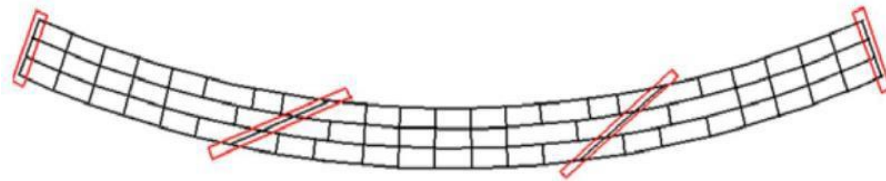


Figura 5. Distribución intermitente y continua de arriostramientos transversales en un puente curvo con los apoyos intermedios esviados.

Tomado de:(Beckmann et al., 2016)

Los arriostramientos transversales se deben diseñar como pórticos cruzados, los cuales son liberados a momentos por las conexiones empleadas para conectarlas a las vigas adyacentes, porque estos elementos solo deben trabajar por efectos de cargas axiales o por deformaciones laterales.

Para detallar el comportamiento de los pórticos cruzados se emplean algunos ajustes dependiendo de la geometría:

1. Ajuste sin carga NLF por sus siglas en inglés (No-Load Fit).
2. Ajuste de carga muerta de Acero SDLF por sus siglas en inglés (Steel Dead Load Fit).
3. Ajuste de carga muerta total TDLF por sus siglas en inglés (Total dead Load Fit).

En los puentes curvos con distribuciones continuas de arriostramientos transversales las cargas que transmite la estructura por la cuerda superior para el ajuste SDLF tienden a aumentar en la etapa de construcción, lo cual es un factor a tener en cuenta al momento de dimensionar los pórticos o riostras. (White et al., 2012).

Para los puentes con curvas horizontales se deben tener en cuenta la disposición o distribución para el montaje de los elementos transversales, ya que estos van a afrontar solicitaciones en la etapa de construcción por parte de las cargas gravitacionales que transmite las vigas adyacentes a estos, por lo anterior se deben emplear detalles SDLF o TDLF para controlar las torsiones en las vigas (Beckmann et al., 2016).

También se debe tener claro que al momento de definir el arriostramiento transversal de los puentes con curvas horizontales, se requiere que dichos pórticos transmitan las cargas en dirección radial para satisfacer el equilibrio de momentos internos, por lo tanto los detalles de conexión para los ajustes SDLF y TDLF tienden a aumentar estas fuerzas transversales, las cuales se encargan de torcer las vigas en dirección opuesta a las rotaciones generadas por las torsiones que afrontan la estructura (Beckmann et al., 2016).

- Arriostramientos transversales en puentes rectos esviados

El comportamiento de los puentes rectos oblicuos es fundamentalmente diferente al comportamiento de los puentes de vigas curvas. Estas diferencias en el comportamiento fundamental deben comprenderse completamente y considerarse cuidadosamente, ya que la condición de ajuste seleccionada afectará la capacidad de construcción y el rendimiento de estos diferentes tipos de puentes de diferentes maneras. (Beckmann et al., 2016).

En puentes rectos sesgados (ver Figura 6), la influencia en las tensiones de flexión del eje principal de la viga debido a los detalles SDLF y TDLF basados en peraltes de análisis refinados es pequeña y puede despreciarse, siempre que la disposición de la estructura transversal sea perpendicular a la viga. (Beckmann et al., 2016)

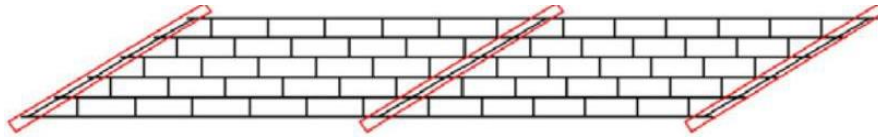


Figura 6. Distribución intermitente de arrostramientos transversales en un puente esviado recto con un apoyo intermedio. Tomado de: (Beckmann et al., 2016)

En puentes Rectos, la disposición de los elementos transversales no afecta el comportamiento de los elementos longitudinales, no se encuentran variaciones significativas en los valores máximos de cortante y momento, el agente encargado de afectar a la estructura es directamente es el ángulo de esviaje o esviaje. (Mendoza et al., 2020)

Sin embargo, los esfuerzos de flexión lateral del patín que ocurren en los sistemas de puentes rectos sesgados tienden a desarrollarse debido a las fuerzas laterales transferidas a través de los pórticos transversales que pueden conectar vigas adyacentes en diferentes puntos de luz. En lugar de un análisis refinado, las especificaciones de diseño de puentes LRFD de AASHTO (2010) actualmente permiten que los ingenieros que examinan puentes sesgados más de 20 grados utilicen un valor mínimo de demanda del eje menor (f_l), donde los valores mínimos permitidos son de $f_l = 10$ ksi para una viga interior y $f_l = 7,5$ ksi para una viga exterior, son los límites inferiores de capacidad que se emplean para revisar las vigas de sección I. (Zhou et al., 2016)

Además, dado que las especificaciones de diseño de puentes AASHTO LRFD establecen que los marcos transversales o los diafragmas deben colocarse en una configuración escalonada cuando un puente está sesgado más de 20 grados, no se debe esperar que los valores aproximados proporcionados para f_l sean indicativos de la flexión lateral del patín, las tensiones experimentadas cuando los marcos cruzados se llevan paralelos al esviaje en puentes sesgados más de 20 grados. (Zhou et al., 2016)

En estudios recientes realizados en la universidad de Kansas, se evidencia que los pórticos transversales colocados paralelos al ángulo de inclinación produjeron valores significativamente más bajos para f_l que los casos en los que los pórticos transversales se colocaron perpendiculares a la línea de la viga y escalonados. Se encontró que tanto la reducción del ángulo de inclinación como la disminución del espaciado transversal del cross-frame reducen las tensiones de flexión lateral del ala. (Zhou et al., 2016).

En la etapa de construcción en los puentes curvos y rectos dependiendo del ángulo de esviaje, se presentan cargas internas que se deben controlar de acuerdo con la disposición de los marcos cruzados y el tipo de ajuste empleado para controlar estos efectos.

Después de la revisión de la teoría de diseño, la revisión del estado del arte y la verificación de la norma vigente para el diseño de puentes en Colombia, se elabora una tabla resumen donde se recopila la información relevante de acuerdo con los casos analizados.

Tabla 1. Comparación entre los resultados obtenidos de 3 casos experimentales observados en la revisión del estado del arte.

Autores	Tipo de Punte	Distribución Cross-Frame	Tipo de Cross-Frame	Elemento de Cross-Frame	Solicitación	Etapas	Limite Admisible
(White et al., 2012)	Curvo	Continua	K	Cuerda superior	Axial	Construcción	Supera
(Mendoza et al., 2020)	Recto	Continua	K	Cuerda superior	Axial	Operación	No supera
(Mendoza et al., 2020)	Recto	Intermitente	K	Cuerda superior	Axial	Operación	No supera
(Zhou et al., 2016)	Recto	Continua	X	Cuerda Inferior	Axial	Operación	No supera
(Mendoza et al., 2020)	Recto	Continua	K	Cuerda Inferior	Axial	Operación	Supera
(Mendoza et al., 2020)	Recto	Intermitente	K	Cuerda Inferior	Axial	Operación	No supera
(White et al., 2012)	Curvo	Continua	K	Diagonales	Axial	Construcción	No supera
(Zhou et al., 2016)	Recto	Continua	X	Diagonales	Axial	Operación	No supera
(Mendoza et al., 2020)	Recto	Continua	K	Diagonales	Axial	Operación	No supera
(Mendoza et al., 2020)	Recto	Intermitente	K	Diagonales	Axial	Operación	No supera

Fuente: elaboración propia

Para los puentes con curvas horizontales se busca que los diafragmas o marcos cruzados sean espaciados uniformemente y normales o tangentes a la curva sin incrementar la dificultad constructiva, esto se realiza con el fin de facilitar el análisis estructural del Puente, tanto durante su construcción, como su operación o servicio. cuando se presenta ángulo de esviaje se debe reducir la separación de los arrojamientos transversales para controlar las solicitaciones sobre los mismo. Cuando el ángulo de esviaje supera los 20 grados se recomienda distribuir los diafragmas o

arrostramientos transversales intermitente o discontinuos permitiendo controlar la rigidez transversal del puente, admitiendo que los elementos longitudinales o principales controlen la rigidez global de la estructura por efectos de flexión (AASHTO, 2020)

Los arriostramientos transversales se pueden disponer en una distribución combinada entre las configuraciones continuas e intermitentes como se presenta en la figura 7; Para los arreglos combinados de marcos cruzados para puentes con ángulo de esviaje superior a 20 grados tanto rectos como curvos (Coletti D et al., 2015), con el fin de permitir controlar las solicitaciones que se presentan de acuerdo con la disposición del ajuste en la etapa de construcción, ya que estas consideraciones son importantes para el análisis estructural donde se revisa el comportamiento de la estructura por medio de la modelación de la geometría y distribución de los cross-frame y de los elementos longitudinales los cuales se busca que su comportamiento sea solo a flexión.

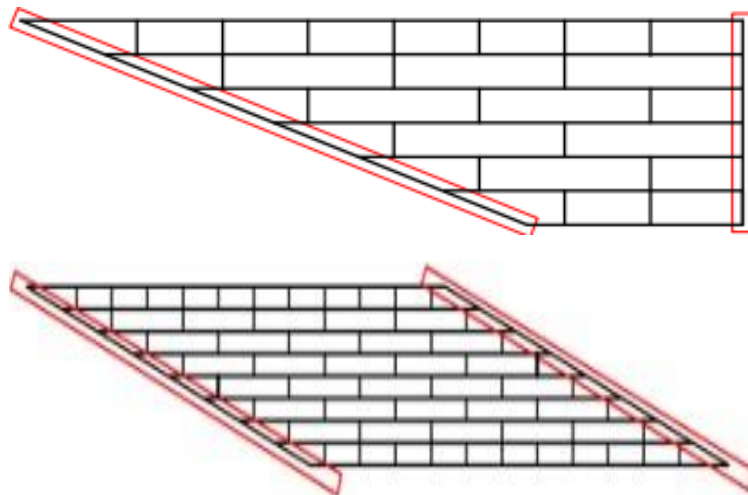


Figura 7. Distribución combinada entre intermitente y continua de arriostramientos transversales en un puente esviado recto con un apoyo intermedio.

Tomado de: (Coletti D et al., 2015)

6 Caso de análisis

6.1 Normas aplicables

En el análisis y diseño de todas las estructuras, deberá cumplir como mínimo, pero sin limitarse a éstos, con los requerimientos pertinentes establecidos en los siguientes documentos:

- Norma Colombiana de diseño de Puentes – 2014. (CCP-14). Adoptada mediante Resolución N° 0000108, del 26 de enero de 2015, emanada del Ministerio de Transporte.
- Standard Specifications for Highway Bridges – AASHTO –American Association of State Highway and Transportation Officials– Edition 2012.
- ICONTEC. (Ministerio de transporte, 2014)

6.2 Software utilizado

- Para la modelación, verificación del comportamiento y cálculo de las solicitudes del puente se usa SAP2000.

6.3 Descripción de la estructura de análisis

El caso de estudio consta de un puente de una luz de 45m de longitud y ángulo de esviaje 35 grados, ancho de tablero 11.60m conformado por 2 calzadas de 3.65m, 2 bermas de 1.80m y 2 barreras de protección de 0.35 de ancho, donde el tablero es en concreto reforzado.

Sometido a cargas gravitacionales producidas por carga viva vehicular, peso propio, sobrecargas de carga muerta, donde se analiza una distribución continua y otra discontinua para el puente garantizando que la separación entre los cross-frame sin importar la distribución sea la misma con el fin de tener las mismas condiciones para ambos modelos, todo el análisis y modelización se realiza de acuerdo a la norma colombiana de puentes CCP-14.

La geometría de las vigas empleadas en el caso de estudio son vigas de sección I armadas, donde su altura, patines y alma son constantes, ya que es normal que estos elementos presenten diferencia a lo largo de la longitud del puente con el fin de optimizar la sección de las vigas para las diferentes solicitaciones que afronta, pero para el caso de análisis se realiza constante para centrarnos en los cross-frame además el puente se conforma por 4 vigas longitudinales.

La geometría de cross-frame empleadas en el caso estudio son en sección K y las diagonales y cuerdas de los cross-frame son en sección ángulo.

7 Modelación

Para modelar la estructura se empleó el programa de análisis estructural SAP2000. Se realizaron seis modelos de análisis, en los cuales se realizaron variaciones en el tipo de configuración de los cross-frame entre distribución continua y distribución discontinua y se analizó cada una de estas configuraciones variando la distancia horizontal entre los cross-frame con el fin de obtener las solicitaciones de diseño.

7.2 Definición de los elementos y propiedades

El modelo se realiza con ayuda del módulo de bridge del programa SAP2000, en el cual se definen las propiedades y secciones de manera general se presenta la definición de las propiedades geométricas del puente de análisis en el software.

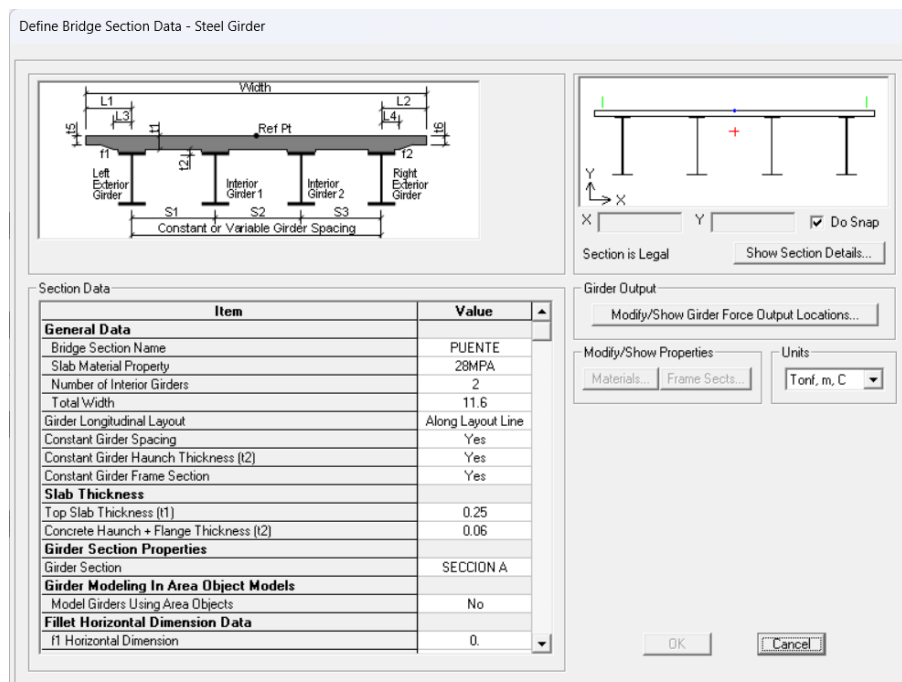


Figura 8. Sección transversal puente caso de estudio.

Fuente: elaboración propia

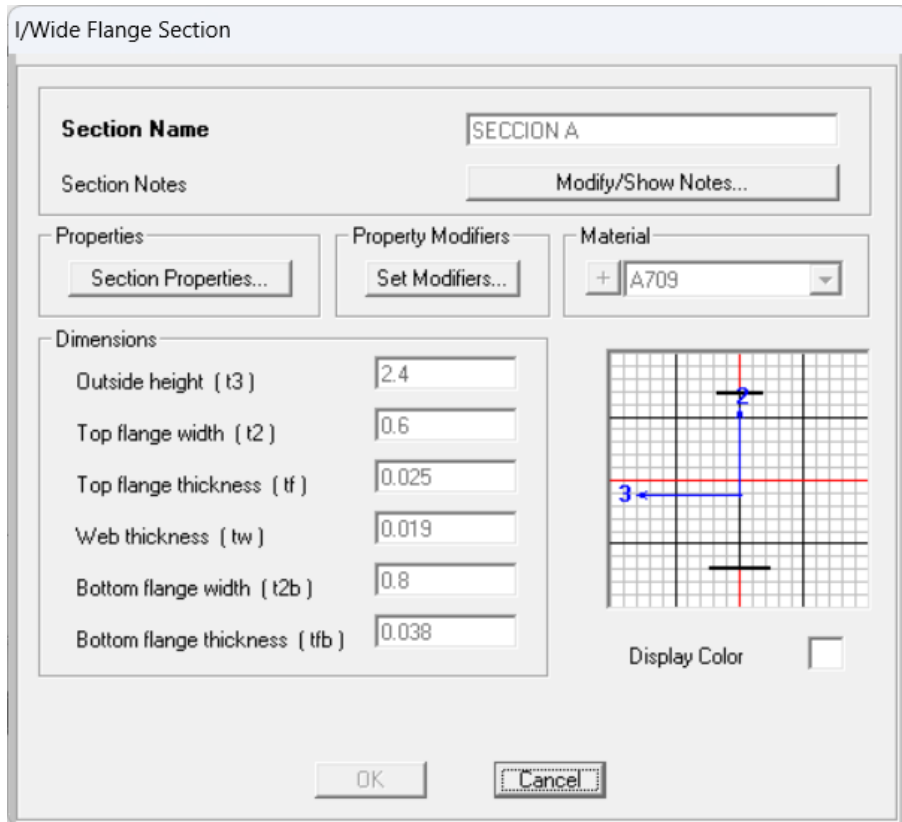


Figura 9. Sección transversal viga longitudinal.
Fuente: elaboración propia

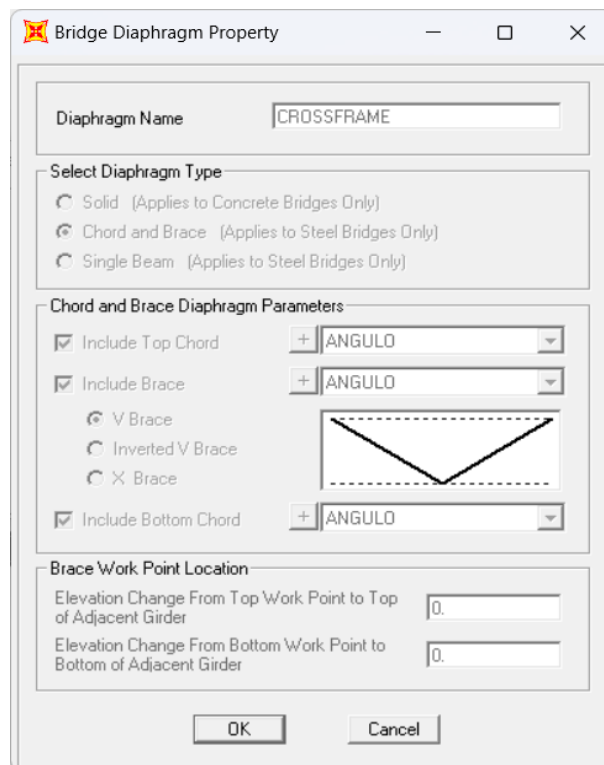


Figura 10. Definición de cross-frame.
Fuente: elaboración propia

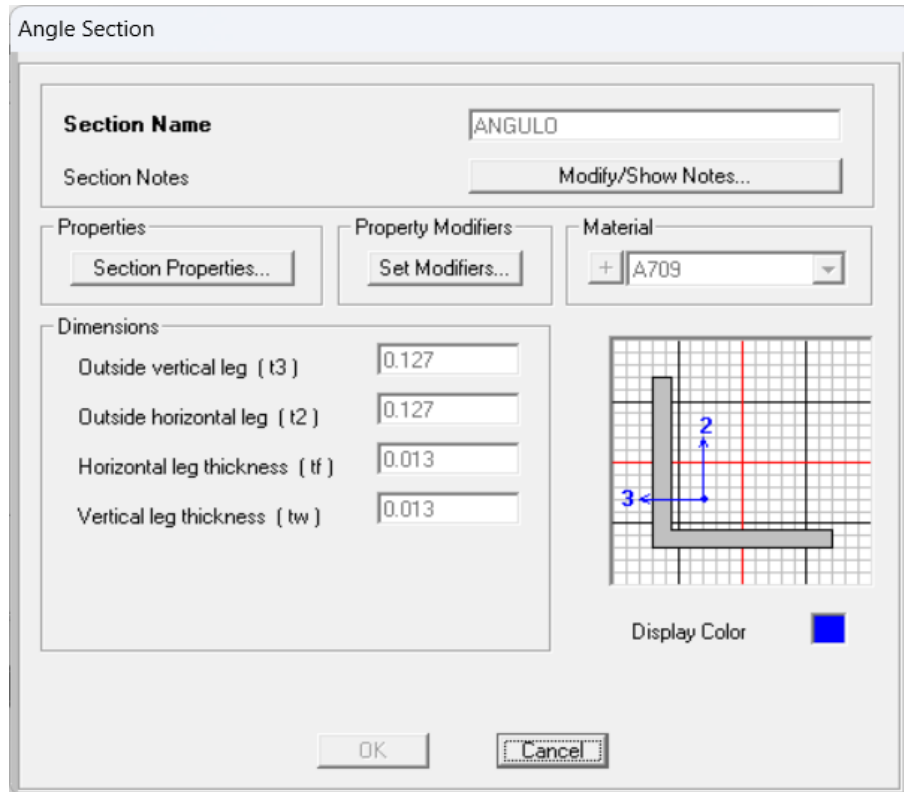


Figura 11. Definición de sección de los elementos de los cross-frame.

Fuente: elaboración propia

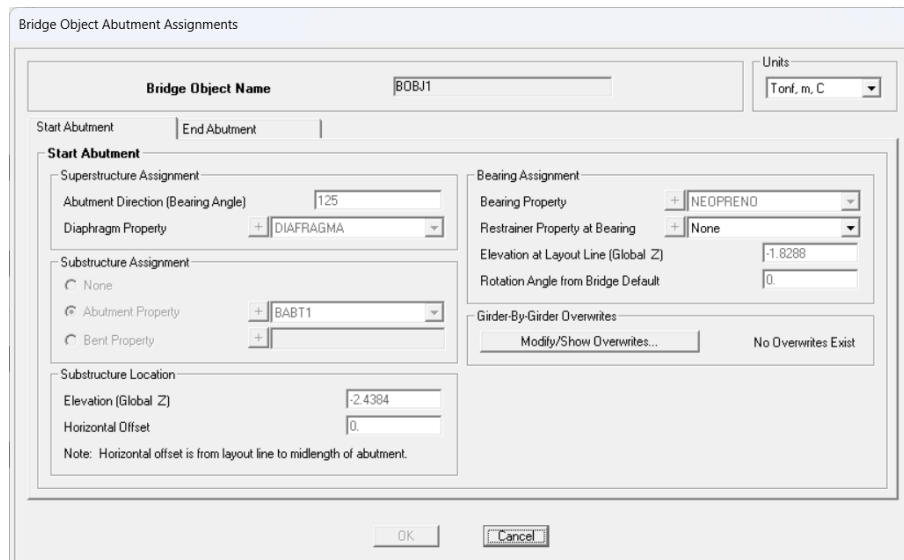


Figura 12. Definición del ángulo de esviaje en la modelación del puente.

Fuente: elaboración propia

Finalmente, a continuación, se presenta los casos de análisis planeados considerando variables como la distribución de los cross-frame y la distancia horizontal entre ellos, así como su ubicación a lo largo del puente.

CASO 1: Distribución continua - Separación horizontal 9,0m.

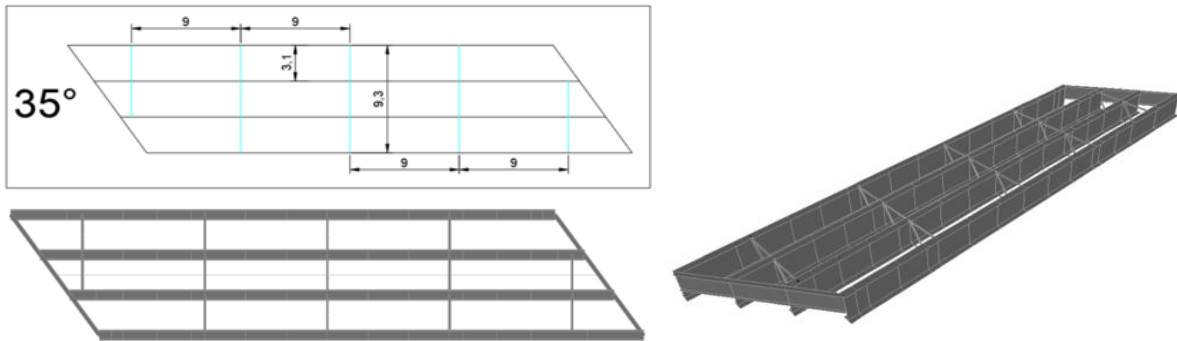


Figura 13. Definición distribución continua de los cross-frame Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

CASO 2: Distribución discontinua - Separación horizontal 9,0m.

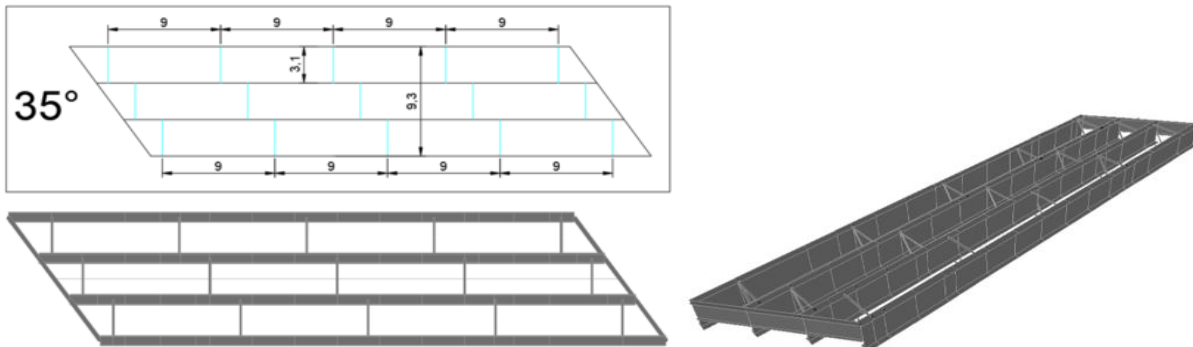


Figura 14. Definición distribución discontinua de los cross-frame Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

CASO 3: Distribución continua - Separación horizontal 7,15m.

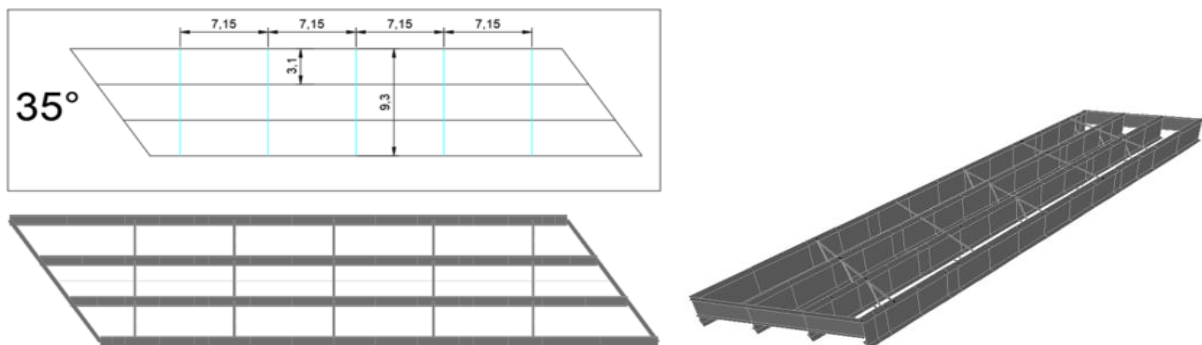


Figura 15. Definición distribución continua de los cross-frame Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

CASO 4: Distribución discontinua - Separación horizontal 7,15m.

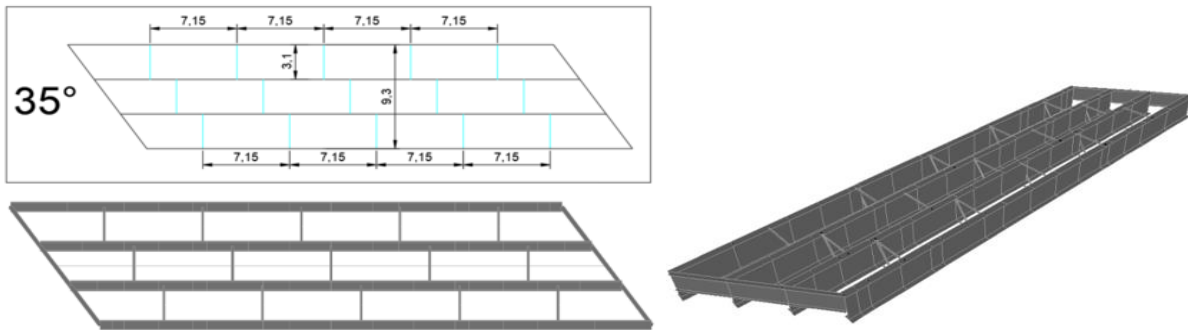


Figura 16. Definición distribución discontinua de los crossframe Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

CASO 5: Distribución continua - Separación horizontal 8.0m y 7.87m.

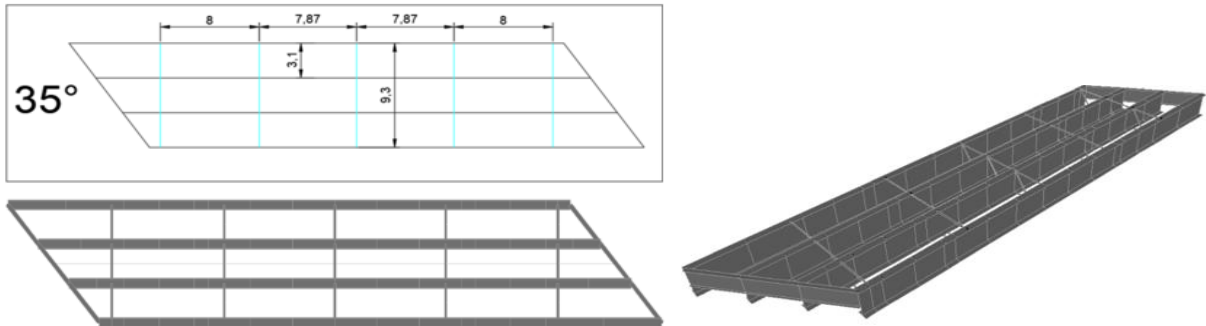


Figura 17. Definición distribución continua de los cross-frame Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

CASO 6: Distribución discontinua- Separación horizontal 8.0m y 7.87m.

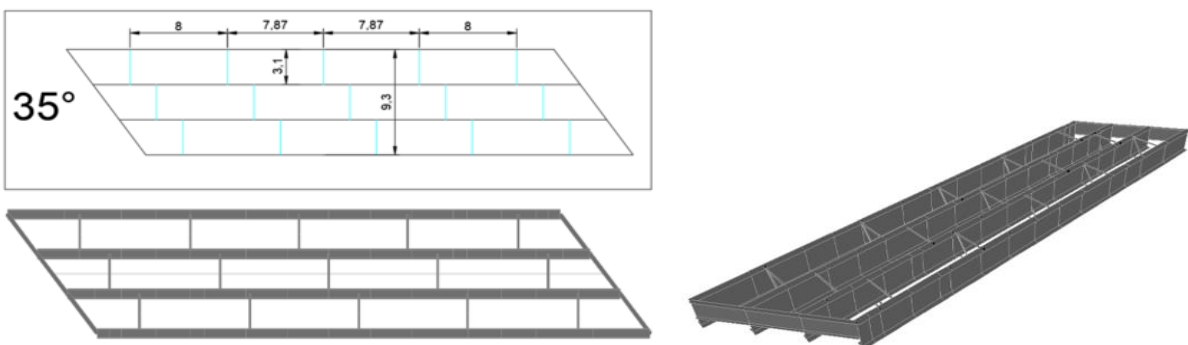


Figura 18. Definición distribución Discontinua de los cross-frame Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

8 Solicitaciones resultantes de la modelación

A partir del modelo matemático, se realizó un análisis detallado del comportamiento estructural de los elementos que componen los cross-frame planteados en puente, donde a partir de las solicitaciones, se analizaron la fuerza actuante a tracción y compresión de los elementos debidos a cargas gravitacionales

8.1 Solicitación cuerda superior

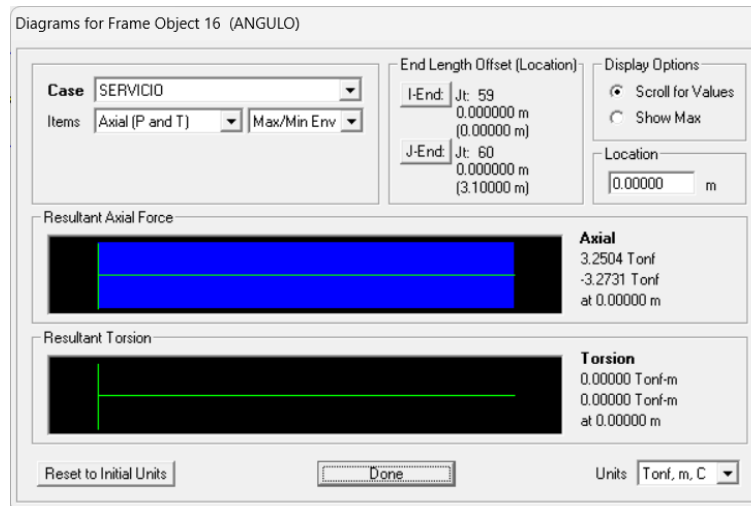


Figura 19. Solicitación máxima a compresión y a tracción distribución continua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

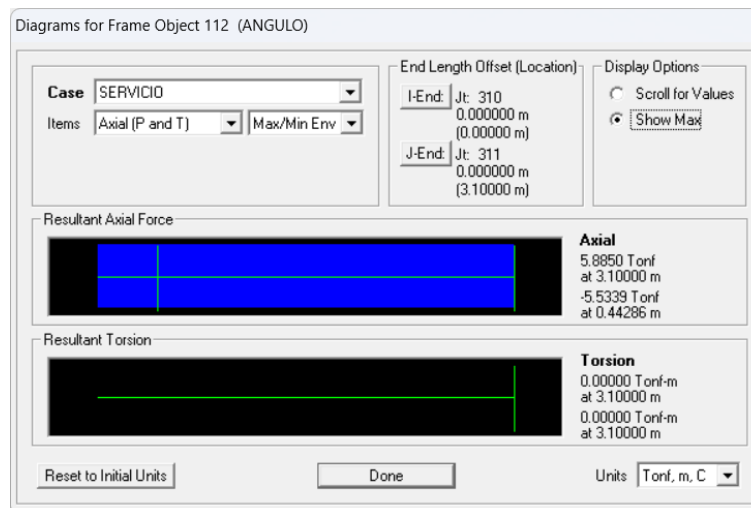


Figura 20. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

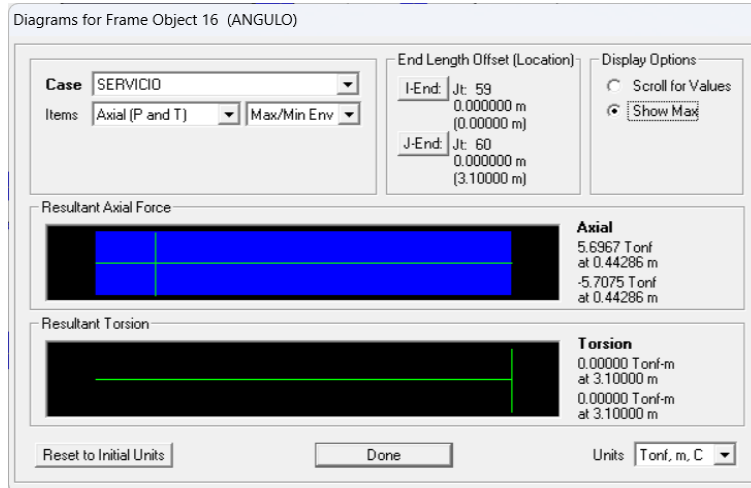


Figura 21. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

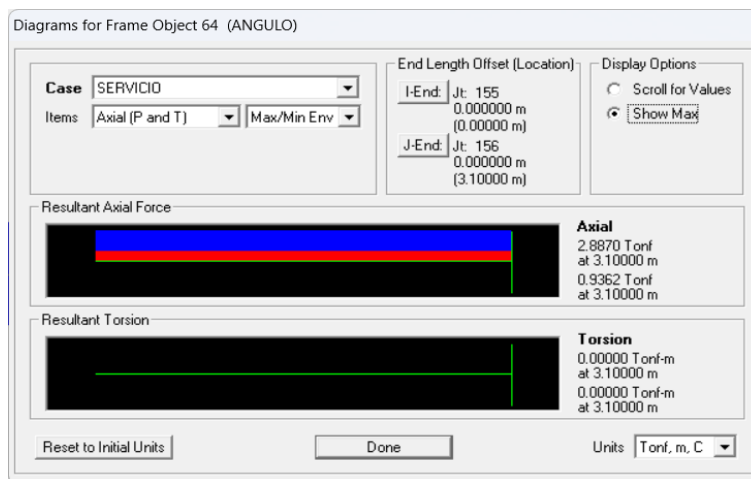


Figura 22. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

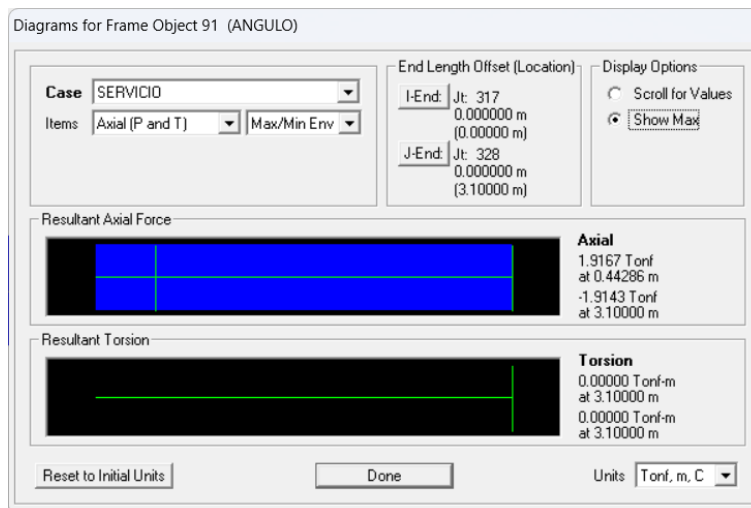


Figura 23. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia.

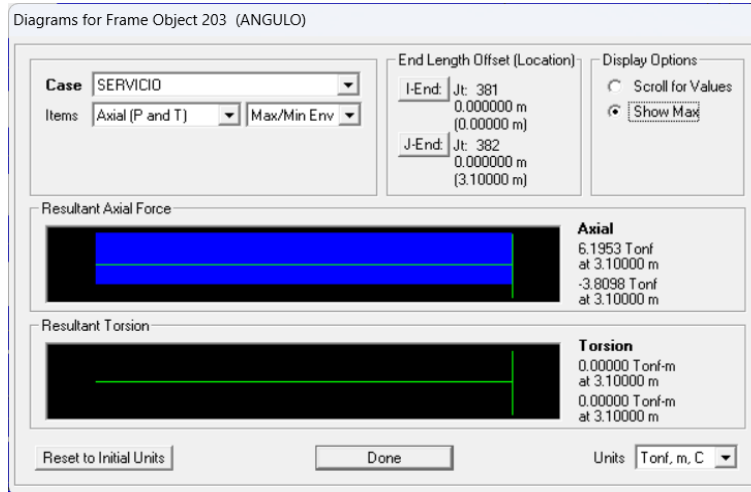


Figura 24. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

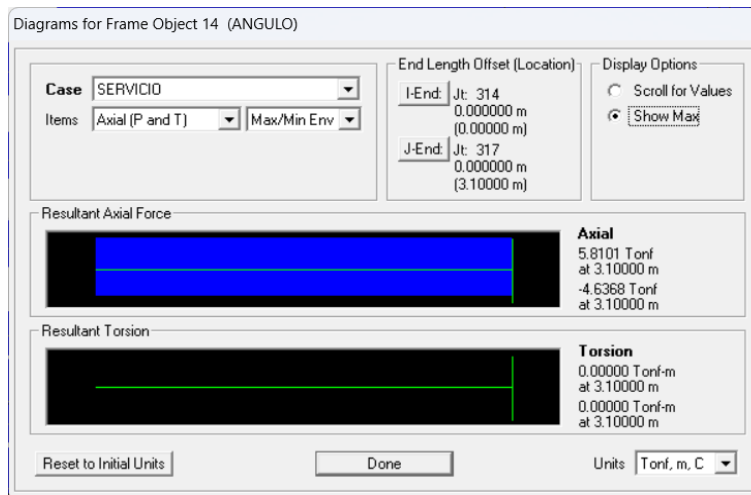


Figura 25. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

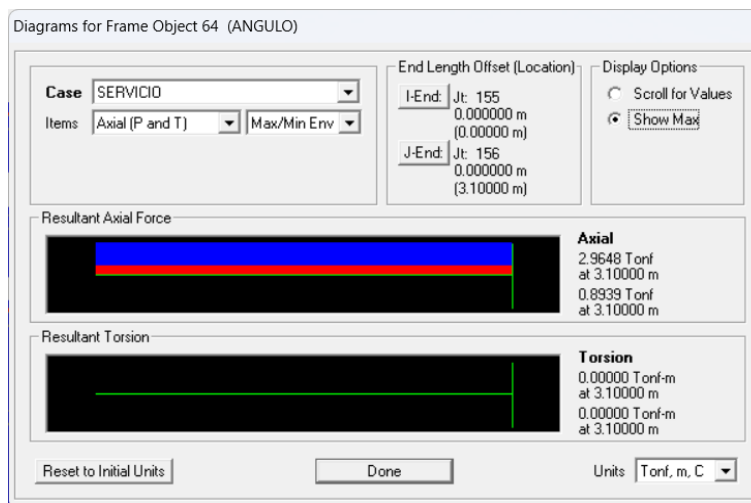


Figura 26. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

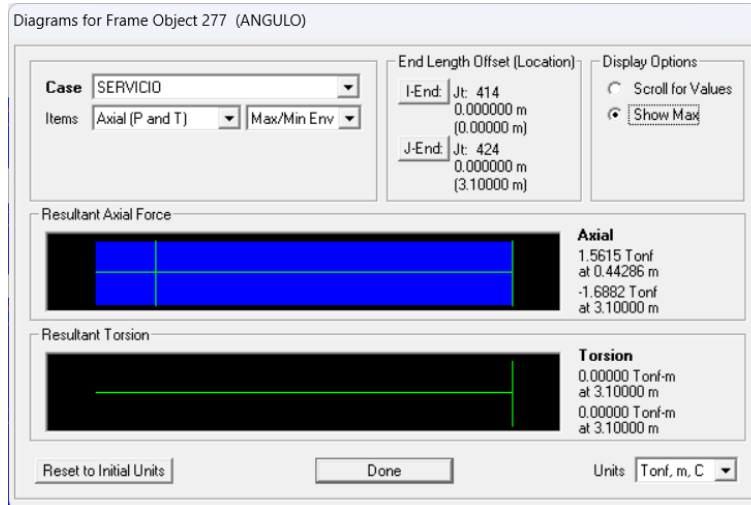


Figura 27. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

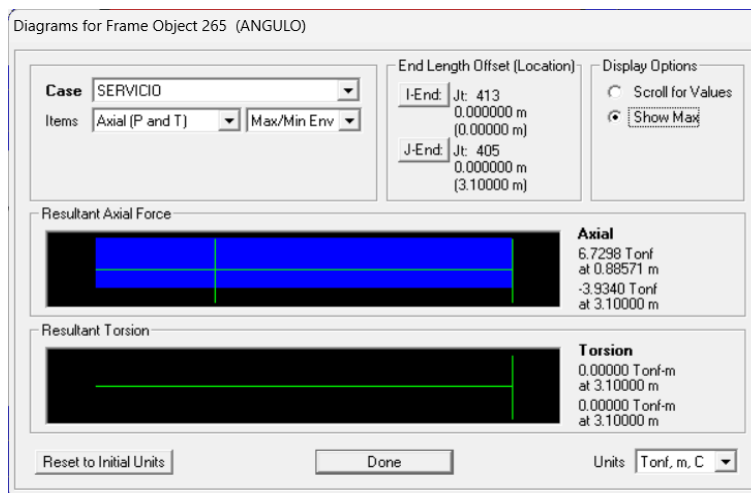


Figura 28. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

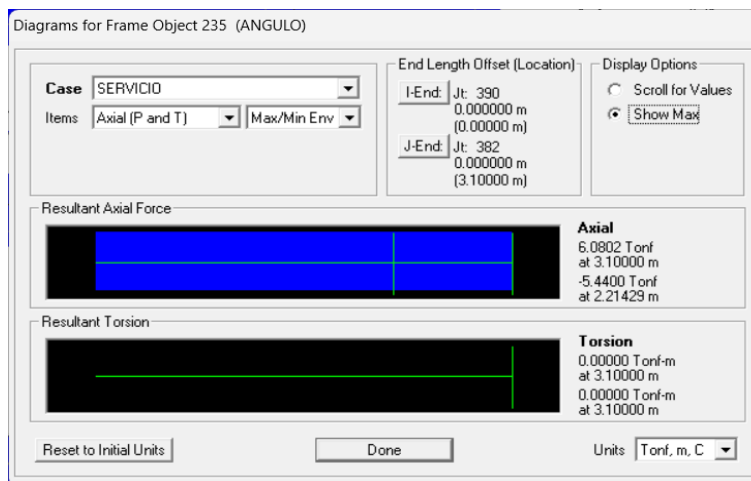


Figura 29. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

8.2 Solicitación cuerda inferior

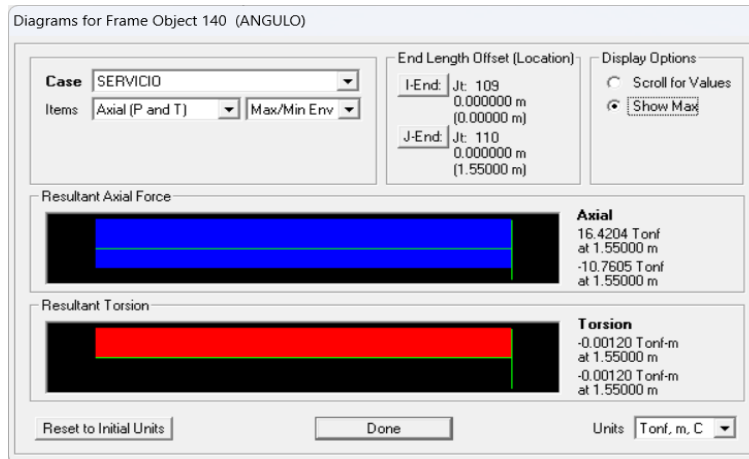


Figura 30. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

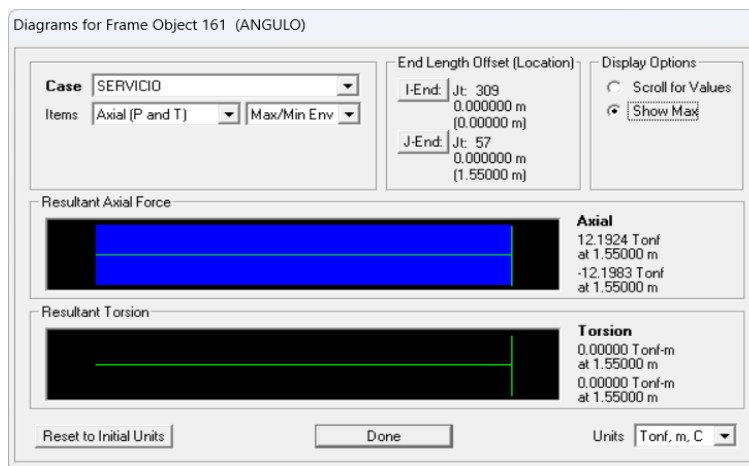


Figura 31. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

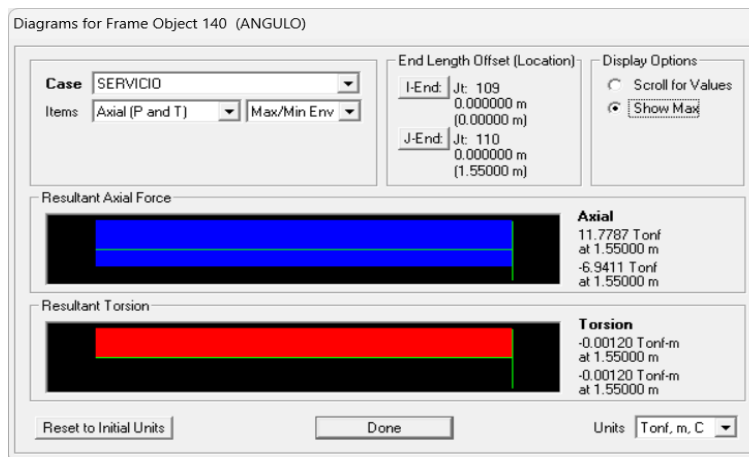


Figura 32. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

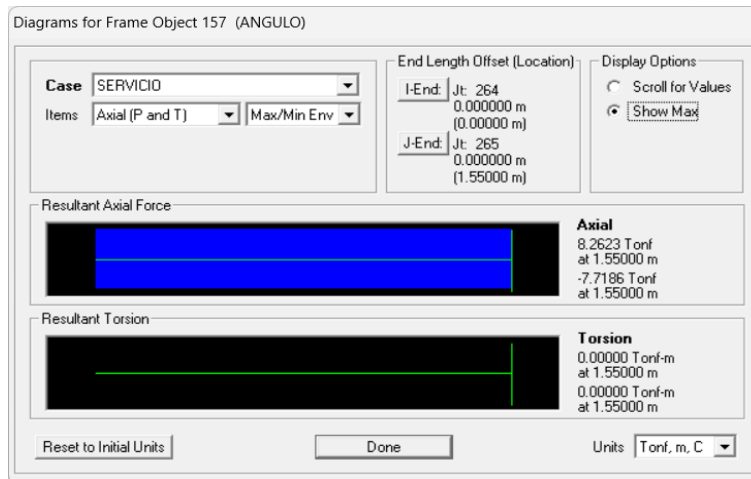


Figura 33. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

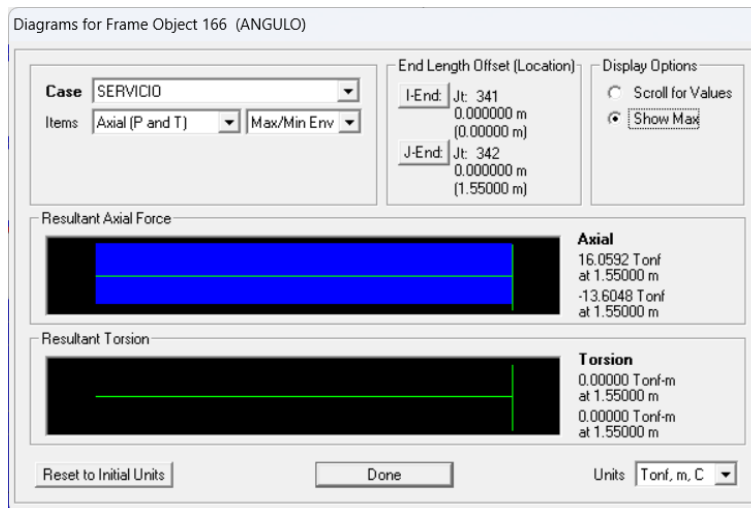


Figura 34. Solicitación máxima a compresión y tracción distribución continua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

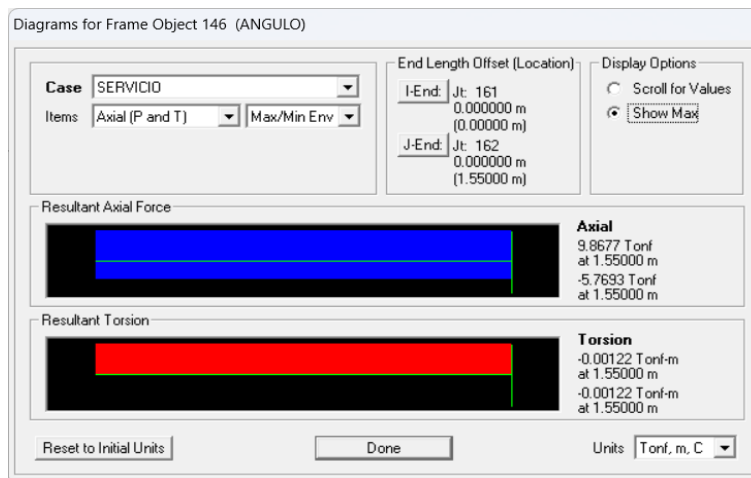


Figura 35. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

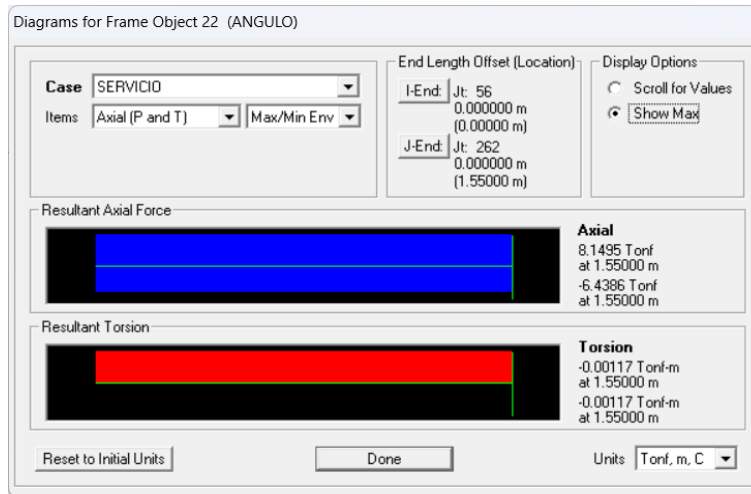


Figura 36. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

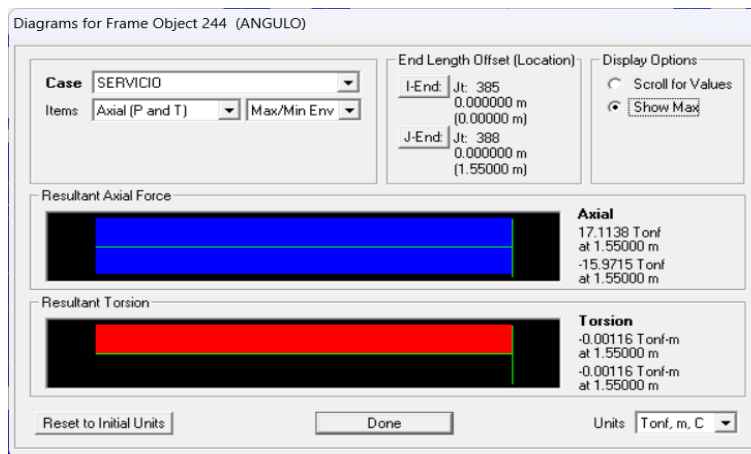


Figura 37. Solicitación máxima a compresión y tracción distribución continua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

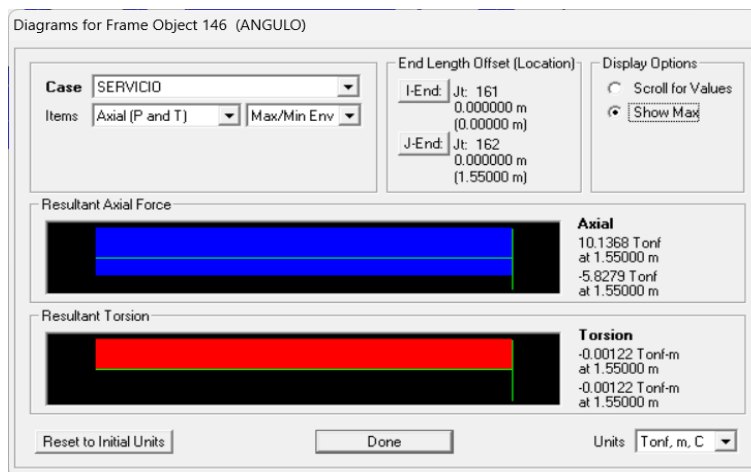


Figura 38. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

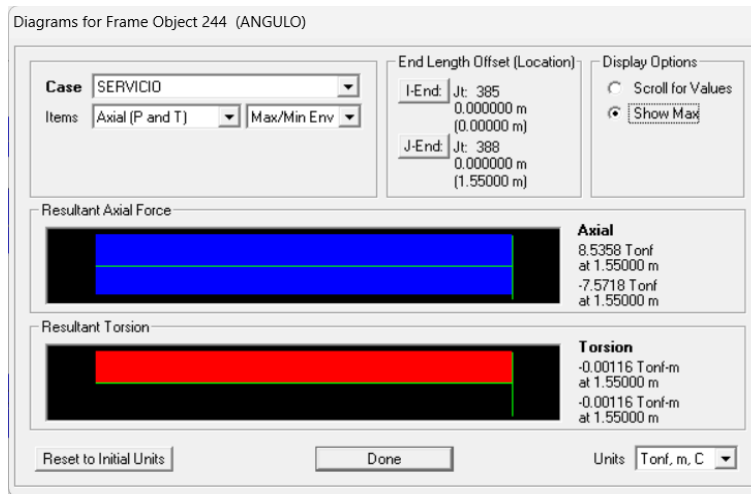


Figura 39. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

8.3 Solicitación diagonales

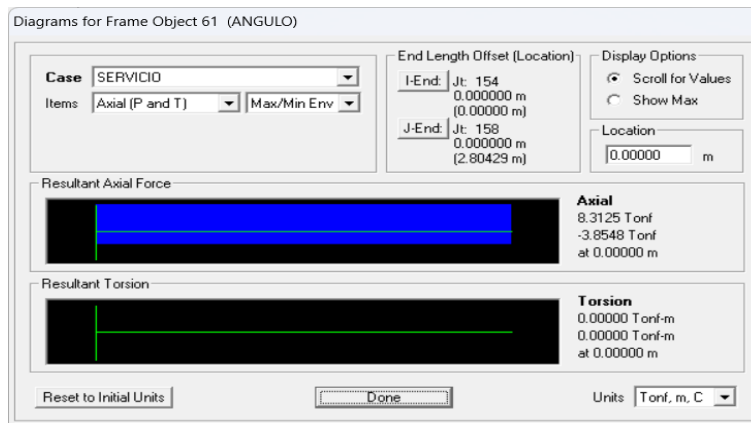


Figura 40. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

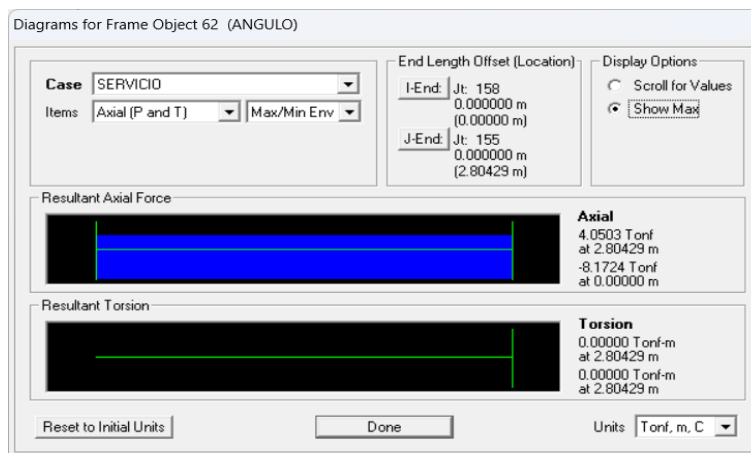


Figura 41. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia.

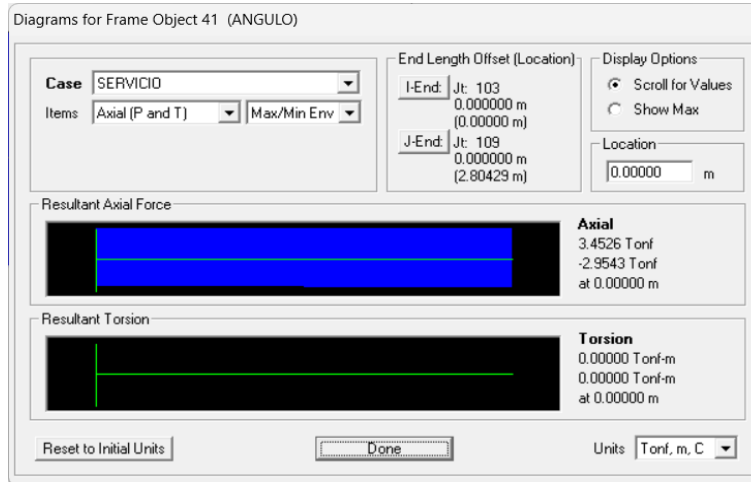


Figura 42. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia.

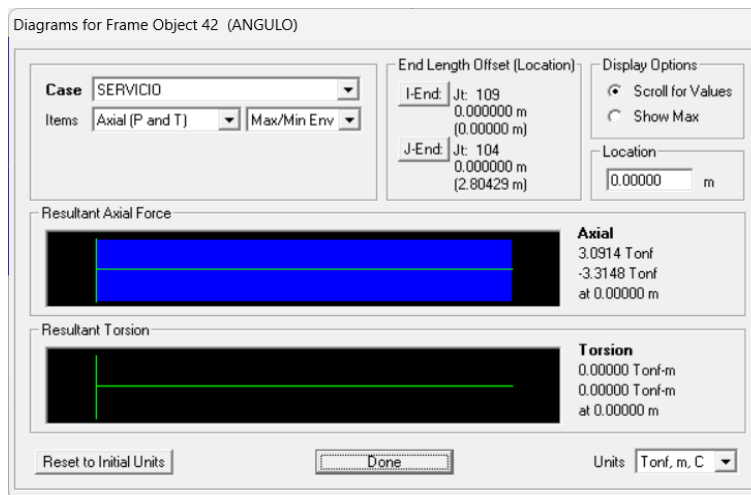


Figura 43. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 1.
Fuente: elaboración propia

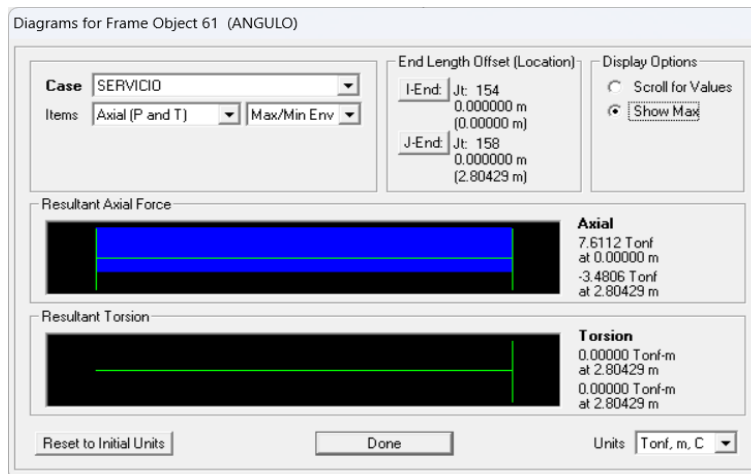


Figura 44. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

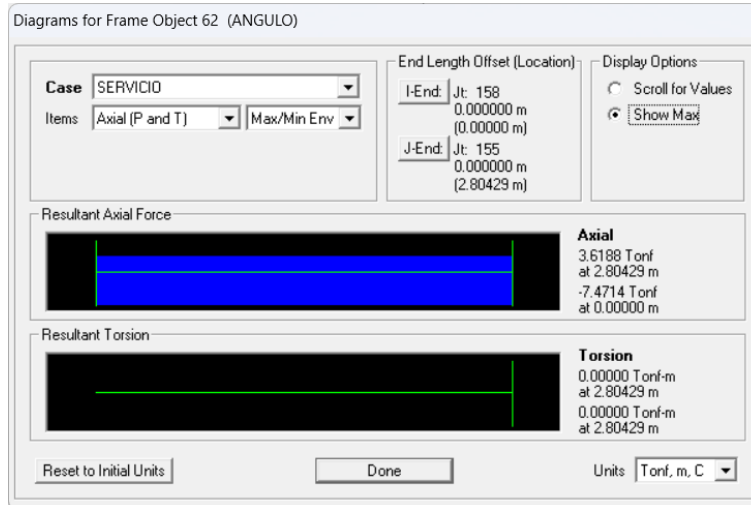


Figura 45. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

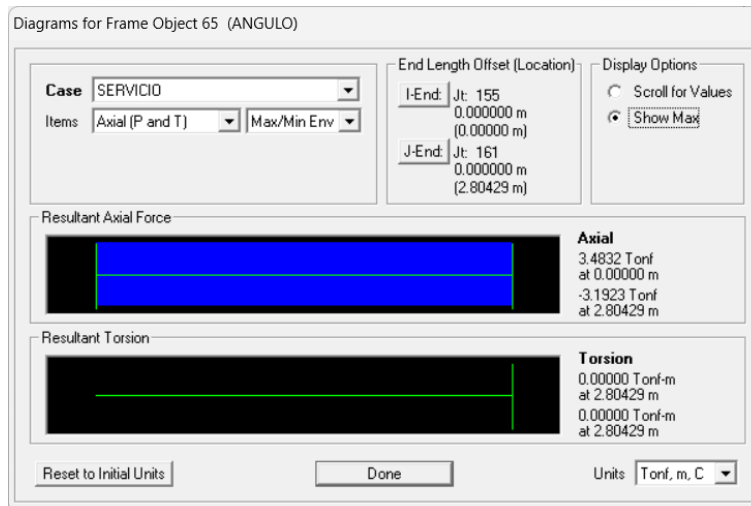


Figura 46. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia.

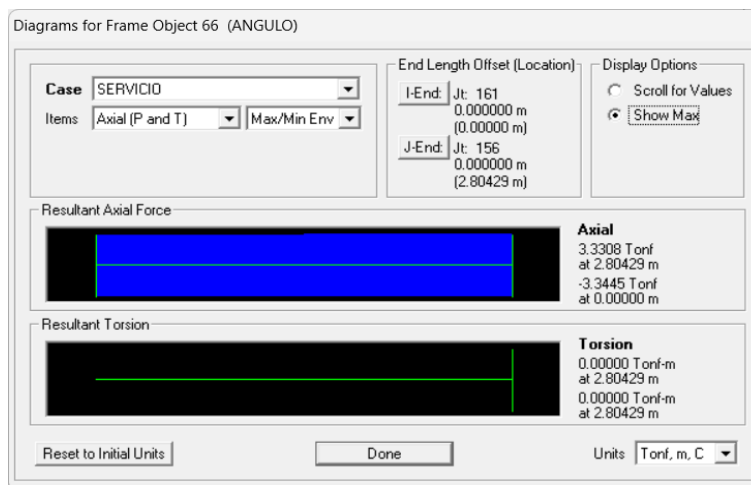


Figura 47. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 2.
Fuente: elaboración propia

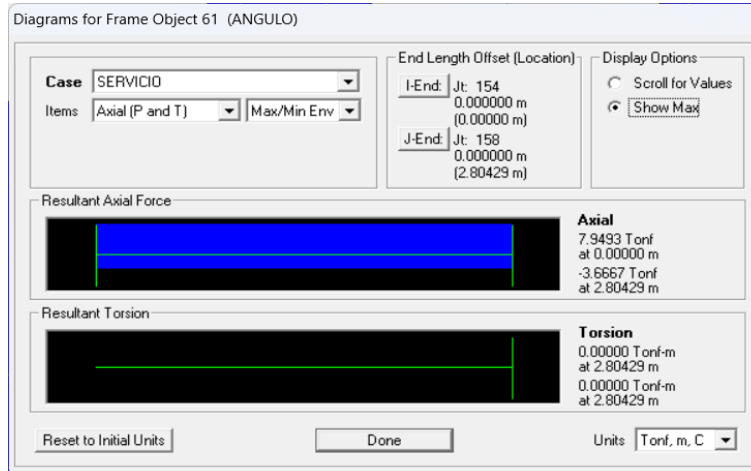


Figura 48. Solicitación máxima a compresión distribución continua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

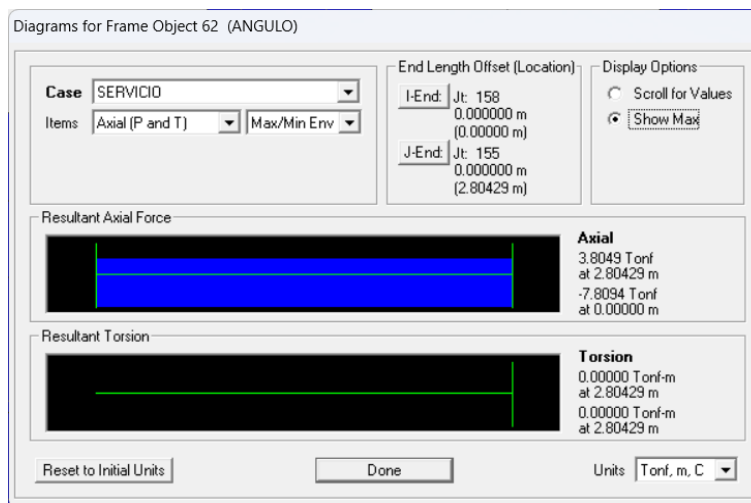


Figura 49. Solicitación máxima a tracción distribución continua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

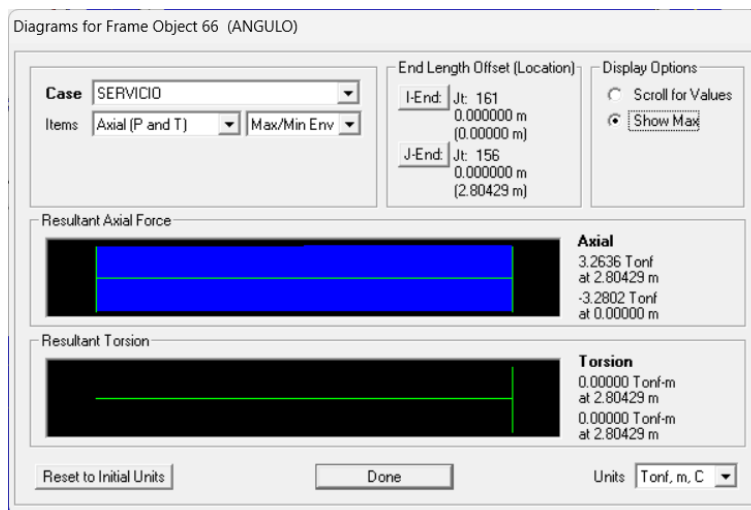


Figura 50. Solicitación máxima a compresión distribución discontinua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

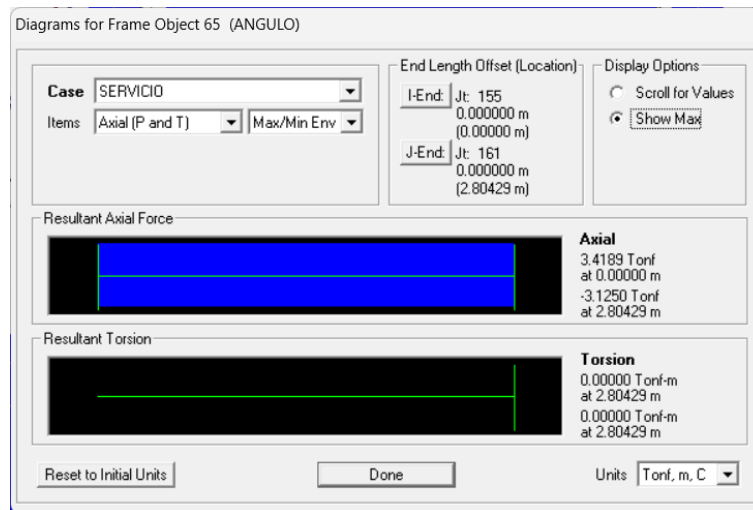


Figura 51. Solicitación máxima a tracción distribución discontinua Tipo 3.
Fuente: elaboración propia

9 Resultados

Los resultados obtenidos en la investigación del estado del arte se pueden observar en la Tabla 1. Ahora bien, se plantea mediante el análisis y modelación de un puente metálico esviado analizar el comportamiento de los cross frame y realizar la comparación entre los resultados obtenidos de la revisión teórica y los resultados obtenidos mediante en análisis matemático de un puente real.

Se presentan los resultados obtenidos a partir de las modelaciones del puente según las variaciones establecidas del cross frame.

Tabla 2. Límites de tensión para los elementos de los cross-frame.

Límites a tensión Tonf		
Solicitud	Cuerda	Diagonal
Compresión	18.83	22.17
Tracción	109.6	109.6

Fuente: elaboración propia

La Tabla 2 presenta los límites a tracción y compresión de los elementos que componen los cross-frame de acuerdo a la norma de diseño de puentes CCP-14, además se debe resaltar que los límites a compresión en los elementos que componen los cross-frame o arriostramientos transversales son los determinantes si la sección empleada de cuerda o diagonal cumpla el diseño, ya que este límite está atado a consideraciones normativas y a relaciones geométricas con las longitudes de los componentes.

Tabla 3. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la cuerda superior para las solicitudes dadas debido a la Compresión.

Cuerda Superior	Disposición	Solicitud Tonf	
		Compresión	Comprobación
Tipo 1	Continua	3.25	Cumple
	Discontinua	5.89	Cumple
Tipo 2	Continua	2.89	Cumple
	Discontinua	6.20	Cumple
Tipo 3	Continua	2.96	Cumple
	Discontinua	6.73	Cumple

Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la cuerda superior para las solicitudes dadas debido a la Tracción.

Cuerda Superior	Disposición	Solicitud Tonf	
		Tracción	Comprobación
Tipo 1	Continua	3.27	Cumple
	Discontinua	5.71	Cumple
Tipo 2	Continua	1.92	Cumple
	Discontinua	4.64	Cumple
Tipo 3	Continua	1.69	Cumple
	Discontinua	5.44	Cumple

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la cuerda inferior para las solicitudes dadas debido a la Compresión.

Cuerda Inferior	Disposición	Solicitud Tonf	
		Compresión	Comprobación
Tipo 1	Continua	16.42	Cumple
	Discontinua	11.78	Cumple
Tipo 2	Continua	16.06	Cumple
	Discontinua	9.87	Cumple
Tipo 3	Continua	17.11	Cumple
	Discontinua	10.14	Cumple

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la cuerda inferior para las solicitudes dadas debido a la Tracción.

Cuerda Inferior	Disposición	Solicitud Tonf	
		Tracción	Comprobación
Tipo 1	Continua	12.2	Cumple
	Discontinua	7.72	Cumple
Tipo 2	Continua	13.6	Cumple

Tipo 3	Discontinua	6.44	Cumple
	Continua	15.97	Cumple
	Discontinua	7.57	Cumple

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la diagonal para las solicitudes dadas debido a la Compresión.

Diagonal	Disposición	Solicitud Tonn	
		Compresión	Comprobación
Tipo 1	Continua	8.31	Cumple
	Discontinua	3.45	Cumple
Tipo 2	Continua	7.61	Cumple
	Discontinua	3.48	Cumple
Tipo 3	Continua	7.95	Cumple
	Discontinua	3.26	Cumple

Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Comparación entre las distribuciones continua y discontinua en la diagonal para las solicitudes dadas debido a la Tracción.

Diagonal	Disposición	Solicitud Tonn	
		Tracción	Comprobación
Tipo 1	Continua	8.17	Cumple
	Discontinua	3.31	Cumple
Tipo 2	Continua	7.47	Cumple
	Discontinua	3.35	Cumple
Tipo 3	Continua	7.81	Cumple
	Discontinua	3.13	Cumple

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, para cada una de las distribuciones de arriostamiento transversal usada no se super el límite de tensión que puede soportar la tensión y que se muestra en la Tabla 2. Sin embargo, se analiza cada elemento según los resultados obtenidos:

- Cuerda superior: se observa un incremento del orden del 50% entre la solicitud por servicio de la distribución discontinua con la continua para cada uno de los arreglos de cross-frame, es decir que, si se presentara una distribución óptima para controlar la compresión de la cuerda superior de los arriostamientos transversales en puentes metálicos con ángulo de esviaje de 35 grados, es la distribución continua.
- Cuerda superior: aunque la tracción no domina el diseño se observa un comportamiento similar al que presenta por compresión de la cuerda superior en el diseño de los arriostamientos transversales en puentes metálicos con ángulo de esviaje de 35 grados.

- Cuerda inferior: se observa una disminución del orden del 40% entre la solicitación por servicio de la distribución discontinua con la continua para cada uno de los arreglos de cross-frame, además se observa que las solicitaciones alcanzadas en la distribución continua son cercanas al límite de compresión presentado en la Tabla 2, es decir que si se presentara una distribución óptima para controlar la compresión de la cuerda inferior de los arriostramientos transversales en puentes metálicos con ángulo de esviaje de 35 grados, es la distribución discontinua.
- Cuerda inferior: aunque la tracción no domina el diseño se observa un comportamiento similar al que presenta por compresión de la cuerda inferior en el diseño de los arriostramientos transversales en puentes metálicos con ángulo de esviaje de 35 grados.
- Diagonal: se observa una disminución del orden del 110% entre la solicitación por servicio de la distribución discontinua con la continua para cada uno de los arreglos de cross-frame, es decir que, si se presentara una distribución óptima para controlar la compresión de la diagonal de los arriostramientos transversales en puentes metálicos con ángulo de esviaje de 35 grados, es la distribución discontinua.
- Diagonal: aunque la tracción no domina el diseño se observa un comportamiento similar al que presenta por compresión de la diagonal en el diseño de los arriostramientos transversales en puentes metálicos con ángulo de esviaje de 35 grados.
- Revisando los resultados en las tablas que presenta cada uno de los componentes de los cross-frame o arriostramientos transversales, de acuerdo con los análisis previamente presentados, se obtiene que la disposición más eficiente es la discontinua para puentes metálicos con ángulo de esviaje de 35 grados, la cual sus valores máximos están alejados de los límites, principalmente a compresión, aunque a compresión sea mas eficiente la distribución continua pero en las cuerdas inferiores son críticas, por lo tanto se recomienda realizar el diseño de los cross-frame en distribuciones intermitentes o discontinuos.
- Las dos configuraciones de los cross-frame cumplen satisfactoriamente su función en el puente será decisión del constructor y diseñador elegir la mas conveniente para el proyecto, considerando disponibilidad factores como disponibilidad de materiales, facilidad constructiva etc.

10 Referencias

- AASHTO. (2020). *LRFD Bridge Design Specifications* (9 th).
- Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica. (2014). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP14*.
- Beckmann, F., Chavel, B., Coletti, D., Cooper, J., Grubb, M., Frank, K., Fraser, G., Kozy, B., Medlock, R., Murray, G., Nguyen, T., Russo, F., Wallace, D., Walsh, S., White, D., & Yadlosky, J. (2016). *Skewed and Curved Steel I-Girder Bridge Fit NSBA Technical Subcommittee*.
- Coletti D, White D, Nguyen, Chavel, Grubb, & Boring. (2015). *FIT- UP CONSIDERATIONS FOR STEEL I GIRDER BRIDGES*.
- Mendoza, Riveros, & Londoño. (2020). Análisis al comportamiento de los elementos principales y de la losa tablero en puentes con diferentes arreglos de elementos transversales bajo efectos de cargas gravitacionales. *Investigación Formativa en Ingeniería*, 109-118.
- White, D. W., Coletti, D., Chavel, B. W., Sanchez, A., Ozgur, C., Chong, J. M. J., Leon, R. T., Medlock, R. D., Cisneros, R. A., Galambos, T. V., Yadlosky, J. M., Gatti, W. J., & Kowatch, G. T. (2012). *Guidelines for Analysis Methods and Construction Engineering of Curved and Skewed Steel Girder Bridges*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22729>
- Zhou, J., Bennett, C., Matamoros, P. E. A., Li, P. E. J. S., & Rolfe, P. E. (2016). *Skewed Steel Bridges: Effect of Cross-Frame Layout on Lateral Flange Bending Stresses*. www.ntis.gov.