



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO,
DIRIGIDO AL MÉTODO DE CÁLCULO DE LA
LONGITUD EFECTIVA EN CUERDAS DE
ARMADURAS DE ACERO CON CARGA AXIAL
VARIABLE**

Autor(es)

Daniel Alejandro Arboleda Barrera

David Arcila Flórez

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2021



REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO,
DIRIGIDO AL MÉTODO DE CÁLCULO DE LA LONGITUD EFECTIVA EN
CUERDAS DE ARMADURAS DE ACERO CON CARGA AXIAL VARIABLE

Daniel Alejandro Arboleda Barrera

David Arcila Flórez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor:

Mauricio José Castro García I.C., M.Sc.C.E.

Línea de Investigación:

Ingeniería Estructural

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2021

CONTENIDO

1	RESUMEN	7
2	INTRODUCCIÓN.....	8
3	OBJETIVOS	9
3.1	OBJETIVO GENERAL	9
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
4	MARCO TEÓRICO.....	9
5	METODOLOGÍAS DE CÁLCULO	15
5.1	CARGA CRÍTICA DE PANDEO ELÁSTICO DE EULER	15
5.2	TEORÍA DE SHRIVASTAVA.....	17
5.3	VALIDACIÓN DE LA TEORÍA DE SHRIVASTAVA	20
6	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
7	CASO DE ESTUDIO.....	24
7.1	CASO 1: LONGITUD NO ARRIOSTRADA IGUAL A LA SEPARACIÓN ENTRE PERLINES	27
7.2	CASO 2: LONGITUD NO ARRIOSTRADA IGUAL A LA SEPARACIÓN ENTRE LAS RIOSTRAS DE TECHO	34
7.3	CASO 3: LONGITUD EFECTIVA: APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SHRIVASTAVA.....	40
8	CONCLUSIONES.....	49
9	REFERENCIAS	50
10	ANEXOS	52
10.1	CARGAS DE VIENTO	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de longitud efectiva establecidos en las especificaciones de diseño para cuerdas de armaduras de acero	14
Tabla 2. Resumen de resultados de los casos de estudio.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de cerchas.....	10
Figura 2. Comportamiento de una cercha tipo Pratt simple al ser sometida a una carga gravitacional. Tomado de Vector Mechanics for Engineers, Beer and Johnston	10
Figura 3. Comportamiento de una cercha tipo Pratt simple al ser sometida a una carga de succión.....	10
Figura 4. Falla por pandeo en la cuerda inferior a causa de efecto de succión. Viento Ohio, 2008. Tomado de Steel Joist Institute	11
Figura 5. Pandeo en elementos a compresión.	12
Figura 6. Ejemplo de nomogramas para determinar el factor de longitud efectiva para miembros en pórticos arriostrados y en pórticos no arriostrados.....	13
Figura 7. Posiciones de equilibrio de una columna larga sujeta a compresión. Tomado de (Soto Rodríguez, 2005)	16
Figura 8. Descripción de los elementos que hacen parte de una armadura. Tomado de (Longitud efectiva de pandeo en elementos de cerchas de acero, 2012)	17
<i>Figura 9. Modelo propuesto por Shrivastava para determinar la carga crítica de pandeo. Tomado de Shrivastava (1980)</i>	<i>18</i>
Figura 10. Modelo numérico con condición estable.....	21
Figura 11. Advertencias de inestabilidad en el modelo estructural	22
Figura 12. Modelo numérico con condición de inestabilidad	22
Figura 13. Vista en planta de una cercha espacial. Elaboración propia.....	23
Figura 14. Vista en elevación de una cercha bidimensional intermedia.....	23
<i>Figura 15. Isométrico de la cubierta</i>	<i>25</i>
<i>Figura 16. Planta típica de la cubierta</i>	<i>25</i>
<i>Figura 17. Sección transversal de la cercha.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 18. Fuerzas internas, combinación 1.2D+1.6LR+0.5W (compresión en la cuerda superior) (kN)</i>	<i>27</i>
<i>Figura 19. Fuerzas internas, combinación 0.9D+1.0W (compresión en la cuerda inferior) (kN).....</i>	<i>27</i>
Figura 20. Nodos de referencia de la cuerda superior e inferior	27
Figura 21. Aberturas de la bodega	52
Figura 22. Localización del proyecto	54
Figura 23. Zona de exposición con referencia al proyecto.....	54
Figura 24. Coeficientes de direccionalidad.....	55
Figura 25. Mapa de amenaza eólica de Colombia	55
Figura 26. Coeficiente de importancia	56
Figura 27. Constantes de exposición del terreno	56
Figura 28. Coeficiente de presión interna.....	58
Figura 29. Coeficientes de presión externa	59
Figura 30. Localización de zonas para coeficientes de presión externa	59
Figura 31. Coeficientes de presión externa en fachadas para viento en dir. X	60
Figura 32. Coeficientes de presión externa en fachadas para viento en dir. Y	60

Figura 33. Coeficientes de presión externa e interna, sección A con viento en dirección X	61
Figura 34. Coeficientes de presión externa e interna, sección B con viento en dirección X	61
Figura 35. Coeficientes de presión externa e interna, sección A con viento en dirección Y	61
Figura 36. Coeficientes de presión externa e interna, sección B con viento en dirección Y	62
Figura 37. Sumatoria de coeficientes de presión, sección A con viento en dirección X	62
Figura 38. Sumatoria de coeficientes de presión, sección B con viento en dirección X	62
Figura 39. Sumatoria de coeficientes de presión, sección A con viento en dirección Y	63
Figura 40. Sumatoria de coeficientes de presión, sección B con viento en dirección Y	63
Figura 41. Asignación de viento $WX(C_{pi+})SeccA$ (kN/m)	64
Figura 42. Asignación de viento $WX(C_{pi-})SeccA$ (kN/m)	64
Figura 43. Asignación de viento $WX(C_{pi+})SeccB$ (kN/m)	64
Figura 44. Asignación de viento $WX(C_{pi-})SeccB$ (kN/m)	65
Figura 45. Asignación de viento $WY(C_{pi+})SeccA$ (kN/m)	65
Figura 46. Asignación de viento $WY(C_{pi-})SeccA$ (kN/m)	65
Figura 47. Asignación de viento $WY(C_{pi+})SeccB$ (kN/m)	65
Figura 48. Asignación de viento $WY(C_{pi-})SeccB$ (kN/m)	65

1 RESUMEN

En la presente monografía se trata el problema del análisis y diseño de una cuerda de armadura de acero con carga axial variable entre los puntos arriostrados, con referencia particular a la teoría y la aplicación del método de Shrivastava.

Se abordará el principal problema en los elementos de armaduras de acero que consiste en la capacidad a compresión con la cual se evitaría una falla por pandeo y/o estabilidad que por lo general gobierna el diseño de elementos en acero.

La aplicación de los casos de estudio se enfocará en la determinación de la longitud efectiva, por ejemplo, se estudiará el caso en el cual la longitud efectiva es igual a la longitud no arriostrada y otro caso donde la longitud efectiva se determina por un análisis que incluye la variación de la carga axial en un tramo de longitud no arriostrado.

Finalmente, el propósito de la monografía es lograr un diseño estructural adecuado, eficiente, óptimo y económico sin comprometer en ningún momento la estabilidad de la estructura.

Palabras claves: Shrivastava, armadura, cuerdas, longitud no arriostrada, longitud efectiva, axial, pandeo.

2 INTRODUCCIÓN

A través del desarrollo de la ingeniería estructural, se ha enfrentado el problema de tener grandes luces en diferentes tipos de estructuras, a lo que se han propuesto diversas soluciones, tales como el uso de elementos preesforzados, secciones de gran peralte o cerchas bidimensionales o espaciales, y el mejoramiento en la calidad de los materiales utilizados, entre otras. En particular, en el caso de las cerchas, no hay unidad de criterios al realizar análisis de pandeo y/o estabilidad de sus cuerdas.

De acuerdo con lo anterior, el presente estudio se enfoca en el caso de las cuerdas de armaduras en acero. Cuando se observa con detenimiento la práctica profesional, se logra identificar la aplicación de distintos criterios al momento de abordar el tema de la estabilidad en estos elementos, no solo en Colombia, sino también en el resto del mundo, y que aún se debe profundizar en las investigaciones para determinar un valor de la longitud efectiva que permita optimizar los diseños sin comprometer la seguridad de la estructura. Aunque a lo largo del contenido del informe se hará mención de valores de longitud efectiva sugeridos por diferentes autores y códigos de diseño, el objeto de este informe consiste en aportar información que permita afianzar el criterio a la hora de realizar las verificaciones de pandeo en cuerdas de cerchas y a su vez, suministre al ingeniero calculista una herramienta para optimizar el diseño a partir de un análisis más refinado.

Como materia prima de la investigación se tiene en primera instancia la bibliografía de referencia que permite tener un acercamiento con metodologías empleadas por diversos autores en el cálculo de la longitud efectiva y adicionalmente, se tiene una propuesta investigativa previa (Arboleda, 2020), donde se plantean dos opciones de cálculo de la longitud efectiva para el caso de estudio de un puente tipo Pony, de donde se concluye cuál de las condiciones allí planteadas es más crítica.

Para el objeto de esta investigación se abordará una metodología que permita comparar los resultados obtenidos con respecto a un diseño realizado de forma convencional, teniendo en cuenta que bajo ninguna condición se puede comprometer la seguridad de la estructura, ya que generalmente, los elementos de una cercha que controlan el diseño son los que están sometidos a compresión. Esta consideración es de alto impacto, especialmente en elementos esbeltos que por lo general son más livianos, lo que significa menos consumo de acero, esta última condición es muy importante en la viabilidad de un proyecto no solo por su componente económico sino también pensando en una era de sostenibilidad y cuidado del medio ambiente, por lo tanto, es vital aprovechar al máximo la capacidad de los elementos estructurales.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Se tiene por objeto en el presente documento, elaborar el cálculo detallado de las cuerdas de cerchas en acero con carga axial variable, y adicionalmente traducir la metodología de cálculo en el valor de la longitud efectiva y comparar los hallazgos con los valores obtenidos en un diseño convencional.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar las hipótesis que se plantean al utilizar un método de cálculo de la longitud efectiva considerando la variación de la carga axial a lo largo de la cuerda de la cercha.
- Estudiar el comportamiento de una cuerda sometida a carga axial de compresión para el estado límite de pandeo fuera del plano de la cercha.
- Validar la metodología de cálculo para la estabilidad global de la cuerda con carga axial variable por medio de una modelación matemática en el software de análisis y diseño Midas Gen.

4 MARCO TEÓRICO

Para comenzar, es pertinente mencionar que una cercha es una estructura conformada por una serie de miembros solicitados únicamente por cargas axiales de tracción y compresión, como resultado de tres idealizaciones fundamentales: 1) los miembros son rectos, 2) los miembros se conectan en nudos articulados, y 3) las cargas se aplican en los nudos. Existe una gran variedad de tipología de las cerchas, con lo que se logra versatilidad en el diseño (véase la Figura 1). En el ámbito de las estructuras metálicas se llega con frecuencia a soluciones con estructuras tipo cercha, por las ventajas que ofrecen su eficiencia para cubrir luces considerables y su versatilidad para acomodarse a distintas condiciones funcionales. Por otro lado, el uso de estas estructuras requiere consideraciones especiales en el diseño. En la Figura 2, los elementos A-D y D-B conforman la cuerda inferior de la armadura y, bajo la carga mostrada, estos elementos trabajan a tracción, pero se debe tener en cuenta que esto sucede cuando están sujetos a cargas verticales (gravitacionales), pero ¿qué ocurre cuando se presentan presiones netas hacia arriba por efectos de succión del viento? En este caso el comportamiento del elemento se invierte (véase la *Figura 3*) y las cuerdas inferiores entran a trabajar a compresión y es allí donde se pueden presentar inconvenientes de estabilidad y pandeo cuando no se cuenta con un buen soporte lateral.

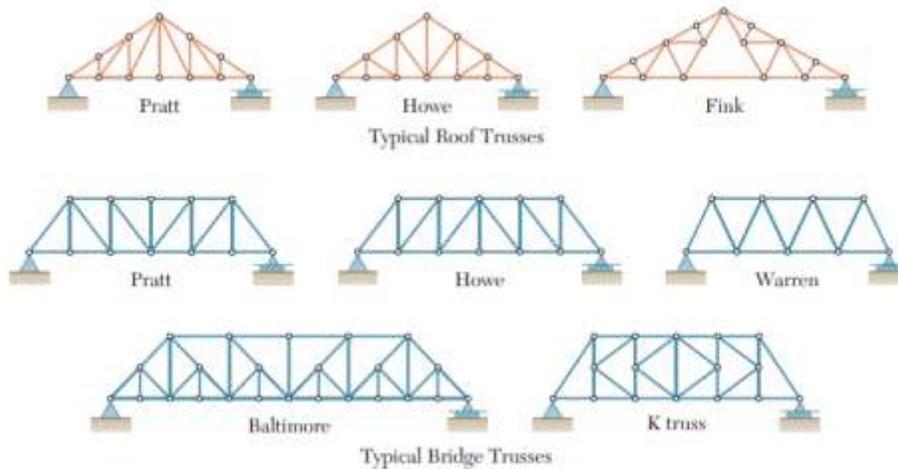


Figura 1. Tipos de cerchas.
Tomado de Vector Mechanics for Engineers, Beer and Johnston

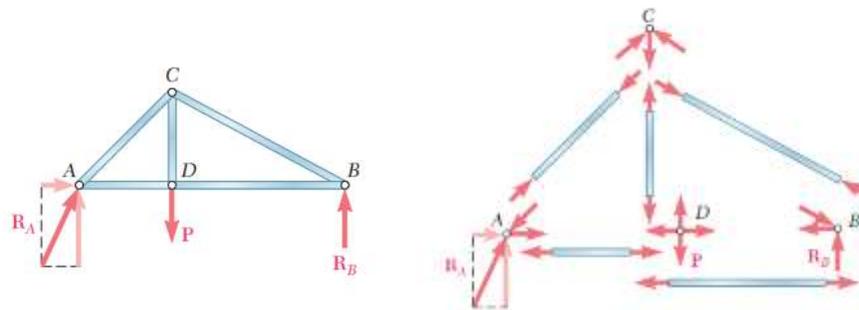


Figura 2. Comportamiento de una cercha tipo Pratt simple al ser sometida a una carga gravitacional. Tomado de Vector Mechanics for Engineers, Beer and Johnston

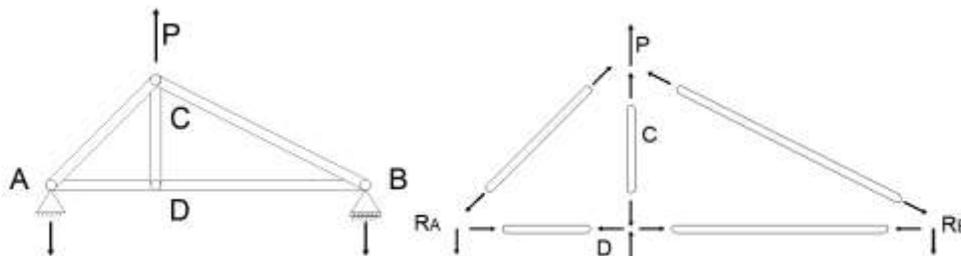


Figura 3. Comportamiento de una cercha tipo Pratt simple al ser sometida a una carga de succión. Elaboración propia

Al tratar el efecto del pandeo, la primera consideración es que este modo de falla está asociado a cargas de compresión. Como se indicó anteriormente, los elementos que componen una cercha trabajan a compresión o a tracción, según las cargas que actúan sobre ella. En vista de esto, es necesario otorgar especial cuidado en el arriostramiento y/o asignación de los elementos que están sometidos

a dichas solicitaciones, debido a que de allí se podrían presentar inconvenientes por temas de inestabilidad en la estructura (Véase la *Figura 4*)



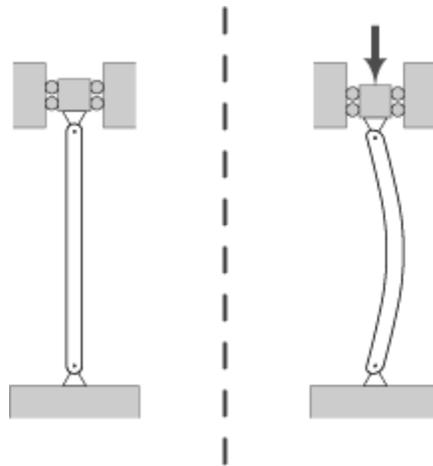
Figura 4. Falla por pandeo en la cuerda inferior a causa de efecto de succión. Viento Ohio, 2008. Tomado de Steel Joist Institute

Cuando se interactúa con otros profesionales de la ingeniería estructural, se identifica la aplicación de distintos criterios al escoger el valor de longitud efectiva L_c a usarse para calcular la relación de esbeltez en la ecuación de Euler para elementos sometidos a la compresión (Véase la sección 5.1). Como resultado, se genera incertidumbres acerca de cuál valor debería tomarse para obtener un diseño óptimo y seguro.

Por otra parte, el valor de la longitud efectiva lleva implícita la definición del coeficiente K , que, en la relación de esbeltez de la ecuación de Euler, es llamado coeficiente de longitud efectiva y se refiere precisamente a la proporción de la longitud no arriostrada que se debería tomar para el diseño de los miembros, según que formen parte de un pórtico arriostrado o no arriostrado y cuales sean las condiciones de restricción en sus extremos. Para ello, las normativas a lo largo del mundo sugieren algunos valores y, además, permiten utilizar valores inferiores cuando se realicen análisis más detallados. Para el caso de Colombia, el reglamento NSR-10 sugiere un valor de $K=1,0$ para miembros de pórticos arriostrados, pero permite tomar valores inferiores cuando se realicen análisis racionales de la estructura, esto de conformidad con la especificación AISC 360-10, en la cual se basa.

A efectos de la presente investigación se tomará el factor de $K=1,0$, tal como lo sugiere la norma y a través de la metodología que será mencionada en el capítulo 5, se realizará un estudio de caso, donde se abordará el análisis de una cercha

plana aplicando la metodología de Shrivastava, para hacer contraste con diversas longitudes efectivas especialmente en las cuerdas inferior y superior.



*Figura 5. Pandeo en elementos a compresión.
Tomado de es.wikipedia.org/wiki/Pandeo*

Para cada uno de los ejes de la sección transversal, la relación de esbeltez se define como KL/r (McCormac et al., 2012), donde K es el factor de longitud efectiva, L es la longitud no arriostrada del elemento y r es el radio de giro con respecto a cada uno de los ejes, que depende de la geometría de dicha sección transversal. Existe una estrecha relación entre la relación de esbeltez y el pandeo de un elemento (Beer & Johnston, 2009), tal que, si se tiene una relación de esbeltez más alta, se está más cerca de presentarse una falla por pandeo. En la Figura 5, se muestra la deformación que se da cuando un elemento a compresión como es el caso de los elementos A-D y D-B de la Figura 3, se pandea. Presentándose esta situación, será necesario conocer hasta qué valor será necesario disminuir el valor de longitud no arriostrada, según sean las condiciones de frontera del elemento, de manera tal que no se presente la falla del elemento por dichos efectos.

Por otra parte, se han planteado diversas formas para calcular los factores de longitud efectiva, por ejemplo, el uso de nomogramas, los cuales son representaciones gráficas de las formulaciones teóricas de un análisis por estabilidad, que permiten tener aproximaciones de los valores requeridos para un miembro en una estructura específica (McCormac. et al., 2012). Este método de cálculo asocia la rigidez (EI), la geometría (L) y el tipo de sistema estructural (pórticos arriostrados o pórticos no arriostrado) de un elemento con lo cual se determina una rigidez relativa en los extremos y así obtener un valor de coeficiente de longitud efectiva, K .

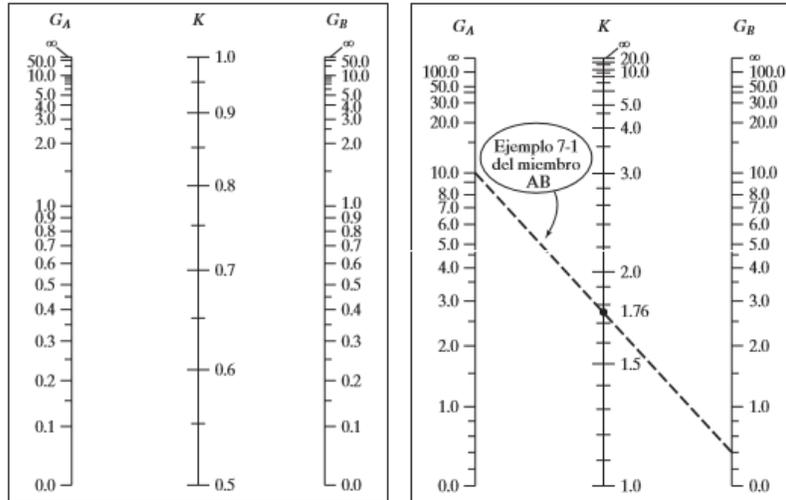


Figura 6. Ejemplo de nomogramas para determinar el factor de longitud efectiva para miembros en pórticos arriostrados y en pórticos no arriostrados.
Tomado de Manual AISC

Como ya se había mencionado anteriormente, gran parte de las investigaciones realizadas sobre el valor de la longitud efectiva ha sido de tipo experimental. Dichas metodologías combinadas con algunos análisis estructurales detallados han sido los pilares para sugerir los valores de K que se proponen hoy en día en diversas partes del mundo. Cuando se realiza un barrido de algunas normativas a lo largo del mundo, se logra evidenciar que los factores propuestos son en cierta medida muy similares. Por ejemplo, cuando se compara la norma chilena (Nch 428, 1994), la norma peruana (Norma E 090, 2008) y la norma colombiana (NSR-10, 2010), se observa un patrón similar entre todas ellas y se refiere a que todas sugieren que el valor del factor de longitud efectiva cuando se evalúa la estabilidad de elementos que trabajan a compresión, deberá ser 1,0 cuando no se realice un análisis más detallado. Sin embargo, al observar algunos otros códigos como el Eurocódigo 3 (1993) o los valores recomendados por otros autores (Packer, J. et al, 1997), se logran identificar valores que se salen de las recomendaciones comunes entre los códigos de diseño. A continuación, se presenta una tabla que hace relación precisamente a los valores sugeridos por diversos códigos de diseño y algunos autores allí mencionados.

Tabla 1. Valores de longitud efectiva establecidos en las especificaciones de diseño para cuerdas de armaduras de acero

Referencia de diseño	Valor de K para la cuerda en compresión de armadura de acero
AISC 360 - 10	1.0
NSR-10	1.0
CCP - 14	0.75 - 0.875
EUROCODE 3 (1993)	0.9
Norma SIA 263 (2003)	1.0
Guía AISI para armaduras de acero con elementos laminados en frío (1995)	1.0
Packer, J., & Henderson, J. (1997). Hollow Structural Section Connections and Trusses	0.9

Para comenzar con el análisis del caso, será necesario remitirse a las metodologías planteadas (Duan, L. et al, 1999), donde se hace referencia a implementar metodologías de análisis estructural tales como la de la compatibilidad de deformaciones, y la del análisis de la energía interna y externa de los elementos que trabajan a compresión, entre otros. Sin embargo, aunque en el caso presente estudio no es posible realizar ensayos de laboratorio para tomar datos experimentales de referencia, se podrá hacer la comparación de las metodologías analíticas que se realicen de forma teórica con respecto a la estabilidad del elemento estructural. Para ser un poco más precisos con los objetivos que plantea la investigación, también vale la pena validar la información mediante la modelación numérica a través del software de análisis y diseño Midas Gen, incrementando gradualmente la carga hasta llevarlo a la falla por inestabilidad, sin embargo, esto deberá tener unas consideraciones de por medio, debido a que como definió Hinojosa, I. 2009 en su tesis doctoral, existen variaciones en las formas en que puede pandearse un elemento sometido a compresión y, en vista de ello, se deberá pensar en la forma como se definirán las condiciones de frontera de los elementos que se tengan por objeto de estudio, con el fin de llegar a resultados que sean congruentes con los ensayos realizados en investigaciones previas. Por ejemplo, existe una metodología de cálculo donde se plantea un caso de estudio de un puente tipo Pony la cual considera la cuerda como una viga continua apoyada sobre resortes que considera la rigidez del marco rígido (Matthies, 2012). No obstante, tal propuesta está enfocada precisamente en un puente en forma de U, entonces se explora otras metodologías más aplicadas a cerchas de cubierta, de manera tal que los resultados obtenidos se comparen con un diseño convencional en el cual se usa un factor sugerido y recomendado en el medio. Seguido a lo que se mencionó anteriormente, se pretende acotar de forma muy objetiva una serie de condiciones

que dirigen la investigación hacia casos realmente aplicables en la cotidianidad del ejercicio. Los próximos capítulos de la investigación harán hincapié precisamente en el desarrollo de las consideraciones, la formulación matemática y el respectivo análisis que permitirá realizar el punto de comparación anteriormente mencionado.

5 METODOLOGÍAS DE CÁLCULO

5.1 CARGA CRÍTICA DE PANDEO ELÁSTICO DE EULER

Cuando se requiere calcular la capacidad a compresión de un elemento, se hace uso de las ecuaciones de pandeo elástico (Euler, 1744). Generalmente los elementos sometidos a compresión con grandes longitudes tienden a ser controlados por estabilidad y su capacidad resulta ser dependiente de la geometría de la sección transversal (A , I), el módulo de elasticidad (E) y la longitud no arriostrada L_x o L_y según la dirección en la que se estudie el pandeo; estos últimos factores componen los valores de L_x o L_y mencionados en el capítulo anterior. A continuación, se presenta la expresión que representa la carga crítica para que se genere el pandeo elástico.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_c} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad

I: Momento de inercia con respecto al eje alrededor del cual ocurre el pandeo

L_c : Longitud efectiva (KL)

L: Longitud entre soportes del elemento

P_{cr} : Carga crítica de pandeo

En primera instancia es importante entender la ecuación de pandeo elástico de Euler, ya que es el principio del fundamental para determinar la capacidad y estabilidad de elementos sometidos a compresión. A continuación, se presenta las hipótesis que plantea la ecuación de pandeo de Euler y el efecto que produce.

Hipótesis:

- El módulo de elasticidad del material es el mismo a tracción y a compresión.
- El material isotrópico.
- El elemento es perfectamente recto inicialmente.
- La carga es concéntrica.

- Los extremos del elemento son articulaciones perfectas, sin fricción
- No está restringido el acortamiento.
- No hay torsión ni pandeo local.
- No hay esfuerzos residuales.
- Las deformaciones son pequeñas.

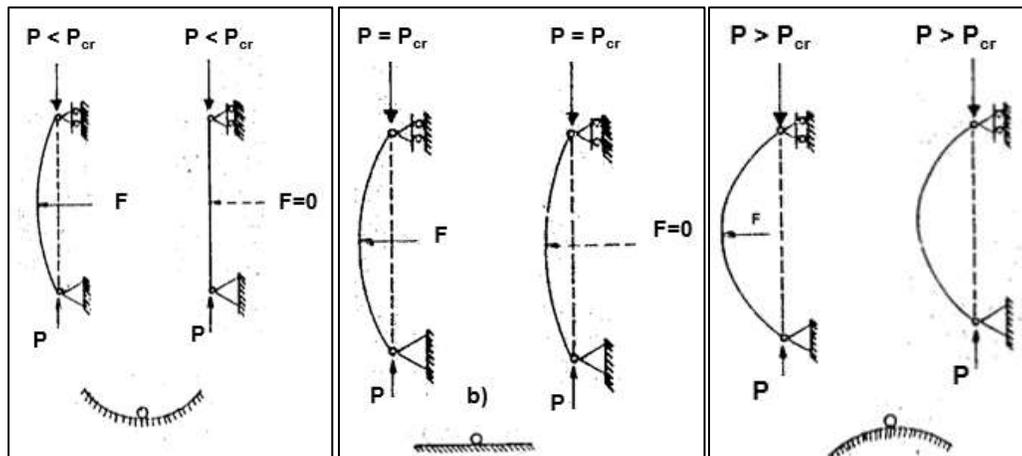


Figura 7. Posiciones de equilibrio de una columna larga sujeta a compresión. Tomado de (Soto Rodríguez, 2005)

En la Figura 7, se muestran distintas etapas de carga para un elemento que cumple las hipótesis planteadas para la ecuación de pandeo elástico de Euler, lo que corresponden a distintas condiciones de la columna:

- Mientras P se conserve menor que cierto valor denominado carga crítica, P_{cr} , al aplicar a la columna la fuerza horizontal, ésta se deformará, pero volverá a su condición inicial después de cesar esa fuerza. En este caso se dice que la columna está en “equilibrio estable”.
- Si la carga P tiene el mismo valor que la carga crítica, la columna puede volver a su configuración recta o mantenerse deformada lateralmente cuando se remueve la fuerza horizontal. En este caso, la columna corresponde a una posición de “equilibrio indiferente”.
- Ahora si la carga P es mayor que la carga crítica. La columna ya no regresa a su posición recta al remover la carga horizontal, entonces la columna corresponde a una condición de “inestable” o “desequilibrado”.

Es importante resaltar la condición de “inestable”, ya que es una condición que se quiere evitar en el diseño de los elementos, por lo tanto, sirve como punto de referencia para validar la teoría de Shrivastava, tal como se demostrará más adelante.

5.2 TEORÍA DE SHRIVASTAVA

Por lo general, en las cuerdas de las cerchas las fuerzas internas varían de panel a panel, tal y como se muestra en la siguiente figura. Este último comportamiento se estudia en el modelo matemático desarrollado por Shrivastava (1980), donde se calcula la carga crítica de un elemento considerando la variabilidad de la carga.

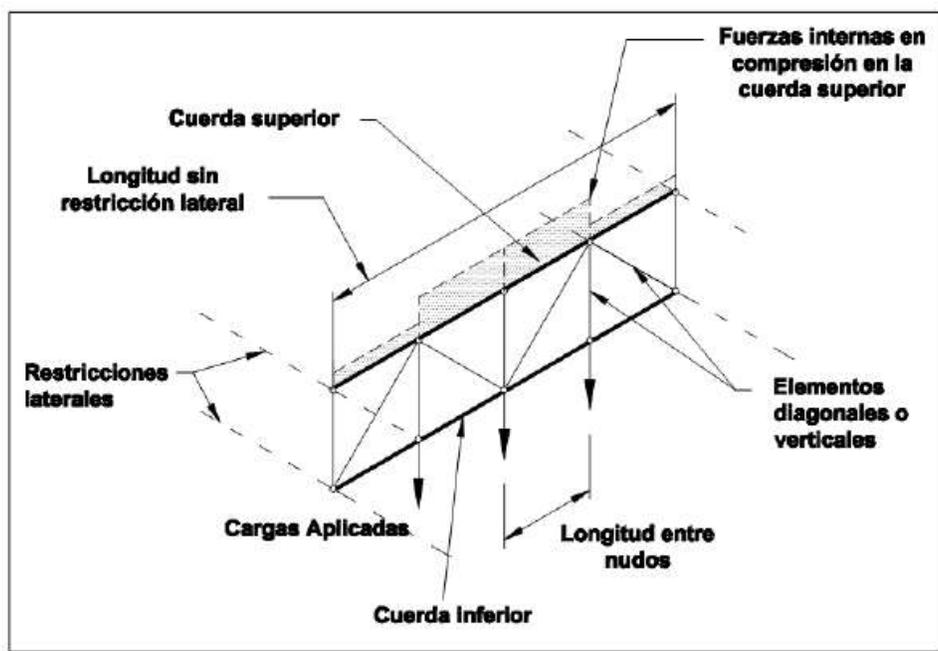


Figura 8. Descripción de los elementos que hacen parte de una armadura. Tomado de (Longitud efectiva de pandeo en elementos de cerchas de acero, 2012)

$$\left[(\sum P_n a_n) - \frac{\pi^2 EI}{\lambda l^2} \right] \left[(\sum P_n b_n) - \frac{4\pi^2 EI}{\lambda l^2} \right] - (\sum P_n c_n)^2 = 0 \text{ (Ec. 2)}$$

Donde:

$$a_n = \alpha_n + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \sin(2\pi\alpha_n)$$

$$b_n = \alpha_n + \left(\frac{1}{4\pi} \right) \sin(4\pi\alpha_n)$$

$$c_n = \left(\frac{1}{\pi} \right) \sin(\pi\alpha_n) + \left(\frac{1}{3\pi} \right) \sin(3\pi\alpha_n)$$

$$\alpha_n: \text{Factor de longitudes} = \frac{l_n}{l}$$

l_n : Longitud del panel de análisis

EI : Rigidez de la cuerda con respecto al eje de análisis

l : Longitud total de la cuerda en análisis

P_n : Carga axial que genera el mismo efecto de las fuerzas internas en el elemento n de la cercha

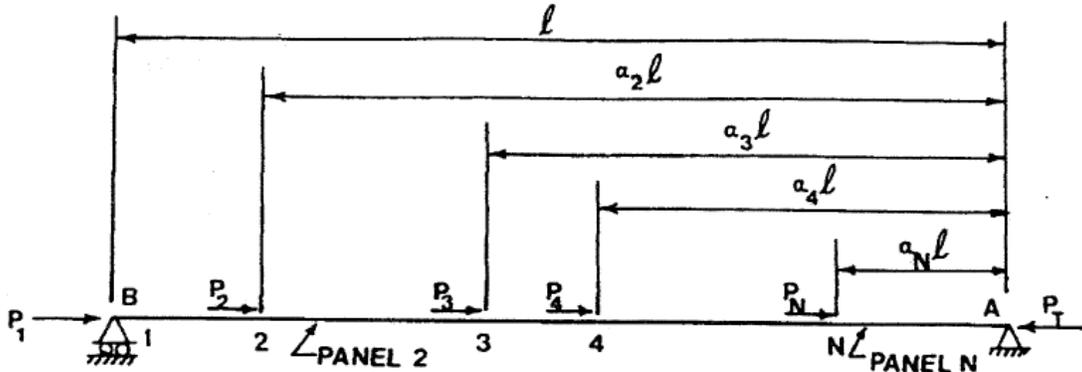


Figura 9. Modelo propuesto por Shrivastava para determinar la carga crítica de pandeo. Tomado de Shrivastava (1980)

La ecuación 2, corresponde a una ecuación cuadrática. Para la solución de dicha expresión se hará uso de las siguientes sustituciones.

$$A = \sum P_n a_\alpha; B = \sum P_n b_\alpha; C = \sum P_n c_\alpha$$

De donde se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{Pe}{\lambda} = \frac{\pi^2 EI}{\lambda l^2} = \frac{(4A+B) \pm \sqrt{(4A+B)^2 - 16(AB-C^2)}}{8} \quad (\text{Ec. 3})$$

Con posterioridad a la solución del polinomio de segundo orden, se obtiene una solución que se ajusta al comportamiento del elemento, dicha solución es el valor de λ , que corresponde al factor de carga de pandeo, el cuál dependerá de la variabilidad de las cargas en el elemento. Finalmente, la carga crítica a compresión estará denotada por la siguiente expresión:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \lambda P_T \quad (\text{Ec. 4})$$

Nótese que la expresión anterior corresponde a la ecuación desarrollada por Euler para el pandeo elástico y en el otro lado de la ecuación, el término λ , representa el factor por el cual habría que multiplicar el vector de cargas $P_1 \dots P_n$ aplicado para llegar a la condición de pandeo elástico. Un valor de λ menor que 1,0 indica que las cargas que se están aplicando exceden la condición de pandeo.

Así, el valor de λ indica la condición de las cargas aplicadas en relación con el pandeo:

- Si el valor de del factor de carga de pandeo es mayor que 1, las cargas impuestas son menores que las críticas.
- Si se encuentra entre 0 y 1, indica que las cargas que se están aplicando exceden la condición de pandeo elástico.
- Un valor de 1 indicará que las cargas impuestas son las cargas críticas.
- Un valor negativo indica que el pandeo se dará si se invierten las cargas.

En otras palabras, el concepto de Shrivastava nos indica que el miembro más cercano a la carga de pandeo se verá restringido por los miembros adyacentes con menos carga (Vinnakota, 2005). Una simplificación es presentada por Vinnakota, si la magnitud de la fuerza cambia entre dos puntos de arriostamiento perpendicular al plano de la cercha, entonces se puede determinar por la siguiente relación un factor que reduce la longitud no arriestrada.

$$K = 0.75 + 0.25 \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

P_1 : La mayor carga axial de las 2 fuerzas (un valor positivo indica compresión)

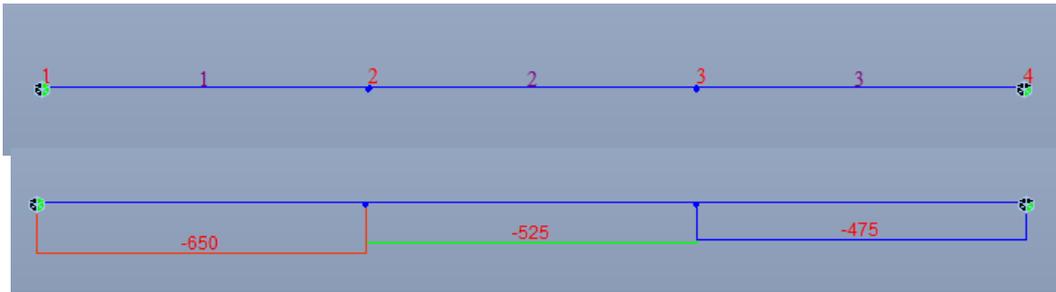
P_2 : La menor carga axial de las 2 fuerzas (un valor positivo indica compresión)

La metodología anteriormente expuesta servirá como materia prima para el análisis del caso de estudio que se tiene por objeto de investigación en el presente documento.

5.3 VALIDACIÓN DE LA TEORÍA DE SHRIVASTAVA

Se presenta la validación del principio de Shrivastava por medio de una modelación numérica que permite aclarar el concepto del factor λ . Se plantea un elemento de 4,5 m de longitud simplemente apoyado, se asigna un perfil HEA 200 y se considera 3 paneles con variación de la carga axial. A continuación, se presenta el cálculo del factor de pandeo λ .

CARGA DE PANDEO PARA COLUMNAS CON VARIAS CARGAS AXIALES APLICADAS SOBRE LA LONGITUD



DATOS	
Tipo =	Perfil_I
Perfil =	HE 200 A
I_x (mm ⁴) =	36920000
I_y (mm ⁴) =	13360000
r_x (mm) =	8.3
r_y (mm) =	5.0
Material =	A 572 Gr 50
F_y (MPa) =	345
F_u (MPa) =	450
E (MPa) =	200000
L (mm) =	4500

Para pandeo en el plano
Para pandeo fuera del plano

Longitud entre soporte lateral

Nodo	Elem.	L_{tramo} (m)	P_u (kN)	x_n (m)	α_n (m)	P_n (kN)	a_n	b_n	c_n	$a_n P_n$ (kN)	$b_n P_n$ (kN)	$c_n P_n$ (kN)
1				0.00	1.00	650.0	1.00	1.00	0.00	650.0	650.0	0.0
	1	1.50	650.0									
2				1.50	0.67	-125.0	0.53	0.74	0.28	-66.1	-91.9	-34.5
	2	1.50	525.0									
3				3.00	0.33	-50.0	0.47	0.26	0.28	-23.6	-13.2	-13.8
	3	1.50	475.0									
4				4.50	0.00	-475.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
	Σ	4.50			Σ	0.0			Σ	560.3	544.8	-48.2
		L (m)				P_u (kN)				A (kN)	B (kN)	C (kN)
										$\Sigma a_n P_n$	$\Sigma b_n P_n$	$\Sigma c_n P_n$

$$P_{equ} = \pi^2 EI / (\lambda L^2) = \text{Máx}(((4A+B) \pm ((4A+B)^2 - 16(AB-C^2))^{1/2}) / 8)$$

P_{equ} (kN) = 561.7 Máximo valor equivalente para el pandeo global

$$P_{cr} = \pi^2 EI / L^2$$

P_{cr} (kN) = 1302.3 Carga crítica de Euler para pandeo alrededor del eje Y

$\lambda = 2.32$ Factor de seguridad contra el pandeo global alrededor del eje Y

P (kN) = 1507.0 Carga máxima para pandeo elástico

L_c (m) = 4.18 Longitud efectiva equivalente para alcanzar pandeo elástico alrededor del eje Y

Se observa que el factor de pandeo λ es de 2,32, por lo tanto, es posible aumentar las cargas externas por este coeficiente para alcanzar la falla por pandeo elástico. Para corroborar dicho concepto se realiza un análisis P-delta.

Primero se realiza el análisis con un factor de mayoración de las cargas de 2,31, con lo que se esperaba que el sistema sea estable, por ende, no se espera desplazamientos anormales. En la siguiente imagen se puede corroborar que para un factor de 2,31 los desplazamientos globales son insignificantes con un valor máximo de 2,30 mm.

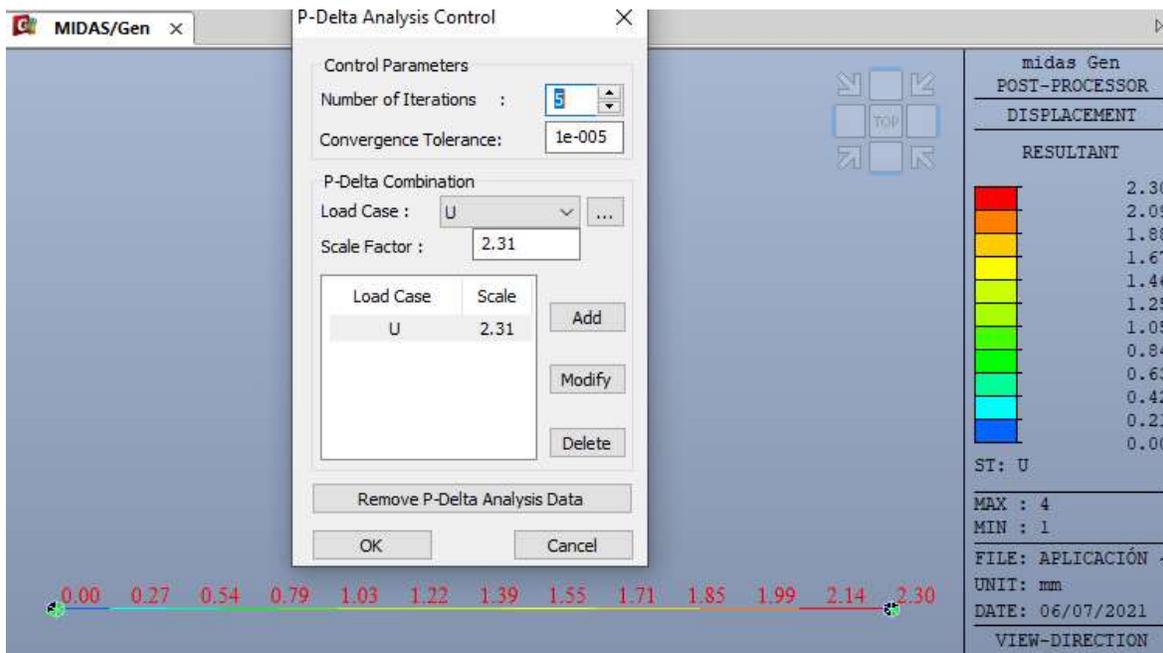


Figura 10. Modelo numérico con condición estable

Ahora con un factor de mayoración igual al factor λ , es decir, igual a 2,32, se esperaba que el sistema sea inestable. Como se observa en las siguientes imágenes, el programa de análisis y diseño Midas Gen presenta una ventana con advertencias de desplazamientos anormales, de igual forma se corrobora que, los desplazamientos del modelo están en el orden de $1,97 \times 10^{11}$ mm, valores demasiado grandes que indican inestabilidad del elemento.

```

WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.      3 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.      4 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT DY AT NODE NO.      5 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.      5 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT DY AT NODE NO.      6 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.      6 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT DY AT NODE NO.      7 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.      7 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT DY AT NODE NO.      8 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.      8 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT DY AT NODE NO.      9 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.      9 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT DY AT NODE NO.     10 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.     10 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT DY AT NODE NO.     11 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.     11 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT DY AT NODE NO.     12 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.     12 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT DY AT NODE NO.     13 IS ABNORMAL.
WARNING : DISPLACEMENT RZ AT NODE NO.     13 IS ABNORMAL.
ELEM. :    12 OF    12

-----SOLUTION TERMINATED
YOUR MIDAS JOB IS SUCCESSFULLY COMPLETED.....C:\Users\Daniel Arboleda\Downloads\Posgrado\Seminarario\MGB\Aplic
TOTAL SOLUTION TIME..:    3.76 [SEC]

-----

25 WARNING MESSAGES ARE FOUND.
PLEASE CHECK YOUR WARNING MESSAGE FILE :C:\Users\Daniel Arboleda\Downloads\Posgrado\Seminarario\MGB\Aplic
-----

```

Figura 11. Advertencias de inestabilidad en el modelo estructural

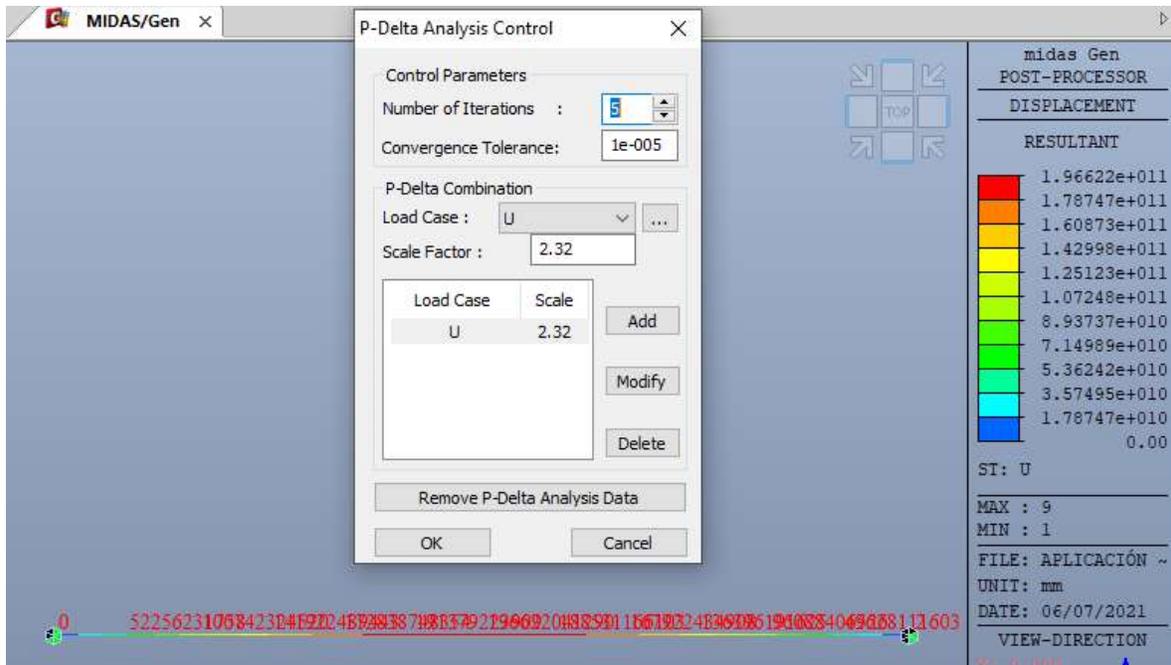


Figura 12. Modelo numérico con condición de inestabilidad

Los resultados de la modelación confirman los resultados esperados en el sistema y validan el concepto de que el factor λ , representa un coeficiente para que el vector de cargas $P_1 \dots P_n$ alcance la falla por pandeo elástico.

6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo del presente documento se ha mencionado repetidamente el tema de la longitud efectiva, no obstante, al visualizar de forma global la estructura, se puede observar que esta se compone de diversos elementos como se muestra a continuación.

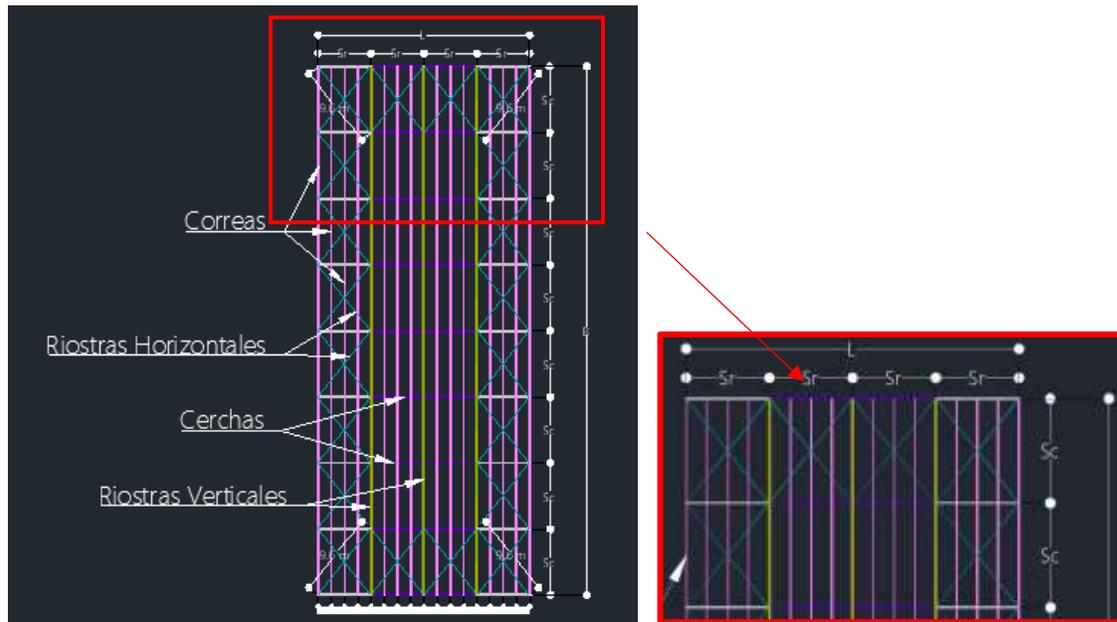


Figura 13. Vista en planta de una cercha espacial. Elaboración propia

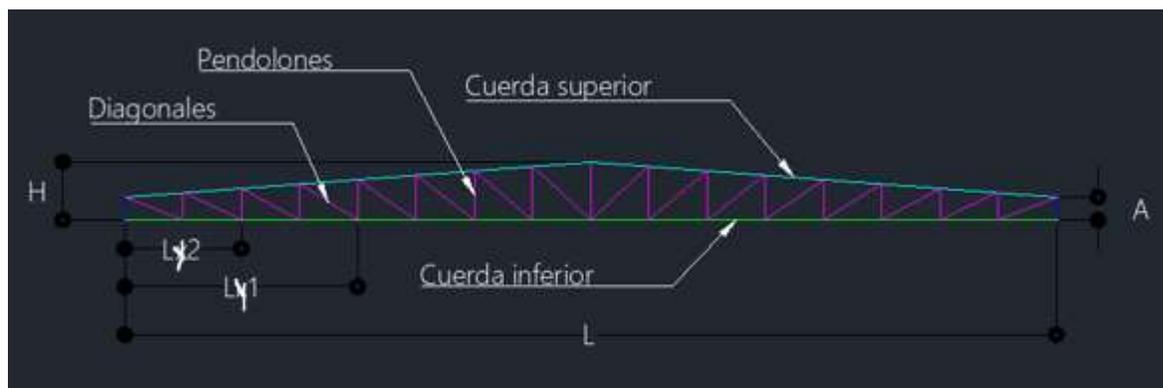


Figura 14. Vista en elevación de una cercha bidimensional intermedia

Obsérvese que, en la figura anterior, se presenta una proyección en planta de una estructura de cubierta que está compuesta por un conjunto de cerchas dispuestas paralelamente entre sí, las cuáles cargan una serie de correas y están restringidas por riostras horizontales y verticales. A su vez, las cerchas están compuestas por una serie de elementos, como se indica en la Figura 8. De acuerdo con lo anterior, se tiene la siguiente nomenclatura.

L: Longitud total de la cercha.

L_y : Longitud no arriostrada de las cuerdas superior e inferior.

A: Arranque de la cercha.

H: Altura total de la cercha.

S_r : Separación entre riostras horizontales.

S_c : Separación entre cerchas.

Ahora, nótese que L_y indica la longitud no arriostrada de las cuerdas, pero se tiene dos posibles longitudes no arriostradas L_{y1} y L_{y2} , ya que, en la práctica se ha usado uno u otro valor para diseñar las cuerdas a compresión, no obstante, existe discusiones sobre cuál de los dos valores es el correcto. Exponiendo cada uno de los casos, L_{y1} se define como la longitud entre los nudos donde llegan las riostras horizontales o verticales, por otro lado, L_{y2} se define como la separación entre perlines o tornapuntas.

Según lo anterior, en la presente investigación se buscará establecer criterios que permitan optimizar los diseños con base en el uso de los valores adecuados de la longitud efectiva.

7 CASO DE ESTUDIO

Se plantea el análisis y diseño estructural de una cubierta metálica para una bodega industrial localizada en la ciudad de Cartagena. La cercha está conformada por cuerdas, paralelas y diagonales en sección T a partir de dos ángulos iguales conectados por una placa de 9 mm, cada cercha está típicamente espaciada cada 7,5 m. Adicional, la cubierta cuenta con perlines en C formados en frío los cuales son los encargados de soportar y transmitir las cargas, por otro lado, se cuenta con contravientos (riostras horizontales) en varilla lisa con el fin de garantizar un amarre, arriostramiento y un diafragma de cubierta (flexible). También se cuenta con riostras verticales que sirven de arriostramiento lateral de la cuerda inferior. La teja de cubierta es tipo Standing Seam con doble capa y aislamiento termoacústico. A continuación, se presentan la geometría y la configuración estructural de la cercha a analizar por los dos métodos.

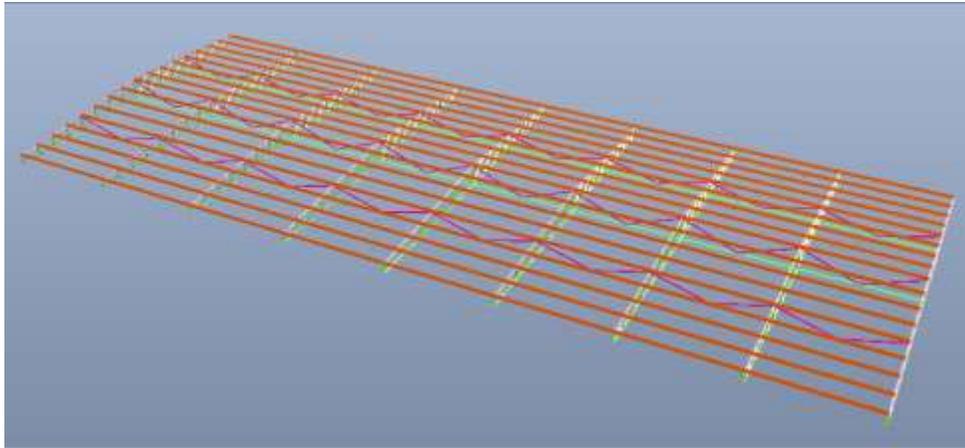


Figura 15. Isométrico de la cubierta

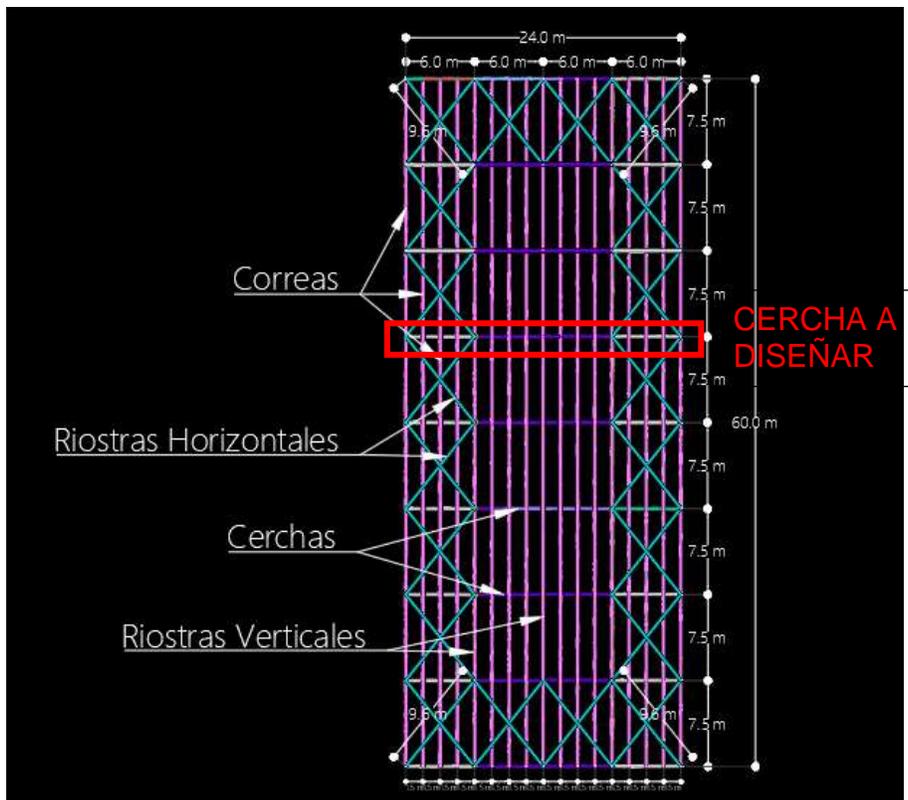


Figura 16. Planta típica de la cubierta

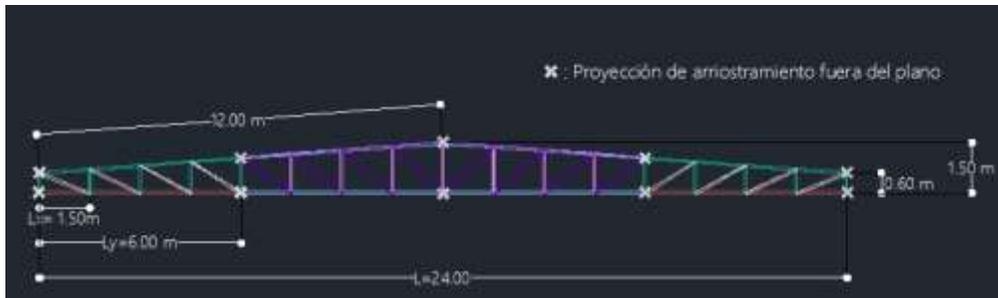


Figura 17. Sección transversal de la cercha

Para el análisis estructural se consideran valores típicos de las cargas muertas y vivas a las cuales puede estar sometida una cubierta de una nave industrial, por otro lado, teniendo en cuenta que la estructura se localizará en la ciudad de Cartagena donde la condición más crítica sería el viento, las acciones sísmicas no se considerarán en el análisis. A continuación, se presenta el avalúo de las cargas consideradas.

- Carga muerta

Peso propio (incluye cerchas y riostras): 0,17 kN/m²
 Correas (Supuesto PHRC 220X80X20X2,5): 0,06 kN/m²
 Teja Standig Seam (2 capas con aislamiento): 0,13 kN/m²

- Carga viva

La carga viva de cubierta según la NSR-10 es 0,50 kN/m² para cubiertas inclinadas con pendiente menor a 15°, y 0,35 kN/m² para pendiente mayor a 15°.

Viva de cubierta (Inclinación 4,29° < 15°): 0,50 kN/m²

- Carga de viento

Para el análisis de viento se tiene las siguientes presiones y succiones. En el Anexo se presenta el análisis detallado de las fuerzas de viento.

Siguiendo los lineamientos planteados en la NSR-10 se determinan los coeficientes de presión interna y externa con los cuales se calcula presiones de viento a las que se verá sometida la estructura.

Separación entre cerchas, b: 7.50 m
 a = 2.4 m
 2a = 4.8 m
 Presión por velocidad, qh: 0.84 kN/m²
 Coeficientes de presión interna, Gcpi: 0.55

Superficie	Superficie	GCpf	GCpf - (+)GCpi	GCpf - (-)GCpi	p = Presión Neta (kN/m ²)		p = Presión Neta (kN/m)	
					q*(GCpf - (+)GCpi)	q*(GCpf - (-)GCpi)	q*(GCpf - (+)GCpi)*b	q*(GCpf - (-)GCpi)*b
Barlovento	1	0.40	-0.15	0.95	-0.13	0.80	-0.95	6.00
Cubierta	2	-0.69	-1.24	-0.14	-1.04	-0.12	-7.84	-0.88
Cubierta	3	-0.37	-0.92	0.18	-0.78	0.15	-5.81	1.14
Sotavento	4	-0.29	-0.84	0.26	-0.71	0.22	-5.31	1.64
Lateral	5	-0.45	-1.00	0.10	-0.84	0.08	-6.32	0.63
Lateral	6	-0.45	-1.00	0.10	-0.84	0.08	-6.32	0.63
Barlovento	1E	0.61	0.06	1.16	0.05	0.98	0.38	7.33
Cubierta	2E	-1.07	-1.62	-0.52	-1.36	-0.44	-10.24	-3.29
Cubierta	3E	-0.53	-1.08	0.02	-0.91	0.02	-6.82	0.13
Sotavento	4E	-0.43	-0.98	0.12	-0.83	0.10	-6.19	0.76

- **Envolvente de diseño**

Por medio del programa de análisis Midas Gen se asignan las cargas determinadas previamente y se obtiene un diagrama de envolvente de diseño con las cargas axiales

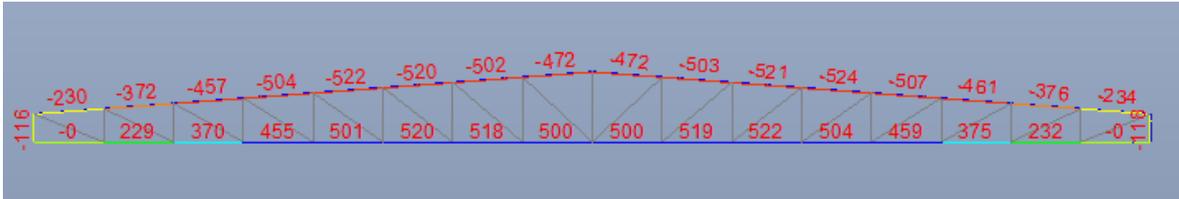


Figura 18. Fuerzas internas, combinación 1.2D+1.6LR+0.5W (compresión en la cuerda superior) (kN)

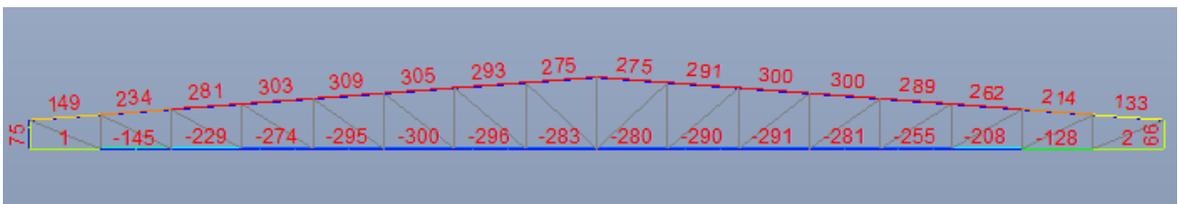


Figura 19. Fuerzas internas, combinación 0.9D+1.0W (compresión en la cuerda inferior) (kN)

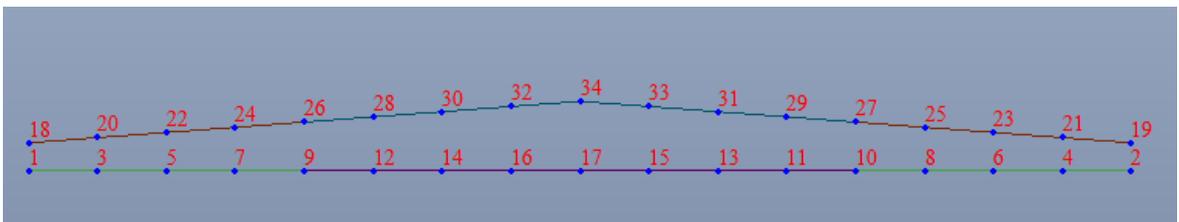


Figura 20. Nodos de referencia de la cuerda superior e inferior

Con el fin de ver reflejado un mayor efecto la variación de las fuerzas axiales, se diseñará los tramos correspondientes entre los nodos 18&26 y 1&9 para la cuerda superior e inferior respectivamente (Ver Figura 20). A partir de las fuerzas internas determinadas anteriormente se diseñan las cuerdas de la cercha típica extrema considerando las longitudes de pandeo fuera y dentro del plano definidas para cada caso de estudio.

7.1 CASO 1: LONGITUD NO ARRIOSTRADA IGUAL A LA SEPARACIÓN ENTRE PERLINES

En primera instancia se realiza un diseño convencional de la cercha típica bajo las consideraciones geométricas y de fuerzas internas halladas en el numeral anterior, se tiene la premisa de considerar el factor de longitud efectiva, K igual a la unidad, y adicionalmente se consideran las longitudes de pandeo para la cuerda superior de, $L_x = 1,5 \text{ m}$ y $L_y = 1,50 \text{ m}$ para la estabilidad en el plano y fuera del plano respectivamente, mientras que en la cuerda inferior las longitudes de pandeo corresponden a $L_x = 1,5 \text{ m}$ y $L_y = 6,0 \text{ m}$. A continuación, se presenta el diseño del

elemento más crítico de acuerdo con los requisitos de diseño dados en la NSR-10 en su título F.

- Cordón Superior:

DISEÑO DE ÁNGULOS DOBLES EN T

MIEMBRO: **Cuerda Sup. Caso 1**

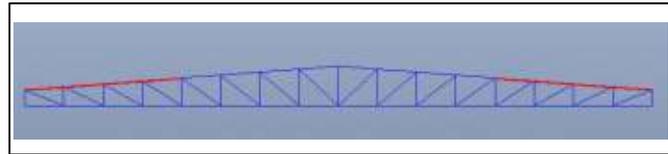
Tu = 303 kN
 Cu = 504 kN
 (kL)x = 1.50 m
 (kL)y = 1.50 m

Material = **ASTM A572 Gr. 50**

Fy = 345 MPa
 Fu = 450 MPa
 E = 200000 MPa
 G = 76923 MPa

Sección a usar

2 L en T **T3X3X5/16**
 L **L3X3X5/16**
 s = **9 mm**



Propiedades del ángulo sencillo

Ag = 1150 mm²
 b = 76.2 mm
 t = 7.94 mm
 Ixx = Iyy = 624000 mm⁴
 rx = ry = 23.3 mm
 xcg = ycg = 21.9 mm
 b/t = 9.6
 lambda r = 10.8
 (b/t)lim2 = 21.9
 Elemento esbelto? NO
 Qs = 1.00

0,45*raiz(E/Fy) Tabla F.2.2.4-1a

0,91*raiz(E/Fy)

b/t <= lambda r

Si b/t <= lambda r ---> Qs = 1,0
 Si lambda r < b/t <= (b/t)lim2 ---> Qs = 1,34-0,76(b/t)*raiz(Fy/E)
 Si b/t > 0,91*raiz(E/Fy) ---> Qs = 0,53E/(Fy(b/t)^2)

Propiedades del ángulo doble

Ag =	2300 mm ²
Ixx =	1248000 mm ⁴
Iyy =	2869174.083 mm ⁴
rx =	23.29 mm
ry =	35.32 mm
xcg =	10.96 mm
ycg =	10.96 mm
xo =	6.99 mm
yo =	6.99 mm
J =	50858 mm ⁴

DISEÑO A TENSIÓN

Fluencia por el area bruta

$$(f_i)R_n = 0,9(F_y A_g)$$
$$(f_i)R_n = 714.2 \text{ kN}$$

Rotura por el area neta efectiva

$$(f_i)R_n = 0,75(F_u A_e)$$

$$A_e = U A_n$$

$$U = 0.8$$

$$\text{Long. Soldadura} = 54.8 \text{ mm}$$

$$A_n = 2300 \text{ mm}^2$$

$$A_e = 1840 \text{ mm}^2$$

$$(f_i)R_n = 621 \text{ kN}$$

$$(f_i)R_n = 621.0 \text{ kN}$$

$$T_u / (f_i)R_n = 0.49$$

$$\geq T_u = 303 \text{ kN}$$

CUMPLE

DISEÑO A COMPRESIÓN

Pandeo flexional respecto al eje x

$$(f_i)P_n = 0,9(F_{cr} A)$$

$$(KL/r)_x = 64.39$$

$$4.71 \sqrt{E/QF_y} = 113.40$$

$$(a) \text{ Cuando } \frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e \geq 0.44QF_y)$$

$$(b) \text{ Cuando } \frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e < 0.44QF_y)$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_e} \right] F_y$$

$$F_{cr} = 0.877F_e$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

$$F_e = 476.0 \text{ MPa}$$

$$F_{crx} = 254.7 \text{ MPa}$$

$$(f_i)P_n = 527.3 \text{ kN}$$

Pandeo flexional respecto al eje y

(fi)Pny = 0,9(Fcr.A)

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + 0.82 \frac{\alpha^2}{(1+\alpha^2)} \left(\frac{a}{r_{ib}}\right)^2} \quad \text{F.2.5.6-2}$$

Ln = 1500 mm

Longitud entre los nodos de la cercha

a = L/3

a = 500 mm

(kL/r)y 0 = 42.5

alfa = h/2rib

rib = 23.3 mm

h = 52.8 mm

alfa = 1.1

(kL/r)y mod. = 44.90

(a) Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(F_c \geq 0.44QF_y)$

(b) Cuando $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(F_c < 0.44QF_y)$

$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_c} \right] F_y$

$F_{cr} = 0.877F_c$

Fe = 979.0 Mpa

Fcry = 297.7 MPa

(fi)Pny = 616.2 kN

Pandeo por flexo-torsión

(fi)PnFT = 0,9(Fcr.A)

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{cry}F_{crz}H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}} \right] \quad \text{F.2.5.4-2}$$

Fcry = 297.7 MPa

$$F_{crz} = \frac{GJ}{A_g \bar{r}_0^2} \quad \text{F.2.5.4-3}$$

$$\bar{r}_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} \quad \text{F.2.5.4-11}$$

$$H = 1 - \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \quad \text{F.2.5.4-10}$$

Fcrz = 901.0 MPa

ro^2 = 1887.7 mm2

H = 0.95

Fcr = 290.5 MPa

(fi)PnFT = 601.4 kN

(fi)Rn = min[(fi)Pnx; (fi)Pny; (fi)PnFT]

(fi)Rn = 527.3 kN

>= Cu =

504 kN

Cu / (fi)Rn = 0.96

CUMPLE

De lo anterior, se identifica que el perfil seleccionado para la cuerda superior consiste en dos ángulos de L3"x3"x5/16" y, se tiene una relación de utilización del 96%, con lo cual se aprovecha al máximo la capacidad del material.

- Cordón Inferior:

DISEÑO DE ÁNGULOS DOBLES EN T

MIEMBRO: **Cuerda Inf. Caso 1**

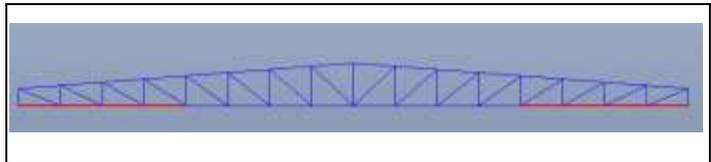
Tu = 455 kN
 Cu = 274 kN
 (kL)x = 1.50 m
 (kL)y = 6.00 m

Material = **ASTMA572 Gr. 50**

Fy = 345 MPa
 Fu = 450 MPa
 E = 200000 MPa
 G = 76923 MPa

Sección a usar

2 L en T **T4X4X3/8**
 L **L4X4X3/8**
 s = **9 mm**



Propiedades del ángulo sencillo

Ag = 1850 mm²
 b = 101.6 mm
 t = 9.53 mm
 Ixx = Iyy = 1800000 mm⁴
 rx = ry = 31.2 mm
 xcg = ycg = 28.8 mm
 b/t = 10.66
 lambda r = 10.8
 (b/t)lim2 = 21.9
 Elemento esbelto? NO
 Qs = 1.00

0,45*raiz(E/Fy) Tabla F.2.2.4-1a

0,91*raiz(E/Fy)

b/t <= lambda r

Si b/t <= lambda r ---> Qs = 1,0
 Si lambda r < b/t <= (b/t)lim2 ---> Qs = 1,34-0,76(b/t)*raiz(Fy/E)
 Si b/t > 0,91*raiz(E/Fy) ---> Qs = 0,53E/(Fy(b/t)^2)

Propiedades del ángulo doble

Ag = 3700 mm²
 Ixx = 3600000 mm⁴
 Iyy = 7757355.114 mm⁴
 rx = 31.19 mm
 ry = 45.79 mm
 xcg = 14.42 mm
 ycg = 14.42 mm
 xo = 9.66 mm
 yo = 9.66 mm
 J = 117250 mm⁴

DISEÑO A TENSIÓN

Fluencia por el area bruta

$$(f_i)R_n = 0,9(F_y A_g)$$

$$(f_i)R_n = 1148.9 \text{ kN}$$

Rotura por el area neta efectiva

$$(f_i)R_n = 0,75(F_u A_e)$$

$$A_e = U A_n$$

$$U = 0.8$$

$$\text{Long. Soldadura} = 72.1 \text{ mm}$$

$$A_n = 3700 \text{ mm}^2$$

$$A_e = 2960 \text{ mm}^2$$

$$(f_i)R_n = 999 \text{ kN}$$

$$(f_i)R_n = 999.0 \text{ kN}$$

\geq

$$T_u = 455 \text{ kN}$$

$$T_u / (f_i)R_n = 0.46$$

CUMPLE

DISEÑO A COMPRESIÓN

Pandeo flexional respecto al eje x

$$(f_i)P_n = 0,9(F_{cr} A)$$

$$(kL/r)_x = 48.09$$

$$4.71 \cdot \sqrt{E/QF_y} = 113.40$$

$$(a) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_c \geq 0.44QF_y)$$

$$(b) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_c < 0.44QF_y)$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_c} \right] F_y$$

$$F_{cr} = 0.877F_c$$

$$F_c = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2}$$

$$F_e = 853.6 \text{ MPa}$$

$$F_{crx} = 291.3 \text{ MPa}$$

$$(f_i)P_n = 970.1 \text{ kN}$$

Pandeo flexional respecto al eje y

(fi)Pny = 0,9(Fcr.A)

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + 0.82 \frac{\alpha^2}{(1+\alpha^2)} \left(\frac{a}{r_{ib}}\right)^2} \quad \text{F.2.5.6-2}$$

Ln = 1500 mm Longitud entre los nodos de la cercha

a = L/3

a = 500 mm

(kL/r)y 0 = 131.0

alfa = h/2rib

rib = 31.2 mm

h = 66.7 mm

alfa = 1.1

(kL/r)y mod. = 131.47

(a) Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(F_c \geq 0.44QF_y)$ (b) Cuando $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(F_c < 0.44QF_y)$

$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_c} \right] F_y$ $F_{cr} = 0.877F_c$

Fe = 114.2 Mpa

Fcry = 100.2 MPa

(fi)Pny = 333.5 kN

Pandeo por flexo-torsión

(fi)PnFT = 0,9(Fcr.A)

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{cry}F_{crz}H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}} \right] \quad \text{F.2.5.4-2}$$

Fcry = 100.2 MPa

$$F_{crz} = \frac{GJ}{A_g \bar{r}_0^2} \quad \text{F.2.5.4-3}$$

$$\bar{r}_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} \quad \text{F.2.5.4-11}$$

$$H = 1 - \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \quad \text{F.2.5.4-10}$$

Fcrz = 748.6 MPa

ro^2 = 3256.1 mm2

H = 0.94

Fcr = 99.3 MPa

(fi)PnFT = 330.6 kN

(fi)Rn = min[(fi)Pnx; (fi)Pny; (fi)PnFT]

(fi)Rn = 330.6 kN >= Cu = 274 kN

Cu / (fi)Rn = 0.83 **CUMPLE**

De lo anterior, se identifica que el perfil seleccionado para la cuerda inferior consiste en dos ángulos de L4"x4"x3/8" y, se tiene una relación de utilización del 83%, con lo cual se aprovecha al máximo la capacidad del material.

7.2 CASO 2: LONGITUD NO ARRIOSTRADA IGUAL A LA SEPARACIÓN ENTRE LAS RIOSTRAS DE TECHO

Ahora, se realiza un diseño convencional de la cercha típica bajo las consideraciones geométricas y de fuerzas internas halladas previamente. En el caso 2 se tiene la premisa de considerar el factor de longitud efectiva, K igual a la unidad, y adicionalmente se consideran las longitudes de pandeo para ambas cuerdas, superior e inferior, de $L_x = 1,5$ m y $L_y = 6,0$ m para la estabilidad en el plano y fuera del plano respectivamente. Nótese que las longitudes de pandeo fuera del plano para la cuerda superior aumentaron. A continuación, se presenta el diseño del elemento más crítico de acuerdo con los requisitos de diseño dados en la NSR-10 en su título F.

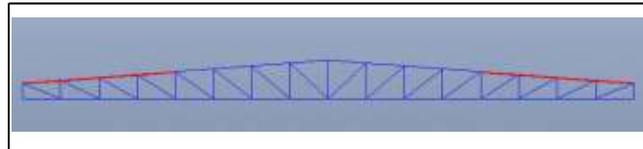
- Cordón Superior:

DISEÑO DE ÁNGULOS DOBLES EN T

MIEMBRO:	Cuerda Sup. Caso 2
Tu =	303 kN
Cu =	504 kN
(kL)x =	1.50 m
(kl)y =	6.00 m

Material =	ASTM A572 Gr. 50
Fy =	345 MPa
Fu =	450 MPa
E =	200000 MPa
G =	76923 MPa

Sección a usar	
2 L en T	T4X4X5/8
L	L4X4X5/8
s =	9 mm



Propiedades del ángulo sencillo

Ag =	2970 mm ²
b =	101.6 mm
t =	15.9 mm
Ixx = Iyy =	2760000 mm ⁴
rx = ry =	30.5 mm
xcg = ycg =	31.3 mm
b/t =	6.39
lambda r =	10.8
(b/t)lim2 =	21.9
Elemento esbelto?	NO
Qs =	1.00

0,45*raiz(E/Fy) Tabla F.2.2.4-1a

0,91*raiz(E/Fy)

b/t <= lambda r

Si b/t <= lambda r	---->	Qs = 1,0
Si lambda r < b/t <= (b/t)lim2	---->	Qs = 1,34-0,76(b/t)*raiz(Fy/E)
Si b/t > 0,91*raiz(E/Fy)	---->	Qs = 0,53E/(Fy(b/t)^2)

Propiedades del ángulo doble

Ag =	5940 mm ²
Ixx =	5520000 mm ⁴
Iyy =	13145062.25 mm ⁴
rx =	30.48 mm
ry =	47.04 mm
xcg =	15.64 mm
ycg =	15.64 mm
xo =	7.69 mm
yo =	7.69 mm
J =	544533 mm ⁴

DISEÑO A TENSION

Fluencia por el area bruta

$$(f_i)R_n = 0,9(F_y A_g)$$
$$(f_i)R_n = 1844.4 \text{ kN}$$

Rotura por el area neta efectiva

$$(f_i)R_n = 0,75(F_u A_e)$$
$$A_e = U A_n$$
$$U = 0.8$$
$$\text{Long. Soldadura} = 78.2 \text{ mm}$$
$$A_n = 5940 \text{ mm}^2$$
$$A_e = 4752 \text{ mm}^2$$
$$(f_i)R_n = 1603.8 \text{ kN}$$

$$(f_i)R_n = 1603.8 \text{ kN} \quad \geq \quad T_u = 303 \text{ kN}$$
$$T_u / (f_i)R_n = 0.19 \quad \text{CUMPLE}$$

DISEÑO A COMPRESIÓN

Pandeo flexional respecto al eje x

$$(f_i)P_n = 0,9(F_{cr} A)$$
$$(kL/r)_x = 49.21$$
$$4.71 \cdot \sqrt{E/QF_y} = 113.40$$

$$(a) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e \geq 0.44QF_y)$$

$$(b) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e < 0.44QF_y)$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_e} \right] F_y$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2}$$

$$F_e = 815.3 \text{ MPa}$$
$$F_{cr} = 289.0 \text{ MPa}$$
$$(f_i)P_n = 1545.0 \text{ kN}$$

Pandeo flexional respecto al eje y

(fi)Pny = 0,9(Fcr.A)

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + 0.82 \frac{\alpha^2}{(1+\alpha^2)} \left(\frac{a}{r_{ib}}\right)^2}$$

F.2.5.6-2

Ln = 1500 mm

Longitud entre los nodos de la cercha

a = L/3

a = 500 mm

(kL/r)y 0 = 127.5

alfa = h/2rib

rib = 30.5 mm

h = 71.6 mm

alfa = 1.2

(kL/r)y mod. = 128.04

(a) Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(F_e \geq 0.44QF_y)$ (b) Cuando $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(F_e < 0.44QF_y)$

$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_e} \right] F_y$ $F_{cr} = 0.877F_e$

Fe = 120.4 Mpa

Fcry = 105.6 MPa

(fi)Pny = 564.5 kN

Pandeo por flexo-torsión

(fi)PnFT = 0,9(Fcr.A)

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{cry} F_{crz} H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}} \right]$$

F.2.5.4-2

Fcry = 105.6 MPa

$$F_{crz} = \frac{GJ}{A_g \bar{r}_0^2}$$

F.2.5.4-3

$$\bar{r}_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g}$$

F.2.5.4-11

$$H = 1 - \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2}$$

F.2.5.4-10

Fcrz = 2162.8 MPa

ro^2 = 3260.5 mm2

H = 0.96

Fcr = 105.4 MPa

(fi)PnFT = 563.4 kN

(fi)Rn = min[(fi)Pnx; (fi)Pny; (fi)PnFT]

(fi)Rn = 563.4 kN >= Cu = 504 kN

Cu / (fi)Rn = 0.89 **CUMPLE**

De lo anterior, se identifica que el perfil seleccionado para la cuerda superior consiste en dos ángulos de L4"x4"x5/8" y, se tiene una relación de utilización del 89%, con lo cual se aprovecha al máximo la capacidad del material.

- Cordón Inferior:

DISEÑO DE ÁNGULOS DOBLES EN T

MIEMBRO: Cuerda Inf. Caso 2

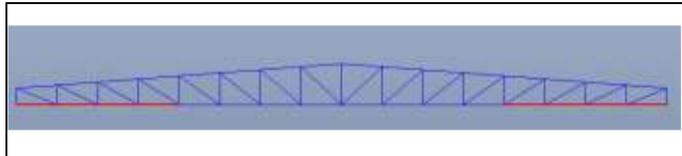
Tu = 455 kN
 Cu = 274 kN
 (kL)x = 1.50 m
 (kl)y = 6.00 m

Material = ASTM A572 Gr. 50

Fy = 345 MPa
 Fu = 450 MPa
 E = 200000 MPa
 G = 76923 MPa

Sección a usar

2 L en T T4X4X3/8
 L L4X4X3/8
 s = 9 mm



Propiedades del ángulo sencillo

Ag = 1850 mm²
 b = 101.6 mm
 t = 9.53 mm
 Ixx = Iyy = 1800000 mm⁴
 rx = ry = 31.2 mm
 xcg = ycg = 28.8 mm
 b/t = 10.66
 lambda r = 10.8
 (b/t)lim2 = 21.9
 Elemento esbelto? NO
 Qs = 1.00

0,45*raiz(E/Fy) Tabla F.2.2.4-1a
 0,91*raiz(E/Fy)

b/t <= lambda r

Si b/t <= lambda r ---> Qs = 1,0
 Si lambda r < b/t <= (b/t)lim2 ---> Qs = 1,34-0,76(b/t)*raiz(Fy/E)
 Si b/t > 0,91*raiz(E/Fy) ---> Qs = 0,53E/(Fy(b/t)^2)

Propiedades del ángulo doble

Ag = 3700 mm²
 Ixx = 3600000 mm⁴
 Iyy = 7757355.114 mm⁴
 rx = 31.19 mm
 ry = 45.79 mm
 xcg = 14.42 mm
 ycg = 14.42 mm
 xo = 9.66 mm
 yo = 9.66 mm
 J = 117250 mm⁴

DISEÑO A TENSIÓN

Fluencia por el area bruta

$$(f_i)R_n = 0,9(F_y A_g)$$

$$(f_i)R_n = 1148.9 \text{ kN}$$

Rotura por el area neta efectiva

$$(f_i)R_n = 0,75(F_u A_e)$$

$$A_e = U A_n$$

$$U = 0.8$$

$$\text{Long. Soldadura} = 72.1 \text{ mm}$$

$$A_n = 3700 \text{ mm}^2$$

$$A_e = 2960 \text{ mm}^2$$

$$(f_i)R_n = 999 \text{ kN}$$

$$(f_i)R_n = 999.0 \text{ kN}$$

\geq

$$T_u = 455 \text{ kN}$$

$$T_u / (f_i)R_n = 0.46$$

CUMPLE

DISEÑO A COMPRESIÓN

Pandeo flexional respecto al eje x

$$(f_i)P_n = 0,9(F_{cr} A)$$

$$(kL/r)_x = 48.09$$

$$4.71 \cdot \sqrt{E/QF_y} = 113.40$$

$$(a) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_c \geq 0.44QF_y)$$

$$(b) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_c < 0.44QF_y)$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/E_c} \right] F_y$$

$$F_{cr} = 0.877 F_c$$

$$F_c = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

$$F_e = 853.6 \text{ MPa}$$

$$F_{crx} = 291.3 \text{ MPa}$$

$$(f_i)P_n = 970.1 \text{ kN}$$

Pandeo flexional respecto al eje y

$$(fi)Pny = 0,9(Fcr.A)$$

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + 0,82 \frac{\alpha^2}{(1+\alpha^2)} \left(\frac{a}{r_{ib}}\right)^2} \quad F.2.5.6-2$$

$$Ln = 1500 \text{ mm}$$

Longitud entre los nodos de la cercha

$$a = L/3$$

$$a = 500 \text{ mm}$$

$$(kL/r)_y 0 = 131,0$$

$$\alpha = h/2rib$$

$$rib = 31,2 \text{ mm}$$

$$h = 66,7 \text{ mm}$$

$$\alpha = 1,1$$

$$(kL/r)_y \text{ mod.} = 131,47$$

$$(a) \text{ Cuando } \frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_c \geq 0,44QF_y) \quad (b) \text{ Cuando } \frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_c < 0,44QF_y)$$

$$F_{cr} = Q \left[0,658 \frac{QF_y}{F_c} \right] F_y$$

$$F_{cr} = 0,877F_c$$

$$F_e = 114,2 \text{ Mpa}$$

$$F_{cry} = 100,2 \text{ MPa}$$

$$(fi)Pny = 333,5 \text{ kN}$$

Pandeo por flexo-torsión

$$(fi)PnFT = 0,9(Fcr.A)$$

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{cry} F_{crz} H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}} \right] \quad F.2.5.4-2$$

$$F_{cry} = 100,2 \text{ MPa}$$

$$F_{crz} = \frac{GJ}{A_g \bar{r}_0^2} \quad F.2.5.4-3$$

$$\bar{r}_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} \quad F.2.5.4-11$$

$$H = 1 - \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \quad F.2.5.4-10$$

$$F_{crz} = 748,6 \text{ MPa}$$

$$r_o^2 = 3256,1 \text{ mm}^2$$

$$H = 0,94$$

$$F_{cr} = 99,3 \text{ MPa}$$

$$(fi)PnFT = 330,6 \text{ kN}$$

$$(fi)Rn = \min[(fi)Pnx; (fi)Pny; (fi)PnFT]$$

$$(fi)Rn = 330,6 \text{ kN} \quad \geq \quad C_u = 274 \text{ kN}$$

$$C_u / (fi)Rn = 0,83 \quad \text{CUMPLE}$$

De lo anterior, se identifica que el perfil seleccionado para la cuerda inferior consiste en dos ángulos de L4"x4"x3/8" y, se tiene una relación de utilización del 83%, con lo cual se aprovecha al máximo la capacidad del material.

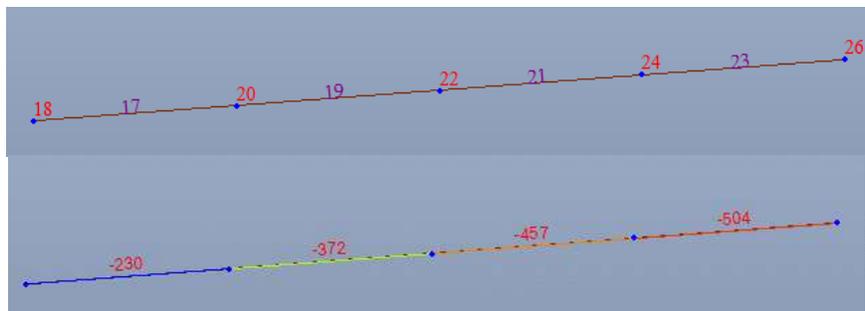
7.3 CASO 3: LONGITUD EFECTIVA: APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SHRIVASTAVA

Por último, se realiza un análisis más detallado de la longitud efectiva para el pandeo fuera del plano considerando las longitudes no arriostradas más críticas, pero con la idea de optimizar el diseño presentado en el caso 2. Se diseña la cercha típica bajo las consideraciones geométricas y de fuerzas internas halladas previamente se tiene la premisa de considerar el factor de longitud efectiva, K, igual a la unidad, y, adicionalmente se consideran las longitudes no arriostradas para ambas cuerdas superior e inferior, de $L_x = 1,5$ m y $L_y = 6,0$ m para la estabilidad en el plano y fuera del plano respectivamente. A continuación, se presenta el análisis de la aplicación de Shrivastava para obtener la longitud efectiva y así diseñar el elemento más crítico de acuerdo con los requisitos de diseño dados en la NSR-10 en su título F.

- Cordón Superior:

Primero se determina la longitud efectiva aplicando la teoría de Shrivastava.

CARGA DE PANDEO PARA COLUMNAS CON VARIAS CARGAS AXIALES APLICADAS SOBRE LA LONGITUD



DATOS		
Tipo =	Perfil_L	
Perfil =	T4X4X1/2	
I_x (mm ⁴) =	4600000	Para pandeo en el plano
I_y (mm ⁴) =	10413563	Para pandeo fuera del plano
r_x (mm) =	30.8	
r_y (mm) =	46.4	
Material =	A 572 Gr 50	
F_y (MPa) =	345	
F_u (MPa) =	450	
E (MPa) =	200000	
L (mm) =	6000	Longitud entre soporte lateral
s (mm) =	9	Separación entre ángulos

Nodo	Elem.	L _{tramo} (m)	P _u (kN)	x _n (m)	α _n (m)	P _n (kN)	a _n	b _n	c _n	a _n P _n (kN)	b _n P _n (kN)	c _n P _n (kN)
18				0.00	1.00	230.0	1.00	1.00	0.00	230.0	230.0	0.0
	17	1.50	230.0									
20				1.50	0.75	142.0	0.59	0.75	0.30	83.9	106.5	42.6
	19	1.50	372.0									
22				3.00	0.50	85.0	0.50	0.50	0.21	42.5	42.5	18.0
	21	1.50	457.0									
24				4.50	0.25	47.0	0.41	0.25	0.30	19.2	11.8	14.1
	23	1.50	504.0									
26				6.00	0.00	-504.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
	Σ	6.00				Σ 0.0			Σ	375.6	390.8	74.8
		L (m)				P _u (kN)				A (kN)	B (kN)	C (kN)
										Σa _n P _n	Σb _n P _n	Σc _n P _n

$$P_{equ} = \pi^2 EI / (\lambda L^2) = \text{Máx}(((4A+B) \pm ((4A+B)^2 - 16(AB-C^2))^{1/2}) / 8)$$

P_{equ} (kN) = 380.6 Máximo valor equivalente para el pandeo global

$$P_{cr} = \pi^2 EI / L^2$$

P_{cr} (kN) = 571.0 Carga crítica de Euler para pandeo alrededor del eje Y

$\lambda = 1.50$ Factor de seguridad contra el pandeo global alrededor del eje Y

P (kN) = 756.2 Carga máxima para pandeo elástico

L_c (m) = 5.21 Longitud efectiva equivalente para alcanzar pandeo elástico alrededor del eje Y

DEFINICIONES

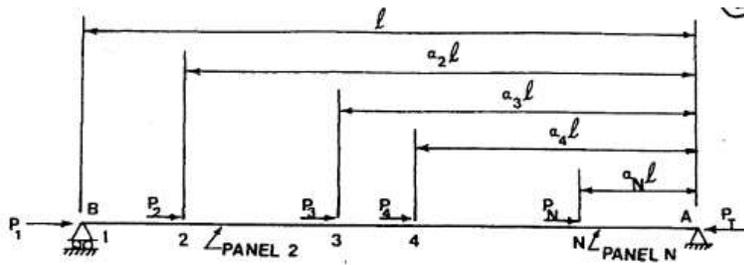


Fig. 1. Notation

$$a_n = \alpha_n + \frac{\sin(2\pi\alpha_n)}{2\pi}$$

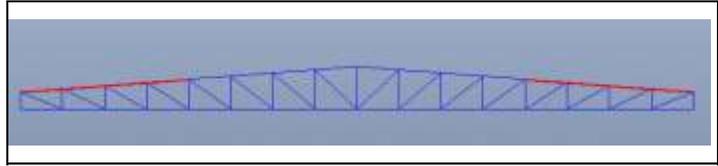
$$b_n = \alpha_n + \frac{\sin(4\pi\alpha_n)}{4\pi}$$

$$c_n = \frac{\sin(\pi\alpha_n)}{\pi} + \frac{\sin(3\pi\alpha_n)}{3\pi}$$

DISEÑO DE ÁNGULOS DOBLES EN T

MIEMBRO: Cuerda Sup. Caso 3

Tu = 303 kN
 Cu = 504 kN
 (kL)x = 1.50 m
 (kl)y = 5.21 m



Material = ASTM A572 Gr. 50

Fy = 345 MPa
 Fu = 450 MPa
 E = 200000 MPa
 G = 76923 MPa

Sección a usar

2 L en T T4X4X1/2
 L L4X4X1/2
 s = 9 mm

Propiedades del ángulo sencillo

Ag = 2420 mm²
 b = 101.6 mm
 t = 12.7 mm
 Ixx = Iyy = 2300000 mm⁴
 rx = ry = 30.8 mm
 xcg = ycg = 30.0 mm
 b/t = 8.00
 lambda r = 10.8
 (b/t)lim2 = 21.9
 Elemento esbelto? NO
 Qs = 1.00

0,45*raiz(E/Fy) Tabla F.2.2.4-1a

0,91*raiz(E/Fy)

b/t <= lambda r

Si b/t <= lambda r ---> Qs = 1,0
 Si lambda r < b/t <= (b/t)lim2 ---> Qs = 1,34-0,76(b/t)*raiz(Fy/E)
 Si b/t > 0,91*raiz(E/Fy) ---> Qs = 0,53E/(Fy(b/t)^2)

Propiedades del ángulo doble

Ag = 4840 mm²
 Ixx = 4600000 mm⁴
 Iyy = 10413562.84 mm⁴
 rx = 30.83 mm
 ry = 46.38 mm
 xcg = 15.02 mm
 ycg = 15.02 mm
 xo = 8.67 mm
 yo = 8.67 mm
 J = 277488 mm⁴

DISEÑO A TENSIÓN

Fluencia por el area bruta

$$(f_i)R_n = 0,9(F_y A_g)$$

$$(f_i)R_n = 1502.8 \text{ kN}$$

Rotura por el area neta efectiva

$$(f_i)R_n = 0,75(F_u A_e)$$

$$A_e = U A_n$$

$$U = 0.8$$

$$\text{Long. Soldadura} = 75.1 \text{ mm}$$

$$A_n = 4840 \text{ mm}^2$$

$$A_e = 3872 \text{ mm}^2$$

$$(f_i)R_n = 1306.8 \text{ kN}$$

$$(f_i)R_n = 1306.8 \text{ kN}$$

$$T_u / (f_i)R_n = 0.23$$

$$\geq T_u = 303 \text{ kN}$$

CUMPLE

DISEÑO A COMPRESIÓN

Pandeo flexional respecto al eje x

$$(f_i)P_n = 0,9(F_{cr} A)$$

$$(kL/r)_x = 48.66$$

$$4.71 \cdot \sqrt{E/QF_y} = 113.40$$

$$(a) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e \geq 0.44QF_y)$$

$$(b) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e < 0.44QF_y)$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_e} \right] F_y$$

$$F_{cr} = 0.877F_e$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2}$$

$$F_e = 833.8 \text{ MPa}$$

$$F_{crx} = 290.1 \text{ MPa}$$

$$(f_i)P_n = 1263.8 \text{ kN}$$

Pandeo flexional respecto al eje y

(fi)Pny = 0,9(Fcr.A)

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + 0.82 \frac{\alpha^2}{(1+\alpha^2)} \left(\frac{a}{r_{fb}}\right)^2}$$

F.2.5.6-2

Ln = 1500 mm

Longitud entre los nodos de la cercha

a = L/3

a = 500 mm

(kL/r)y 0 = 112.3

alfa = h/2rib

rib = 30.8 mm

h = 69.1 mm

alfa = 1.1

(kL/r)y mod. = 112.85

(a) Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(F_e \geq 0.44QF_y)$ (b) Cuando $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(F_e < 0.44QF_y)$

$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_e} \right] F_y$ $F_{cr} = 0.877F_e$

Fe = 155.0 Mpa

Fcry = 135.9 MPa

(fi)Pny = 591.9 kN

Pandeo por flexo-torsión

(fi)PnFT = 0,9(Fcr.A)

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{cry} F_{crz} H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}} \right]$$

F.2.5.4-2

Fcry = 135.9 MPa

$$F_{crz} = \frac{GJ}{A_g \bar{r}_o^2}$$

F.2.5.4-3

$$\bar{r}_o^2 = x_o^2 + y_o^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g}$$

F.2.5.4-11

$$H = 1 - \frac{x_o^2 + y_o^2}{\bar{r}_o^2}$$

F.2.5.4-10

Fcrz = 1355.9 MPa

ro^2 = 3252.5 mm2

H = 0.95

Fcr = 135.2 MPa

(fi)PnFT = 588.9 kN

(fi)Rn = min[(fi)Pnx; (fi)Pny; (fi)PnFT]

(fi)Rn = 588.9 kN >= Cu = 504 kN

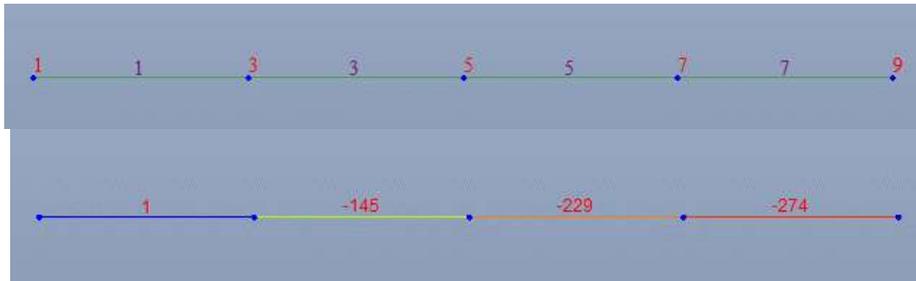
Cu / (fi)Rn = 0.86 **CUMPLE**

De lo anterior, se identifica que el perfil seleccionado para la cuerda superior consiste en dos ángulos de L4"x4"x1/2" y, se tiene una relación de utilización del 86%, con lo cual se aprovecha al máximo la capacidad del material.

- Cordón Inferior:

Primero se determina la longitud efectiva aplicando la teoría de Shrivastava.

CARGA DE PANDEO PARA COLUMNAS CON VARIAS CARGAS AXIALES APLICADAS SOBRE LA LONGITUD



DATOS	
Tipo =	Perfil_L
Perfil =	T4X4X1/4
I_x (mm ⁴) =	2500000
I_y (mm ⁴) =	5136844
r_x (mm) =	31.6
r_y (mm) =	45.3
Material =	A 572 Gr 50
F_y (MPa) =	345
F_u (MPa) =	450
E (MPa) =	200000
L (mm) =	6000
s (mm) =	9

Para pandeo en el plano
 Para pandeo fuera del plano
 Longitud entre soporte lateral
 Separación entre ángulos

Nodo	Elem.	L _{tramo} (m)	P _u (kN)	x _n (m)	α _n (m)	P _n (kN)	a _n	b _n	c _n	a _n P _n (kN)	b _n P _n (kN)	c _n P _n (kN)
1				0.00	1.00	1.0	1.00	1.00	0.00	1.0	1.0	0.0
	1	1.50	1.0									
3				1.50	0.75	144.0	0.59	0.75	0.30	85.1	108.0	43.2
	3	1.50	145.0									
5				3.00	0.50	84.0	0.50	0.50	0.21	42.0	42.0	17.8
	5	1.50	229.0									
7				4.50	0.25	45.0	0.41	0.25	0.30	18.4	11.3	13.5
	7	1.50	274.0									
9				6.00	0.00	-274.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
	Σ	6.00			Σ	0.0			Σ	146.5	162.3	74.5
		L (m)				P _u (kN)				A (kN)	B (kN)	C (kN)
										Σa _n P _n	Σb _n P _n	Σc _n P _n

$$P_{equ} = \pi^2 EI / (\lambda L^2) = \text{Máx}(((4A+B) \pm ((4A+B)^2 - 16(AB-C^2))^{1/2})/8)$$

P_{equ} (kN) = 158.3 Máximo valor equivalente para el pandeo global

$$P_{cr} = \pi^2 EI / L^2$$

P_{cr} (kN) = 281.7 Carga crítica de Euler para pandeo alrededor del eje Y

$\lambda = 1.78$ Factor de seguridad contra el pandeo global alrededor del eje Y

P (kN) = 487.5 Carga máxima para pandeo elástico

L_c (m) = 4.56 Longitud efectiva equivalente para alcanzar pandeo elástico alrededor del eje Y

DISEÑO DE ÁNGULOS DOBLES EN T

MIEMBRO: Cuerda Inf. Caso 3

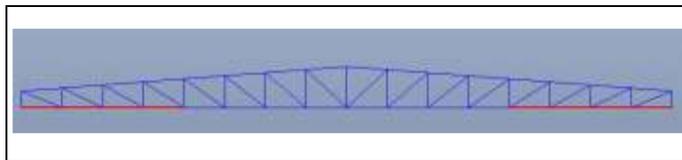
Tu = 455 kN
 Cu = 274 kN
 (kL)x = 1.50 m
 (kl)y = 4.56 m

Material = ASTM A572 Gr. 50

Fy = 345 MPa
 Fu = 450 MPa
 E = 200000 MPa
 G = 76923 MPa

Sección a usar

2 L en T T4X4X1/4
 L L4X4X1/4
 s = 9 mm



Propiedades del ángulo sencillo

Ag = 1250 mm²
 b = 101.6 mm
 t = 6.35 mm
 Ixx = Iyy = 1250000 mm⁴
 rx = ry = 31.6 mm
 xcg = ycg = 27.8 mm
 b/t = 16.00
 lambda r = 10.8
 (b/t)lim2 = 21.9
 Elemento esbelto? SI
 Qs = 0.83

0,45*raiz(E/Fy) Tabla F.2.2.4-1a

0,91*raiz(E/Fy)

b/t > lambda r

Si b/t <= lambda r ---> Qs = 1,0
 Si lambda r < b/t <= (b/t)lim2 ---> Qs = 1,34-0,76(b/t)*raiz(Fy/E)
 Si b/t > 0,91*raiz(E/Fy) ---> Qs = 0,53E/(Fy(b/t)^2)

Propiedades del ángulo doble

Ag =	2500 mm ²
Ixx =	2500000 mm ⁴
Iyy =	5136844.429 mm ⁴
rx =	31.62 mm
ry =	45.33 mm
xcg =	13.88 mm
ycg =	13.88 mm
xo =	10.70 mm
yo =	10.70 mm
J =	34686 mm ⁴

DISEÑO A TENSIÓN

Fluencia por el area bruta

$$(f_i)R_n = 0,9(F_y A_g)$$
$$(f_i)R_n = 776.3 \text{ kN}$$

Rotura por el area neta efectiva

$$(f_i)R_n = 0,75(F_u A_e)$$
$$A_e = U A_n$$
$$U = 0.8$$
$$\text{Long. Soldadura} = 69.4 \text{ mm}$$
$$A_n = 2500 \text{ mm}^2$$
$$A_e = 2000 \text{ mm}^2$$
$$(f_i)R_n = 675 \text{ kN}$$

$$(f_i)R_n = 675.0 \text{ kN} \quad \geq \quad T_u = 455 \text{ kN}$$
$$T_u / (f_i)R_n = 0.67 \quad \text{CUMPLE}$$

DISEÑO A COMPRESIÓN

Pandeo flexional respecto al eje x

$$(f_i)P_n = 0,9(F_{cr} A)$$
$$(kL/r)_x = 47.43$$
$$4.71 \cdot \text{raiz}(E/QF_y) = 124.11$$

$$(a) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e \geq 0.44QF_y)$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_e} \right] F_y$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2}$$

$$F_e = 877.3 \text{ MPa}$$

$$F_{crx} = 251.1 \text{ MPa}$$

$$(f_i)P_n = 564.9 \text{ kN}$$

$$(b) \text{ Cuando } \frac{kL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e < 0.44QF_y)$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e$$

Pandeo flexional respecto al eje y

$$(fi)Pny = 0,9(Fcr.A)$$

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + 0,82 \frac{\alpha^2}{(1+\alpha^2)} \left(\frac{a}{r_{ib}}\right)^2} \quad F.2.5.6-2$$

$$Ln = 1500 \text{ mm}$$

Longitud entre los nodos de la cercha

$$a = L/3$$

$$a = 500 \text{ mm}$$

$$(kL/r)_y 0 = 100.6$$

$$\alpha = h/2rib$$

$$rib = 31.6 \text{ mm}$$

$$h = 64.5 \text{ mm}$$

$$\alpha = 1.0$$

$$(kL/r)_y \text{ mod.} = 101.12$$

$$(a) \text{ Cuando } \frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e \geq 0.44QF_y) \quad (b) \text{ Cuando } \frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ ó } (F_e < 0.44QF_y)$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_e} \right] F_y$$

$$F_{cr} = 0.877F_e$$

$$F_e = 193.1 \text{ Mpa}$$

$$F_{cry} = 154.3 \text{ MPa}$$

$$(fi)Pny = 347.1 \text{ kN}$$

Pandeo por flexo-torsión

$$(fi)PnFT = 0,9(Fcr.A)$$

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{cry} F_{crz} H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}} \right] \quad F.2.5.4-2$$

$$F_{cry} = 154.3 \text{ MPa}$$

$$F_{crz} = \frac{GJ}{A_g \bar{r}_0^2} \quad F.2.5.4-3$$

$$\bar{r}_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} \quad F.2.5.4-11$$

$$H = 1 - \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \quad F.2.5.4-10$$

$$F_{crz} = 325.0 \text{ MPa}$$

$$r_o^2 = 3283.8 \text{ mm}^2$$

$$H = 0.93$$

$$F_{cr} = 146.0 \text{ MPa}$$

$$(fi)PnFT = 328.4 \text{ kN}$$

$$(fi)Rn = \min[(fi)Pnx; (fi)Pny; (fi)PnFT]$$

$$(fi)Rn = 328.4 \text{ kN} \quad \geq \quad Cu = 274 \text{ kN}$$

$$Cu / (fi)Rn = 0.83 \quad \text{CUMPLE}$$

De lo anterior, se identifica que el perfil seleccionado para la cuerda inferior consiste en dos ángulos de L4"x4"x1/4" y, se tiene una relación de utilización del 83%, con lo cual se aprovecha al máximo la capacidad del material.

En la siguiente tabla, se observa un resumen de los resultados hallados en cada caso de estudio. Es importante resaltar los siguientes datos:

- El caso 1, es el diseño más económico con un tenor para el tramo de cuerda diseñado de aproximadamente 1,80 kg/m², sin embargo, es el caso que puede generar diferencias de criterio entre los diseñadores al momento de discutir si las correas de cubierta son un arriostamiento suficiente para evitar una falla por pandeo fuera del plano.
- El caso 3 que considera la aplicación de Shrivastava, se logra un diseño más económico comparado con el caso 2, obteniendo una disminución de aproximadamente el 24% del peso del material del tramo de cuerda diseñado con el caso 2. También se aprecia que el caso 3 logra índices de sobreesfuerzo menores o igual que el caso 2, indicador de que se aprovecha mejor la capacidad del elemento estructural. Por otro lado, el caso 3 evita discrepancias al momento de definir la longitud no arriostada, ya que considera los puntos de soporte del caso 2.

Tabla 2. Resumen de resultados de los casos de estudio

Caso	Cuerda	Long. Efectiva en el plano, Lx (m)	Long. Efectiva fuera del plano, Ly (m)	Perfil	Índice Demanda / Capacidad	Tenor (kg/m ²)
1	Superior	1.50	1.50	T3X3X5/16	96%	1.8
	Inferior	1.50	6.00	T4X4X3/8	83%	
2	Superior	1.50	6.00	T4X4X5/8	89%	2.9
	Inferior	1.50	6.00	T4X4X3/8	83%	
3	Superior	1.50	5.21	T4X4X1/2	86%	2.2
	Inferior	1.50	4.56	T4X4X1/4	83%	

8 CONCLUSIONES

- El diseño planteado para el caso 1 es el más económico, pero a su vez genera más discrepancias en el medio profesional, ya que se considera que las correas de cubierta son un adecuado arriostamiento lateral que evite una falla por pandeo fuera del plano, por lo tanto, el propósito de la monografía es evitar dicha discusión considerando que el arriostamiento es dado por las riostras y haciendo un análisis más detallado con la aplicación de Shrivastava.
- La aplicación de Shrivastava puede ser más eficiente donde la diferencia de las fuerzas internas de panel a panel sea mayor, por ejemplo, es mucho más eficiente si se cambia de un panel en compresión a otro en tracción.

- La precisión en la validación de la teoría de Shrivastava es un buen resultado que da confiabilidad para su aplicación sin dejar de lado la seguridad y estabilidad de la estructura.
- La aplicación de Shrivastava es simple comparada con otras metodologías, sin embargo, puede requerir un proceso iterativo ya que depende de la sección del elemento y de sus fuerzas internas a lo largo de la longitud no arriostrada, por lo cual se puede requerir hacer el análisis estructural cada vez que se cambie la sección del elemento debido a la variabilidad de las fuerzas internas producto del aumento o disminución del peso propio.
- Se recomienda aplicar la simplificación propuesta por Vinnakota para un diseño preliminar, ya que los resultados son bastante cercanos al método de Shrivastava.
- Se concluye que el método de Shrivastava puede lograr optimizar un diseño hasta con una reducción a lo sumo del 25% del peso de un elemento estructural, y adicionalmente logra aprovechar más la capacidad de los elementos estructurales sometidos a compresión.
- Se presentó la aplicabilidad de Shrivastava sin tener variación de la sección del elemento a lo largo de la longitud no arriostrada, por lo tanto, se deja como materia de continuación en la investigación, analizar el caso donde la inercia puede variar de panel a panel.

9 REFERENCIAS

- Shrivastava, S. (1980). Elastic buckling of a column under varying axial force. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction, Vol. 17, No. 1, pp. 19-21.*
- Dunaiski, W. (2008). Investigation Into the Effective Lengths of Web Compression Elements in Parallel Chord Trusses. Stellenbosch: Stellenbosch University.*
- Zheng, L., Qu, X., Gao, Y. et al. The In-Plane Effective Length Factor of Web Members of the Steel Truss. Int J Steel Struct (2021).*
- Vinnakota, S. (2005). Steel Structures: Behavior and LRFD. Nueva York: McGraw-Hill Education.*
- Matthies, D. (2012). Lateral Buckling Analysis of a Steel Pony Truss. Ames: University of Science and Technology.*
- Mehmet Avcar. Elastic Buckling of Steel Columns Under Axial Compression. American Journal of Civil Engineering. Vol. 2, No. 3, 2014, pp. 102-108.*

Brito, C. (2018). *Obtención de Coeficientes de Longitud de Pandeo Para Puentes Tipo Media Cercha*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Soto Rodríguez, H. (Agosto de 2005). *Compresión*. Morelia, México.

Chen, K., & Zhao, E. (2015). *Research on chord-buckling-length coefficient of cross-type lattice boom*. *Engineering Mechanics*, 36(5), 215–221.

Garza, L., Lara, L., & Posada, J. (2005). *Resistencia a la compresión de ángulos dobles separados*. Medellín: Universidad Nacional.

Dunaiski, W. (2008). *Investigation Into the Effective Lengths of Web Compression Elements in Parallel Chord Trusses*. Stellenbosch: Stellenbosch University.

Galambos, T. (1998). *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*. USA: Joohn Wiley & Sons, Inc.

Hong, W., & Liang, Y. (2017). *A study on effective length of slender column with elastic restraints*. *Procedia Engineering*, 210, 228–234.

McCormac, J. and Csernak, S., 2012. *Structural Steel Design*. 5th ed. New Jersey: Alfa Omega, pp.200-213.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Título F, pp.47-48.

Duan, L. and Chen, W., 1999. *Effective Length Factors Of Compression Members*. 1st ed. Boca Ratón, Florida: CRC Press LLC.

Mehmet Avcar. *Elastic Buckling of Steel Columns Under Axial Compression*. *American Journal of Civil Engineering*. Vol. 2, No. 3, 2014, pp. 102-108.

Shrivastava, S. (1980). *Elastic buckling of a column under varying axial force*. *Engineering Journal-American Institute of Steel Construction*, Vol. 17, No. 1, pp. 19-21.

Packer, J., & Henderson, J. (1997). *HOLLOW STRUCTURAL SECTION CONNECTIONS and TRUSSES*. Alliston: Universal Offset Limited.

Hinojosa Sánchez-Barbudo, I., 2009. *Pandeo Lateral De Estructuras Metálicas En Arco*. Doctorado. Universidad de Sevilla, departamento de medios continuos.

Beer, F., Johnston, E., Mazurek, D., Cornwell, P. and Self, B., 2009. *Mecánica de Materiales*. 5th ed. México: McGraw-Hill Companies.

2016. *Specification For Structural Steel Buildings*. Chicago, Ill.: American Institute of Steel Construction, p.35.

Kuhlmann, U. and Ungermann, D., 1993. *Eurocode 3*. Berlin: Beuth.
2014. *Código Colombiano De Diseño Sismico De Puentes*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sismica.

Arboleda Barrera, D., 2019. *Pandeo De Armaduras En Acero Sin Arriostramientos Laterales*. Medellín.

1958. *Ejecución De Construcciones De Acero*. Santiago, Chile: INN.

Euler, L. (1759). *On the strength*. Academy Royal Society Belles Lettres Berlin Memories.

10 ANEXOS

10.1 CARGAS DE VIENTO

En el análisis del viento se debe realizar un procedimiento acorde con la NSR-10 e identificar las condiciones particulares del proyecto, tales como ubicación, geometría, clasificación de cerramiento., y etc.

10.1.1. Clasificación de cerramiento

En la siguiente imagen se presenta la localización de las aberturas presentes en el proyecto. Obsérvese que la fachada 1 (fachada frontal) cuenta con dos puertas principales para acceso a la bodega con dimensiones de 4m x 6 m, mientras que la fachada 2 (fachada posterior) cuenta con 2 rejillas de ventilación con dimensiones de 1m x 10 m, mientras que las fachadas 3 y 4 (laterales) no cuentan con aberturas.

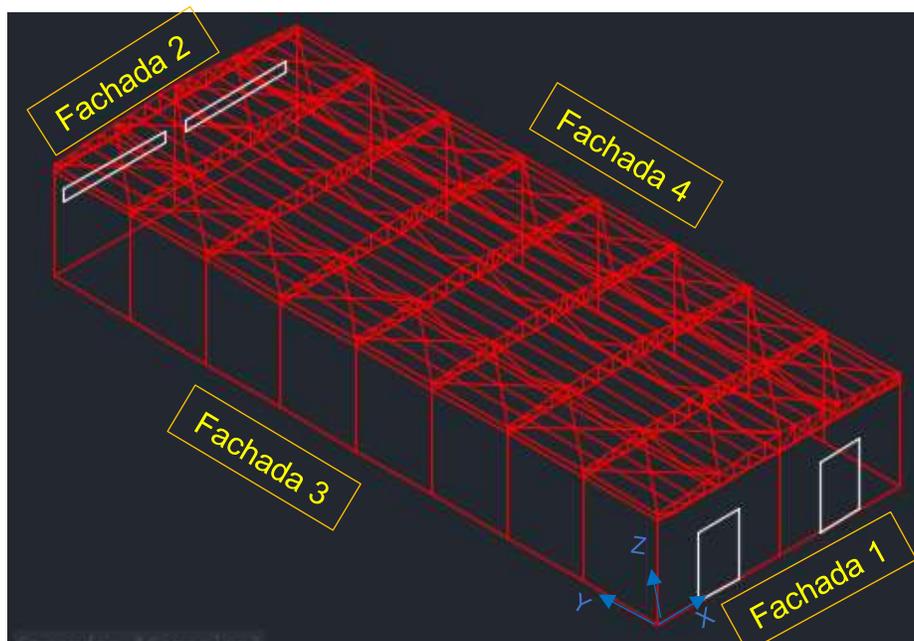


Figura 21. Aberturas de la bodega

Nota: Ejes de referencia

Dirección X: Perpendicular al caballete

Dirección Y: Paralelo al caballete

De la información anterior se obtiene lo siguiente, suponiendo que la puerta principal permanece abierta se calcula las áreas de abertura que se adjuntan en la siguiente tabla, con lo cual se clasifica el cerramiento de la bodega.

	A_g	A_o	$0.01A_g$ o 0.37 m^2	A_{gi}	A_{oi}	A_o/A_g	A_o/A_{oi}	A_{oi}/A_{gi}
Fachada 1	241.2	48	0.37	2833.2	20	0.20	2.40	0.01
Fachada 2	241.2	20	0.37	2833.2	48	0.08	0.42	0.02
Fachada 3	576	0	0.37	2498.4	68	0.00	0.00	0.03
Fachada 4	576	0	0.37	2498.4	68	0.00	0.00	0.03
Cubierta	1440	0	0.37	1634.4	68	0.00	0.00	0.04
Σ	3074.4	68						
Clasificación:	Parcialmente Cerrado							

Obsérvese de la tabla anterior las siguientes relaciones dadas por la fachada 1:

- $A_o/A_{oi} > 1.10$
- $A_o > 0.37 \text{ m}^2$
- $A_{oi}/A_{gi} \leq 0.20$
- $A_o/A_g < 0.80$

Por lo tanto, el edificio clasifica como parcialmente cerrado.

10.1.2. Edificio bajo

Un edificio cerrado o parcialmente cerrado clasifica como bajo si cumple las siguientes condiciones:

- Altura media $h = 9.5 \text{ m} < 18 \text{ m}$
- Altura media $h = 9.5 \text{ m}$ no excede la menor dimensión horizontal del edificio, la cual es $B = \text{menor}(24 \text{ m}, 60 \text{ m}) = 24 \text{ m} > h = 9.5 \text{ m}$

Por lo tanto, el edificio clasifica como bajo.

10.1.3. Rugosidad y Exposición

En las siguientes imágenes se muestra la localización de la bodega industrial en la ciudad de Cartagena, donde se observa que la zona es cerca de superficies acuáticas en zonas propensas a huracanes, y es un terreno abierto con pocas obstrucciones, por ende, clasifica en rugosidad tipo C, y en general su exposición se determina como tipo C.



Figura 22. Localización del proyecto



Figura 23. Zona de exposición con referencia al proyecto

10.1.4. Factor topográfico

Como se observó en la sección anterior el proyecto no se encuentra sobre una colina, por lo tanto, el coeficiente de factor topográfico, $K_{zt} = 1,00$

10.1.5. Factor de direccionalidad

De la siguiente tabla se identifica que el coeficiente de direccionalidad es, $K_d = 0,85$.

Tipo de Estructura	Factor de Direccionalidad del Viento, K_d^*
Edificios	0.85
Sistema Principal de Resistencia de Cargas de Viento	
Componentes y Recubrimientos	
Cubiertas Abovedadas	0.85
Chimeneas, Tanques y Estructuras Similares	0.90
Cuadradas	
Hexagonales	
Redondas	0.95
Avisos Sólidos	0.85
Avisos Abiertos y Estructura Rectangular	0.85
Torres en Celosía	0.85
Triangular, Cuadrada y Rectangular	
Todas las otras secciones transversales	
	0.95

* El factor de direccionalidad K_d ha sido calibrado con las combinaciones de carga especificadas. Este factor debe usarse cuando se usen las combinaciones B.2.3 y B.2.4 correspondientes.

Figura 24. Coeficientes de direccionalidad

10.1.6. Velocidad básica de viento

Según el mapa amenaza eólica la edificación se encuentra en región 5, por lo tanto, la velocidad básica para combinaciones de resistencia es 46 m/s.

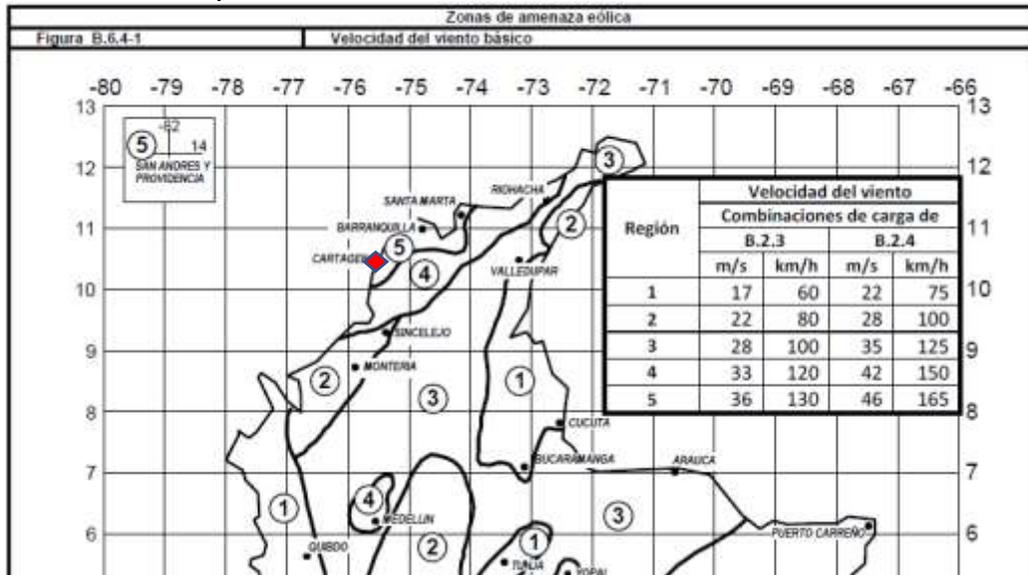


Figura 25. Mapa de amenaza eólica de Colombia

10.1.7. Coeficiente de importancia

La edificación clasifica como ocupación normal entonces clasifica en categoría I, con un valor de coeficiente de importancia igual a 0,77.

Categoría	Regiones no propensas a huracanes, y regiones con posibilidad de huracanes de $V = 40 - 45$ m/s	Regiones con posibilidades de huracanes y $V > 45$ m/s
I	0.87	0.77
II	1.00	1.00
III	1.15	1.15
IV	1.15	1.15

Notas:

- Las categorías de los edificios y de las estructuras se listan en la sección A.2.5 del presente reglamento.

Figura 26. Coeficiente de importancia

10.1.8. Coeficiente de exposición de presión por velocidad

Dado que el edificio clasificó como bajo, el valor de $z = h$, por lo tanto, se determina la presión por velocidad únicamente para el valor de h . Para calcular la presión por velocidad es necesario conocer los coeficientes z_g y α se eligen de la tabla B.6.5-2 de la NSR-10.

Constante de Exposición del Terreno										
Tabla B.6.5 -2										
Exposición	α	Z_g (m)	\hat{a}	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	ℓ (m)	\bar{e}	Z_{min}^* (m)
B	7.0	365.8	1/7.0	0.84	1/4.0	0.45	0.30	97.5	1/3	9.0
C	9.5	274.3	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.4	1/5	4.5
D	11.5	213.4	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	198.1	1/8	2.0

* Z_{min} mínima altura usada para asegurar que la altura equivalente Z es mayor de 0.6 h o Z_{min}
 Para edificios con $h \leq Z_{min}$, Z debe tomarse como Z_{min}

Figura 27. Constantes de exposición del terreno

Ahora se calcula el coeficiente de exposición.

$$K_z = 2.01 \cdot (4.0/z_g)^{2/\alpha} \quad \text{para } z < 4.0 \text{ m (Tabla B.6.5-3)}$$

$$K_z = 2.01 \cdot (z/z_g)^{2/\alpha} \quad \text{para } 4.0 \text{ m} \leq z \leq z_g \text{ (Tabla B.6.5-3)}$$

$$\alpha = 9.50 \quad \text{(Tabla B.6.5-2)}$$

$$z_g = 274.30 \text{ m} \quad \text{(Tabla B.6.5-2)}$$

Para $z=h$:

$$z = h = 9.60 \text{ m}$$

$$K_z = K_h = 0.99$$

10.1.9. Presión por velocidad

A continuación, se calcula la presión por velocidad teniendo en cuenta los parámetros de entrada definidos y calculados en las secciones anteriores.

CÁLCULO DE LA PRESIÓN POR VELOCIDAD SEGÚN NSR-10 MÉTODO 2 - PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

DATOS DE ENTRADA

Condiciones de localización y de entorno

Localización	Cartagena	
Región de mapa eólico	5	
Vv (estados límites de servicio) =	36	m/s para Combinaciones de Carga B.2.3
Vv (estados límites de resistencia) =	46	m/s para Combinaciones de Carga B.2.4
Altitud =	0	msnm
¿Región propensa a huracanes?	SI	
Factor Topográfico, K_{zt} =	1.00	(B.6.5.7 & Figura B.6.5.1)
Categoría de exposición =	C	(B.6.5.6.3)

Características de la edificación

Grupo de Uso =	I	(A.2.5.1)
Factor de importancia, I =	0.77	
Factor de direccionalidad, K_d =	0.85	(Tabla B.6.5-4)
Dimensión perpendicular al caballete, X =	24.00	m
Dimensión paralela al caballete, Y =	60.00	m
Altura de la cornisa, h_e =	9.60	m
Altura del caballete, h_r =	10.50	m
Angulo de la cubierta con la horizontal, θ =	4.29	grados
Altura media de la cubierta, h =	9.60	m
Nivel sup. de la abertura más alta, $z_{\max \text{ ab.}}$ =	9.60	m
Altura de la base sobre el nivel del terreno =	0.00	m
Clasificación según cerramiento =	Parcialmente cerrado	(B.6.2)

PRESIÓN POR VELOCIDAD

$$q_z = 0.613(e^{-msnm/7987})K_zK_{zt}K_dV^2 \quad \text{N/m}^2; V \text{ en m/s}$$

(B.6.5.10, Eq. B.6.5-13, con ajuste por altitud)

$$K_z = 2.01*(4,0/z_g)^{2/\alpha} \quad \text{para } z < 4,0 \text{ m (Tabla B.6.5-3)}$$

$$K_z = 2.01*(z/z_g)^{2/\alpha} \quad \text{para } 4,0 \text{ m} \leq z \leq z_g \text{ (Tabla B.6.5-3)}$$

$$\alpha = 9.50 \quad \text{(Tabla B.6.5-2)}$$

$$z_g = 274.30 \text{ m} \quad \text{(Tabla B.6.5-2)}$$

Para z=h:

$$z = h = 9.60 \quad \text{m}$$

$$K_z = K_h = 0.99$$

$$q_h = 842 \quad \text{N/m}^2 \quad \text{Estado límite de resistencia (B.2.4)}$$

$$q_h = 0.84 \quad \text{kN/m}^2 \quad \text{Estado límite de resistencia (B.2.4)}$$

Finalmente, la presión por velocidad es igual 0,84 kN/m².

10.1.10. Factor ráfaga

Dado que el edificio clasificó como bajo, entonces no es necesario calcular el factor de ráfaga, G, ya que los coeficientes de presión externa e interna para edificios bajos ya viene combinado con el factor de ráfaga.

10.1.11. Coeficiente de presión interna

El coeficiente de presión interna es igual a +/- 0,55 según la clasificación de cerramiento obtenido para el edificio.

Sistema Principal Resistente a la Fuerza de Viento, Componentes y Revestimientos- Método 2		Todas las alturas											
Figura B.6.5-2	Coeficientes de presión interna, G _{C_{pi}}	Muros y Cubiertas											
Edificios Abiertos y total o Parcialmente Cerrados													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Clasificación del Cerramiento</th> <th>G_{C_{pi}}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Edificios Abiertos</td> <td>0.00</td> </tr> <tr style="border: 2px solid red;"> <td>Edificios Parcialmente Cerrados</td> <td>0.55</td> </tr> <tr style="border: 2px solid red;"> <td></td> <td>-0.55</td> </tr> <tr> <td>Edificios Cerrados</td> <td>0.18</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-0.18</td> </tr> </tbody> </table>	Clasificación del Cerramiento	G _{C_{pi}}	Edificios Abiertos	0.00	Edificios Parcialmente Cerrados	0.55		-0.55	Edificios Cerrados	0.18		-0.18	
Clasificación del Cerramiento	G _{C_{pi}}												
Edificios Abiertos	0.00												
Edificios Parcialmente Cerrados	0.55												
	-0.55												
Edificios Cerrados	0.18												
	-0.18												
<p>Notas:</p> <ol style="list-style-type: none"> Los signos positivos y negativos significan presiones y succiones actuando sobre las superficies internas, respectivamente. Los valores de G_{C_{pi}} deberán ser utilizados con q_z y q_h según se especifica en B.6.5.12. se deberían considerar dos casos para determinar los requerimientos de la carga crítica para la condición apropiada: <ol style="list-style-type: none"> Un valor positivo de G_{C_{pi}} aplicado sobre todas las superficies internas. Un valor negativo de G_{C_{pi}} aplicado sobre todas las superficies internas 													

Figura 28. Coeficiente de presión interna

10.1.12. Coeficiente de presión externa

Dado que el edificio clasificó como bajo es posible determinar los coeficientes de presión externa a partir de la figura B.6.5-7, según las zonas definidas y la inclinación de la cubierta ($\theta = 4,3^\circ$) se obtiene los siguientes coeficientes.

Sistema Principal Resistente a la Fuerza de viento - Método 2		h ≤ 18.0 m									
Figura B.6.5-7 (Continuación)		Coeficientes de presión externa, G_{Cpf}									
Edificios total o parcialmente cerrados		Muros de baja altura y Cubiertas									
Cubierta Ángulo θ (grados)	Superficie de la edificación										
	1	2	3	4	5	6	1E	2E	3E	4E	
	0-5	0.40	-0.69	-0.37	-0.29	-0.45	-0.45	0.61	-1.07	-0.53	-0.43
	20	0.53	-0.69	-0.48	-0.43	-0.45	-0.45	0.80	-1.07	-0.69	-0.64
	30-45	0.56	0.21	-0.43	-0.37	-0.45	-0.45	0.69	0.27	-0.53	-0.48
90	0.56	0.56	-0.37	-0.37	-0.45	-0.45	0.69	0.69	-0.48	-0.48	

Figura 29. Coeficientes de presión externa

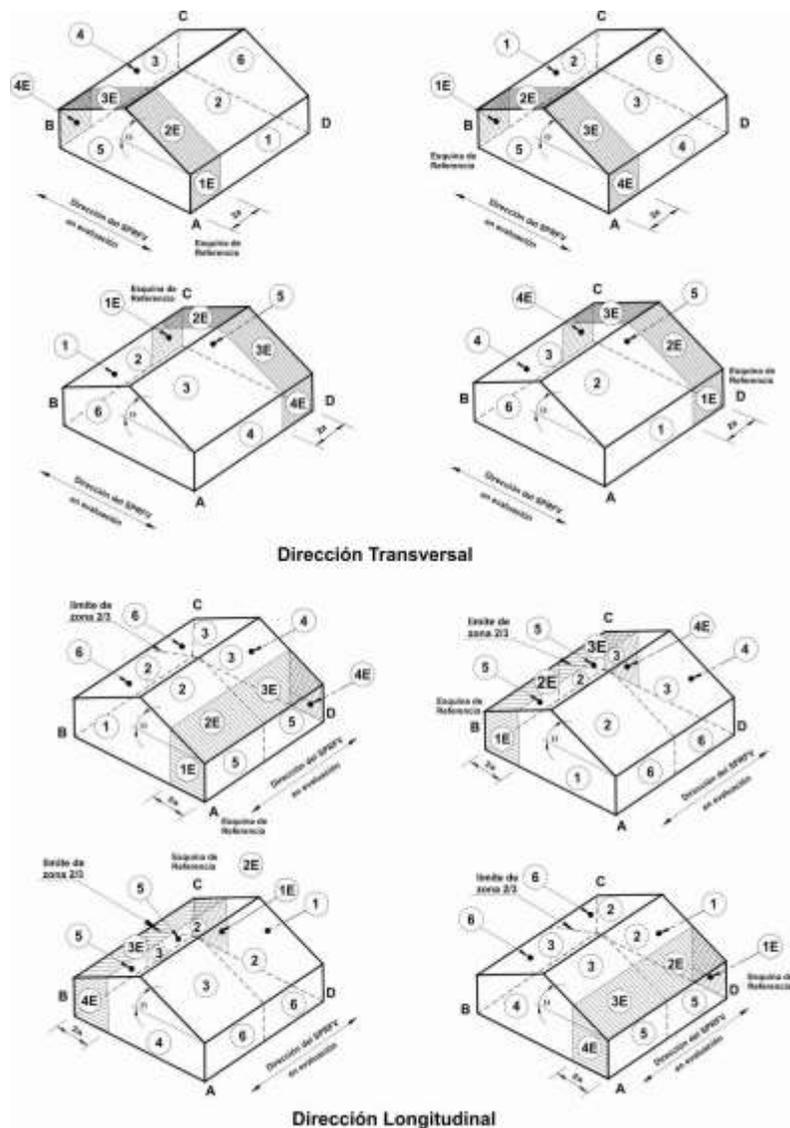


Figura 30. Localización de zonas para coeficientes de presión externa

A continuación, se presentan esquemas con los coeficientes de presión externa e interna aplicados en la edificación.

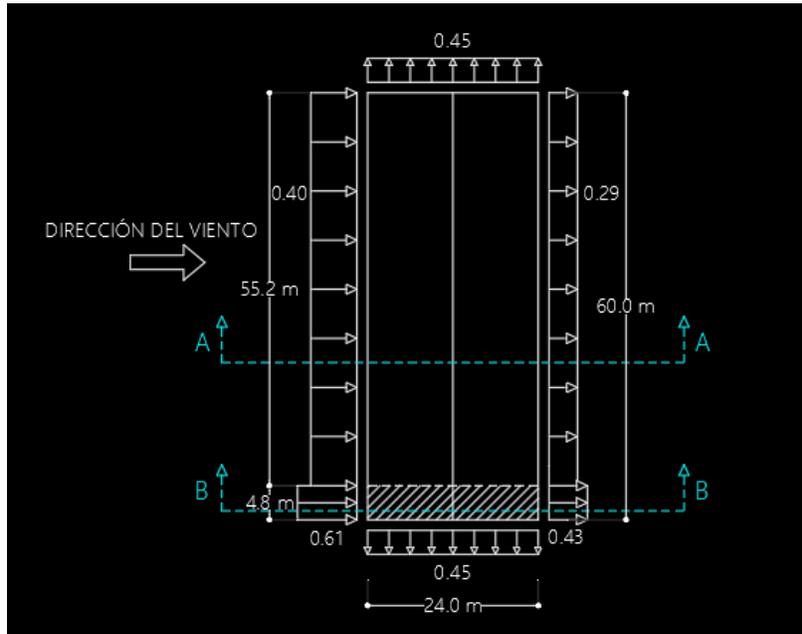


Figura 31. Coeficientes de presión externa en fachadas para viento en dir. X

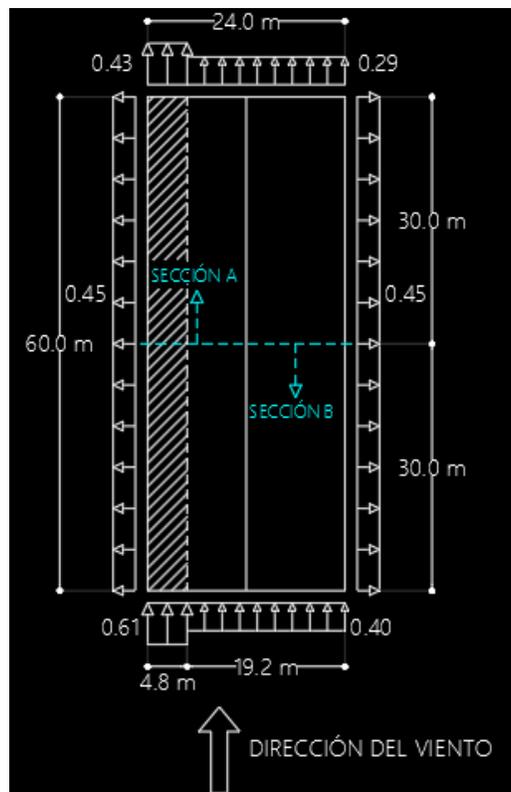


Figura 32. Coeficientes de presión externa en fachadas para viento en dir. Y

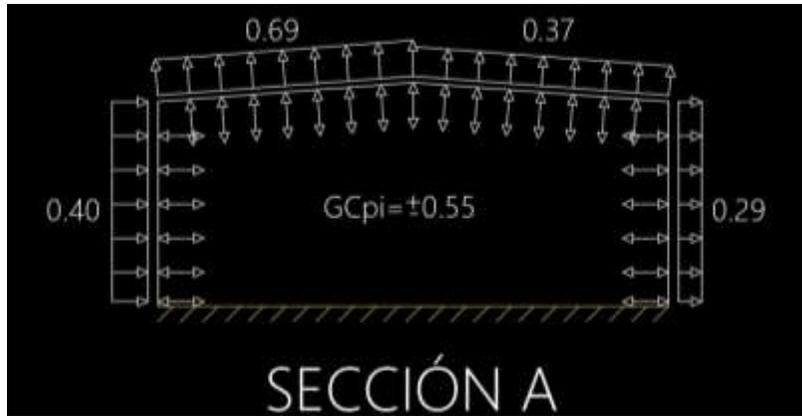


Figura 33. Coeficientes de presión externa e interna, sección A con viento en dirección X

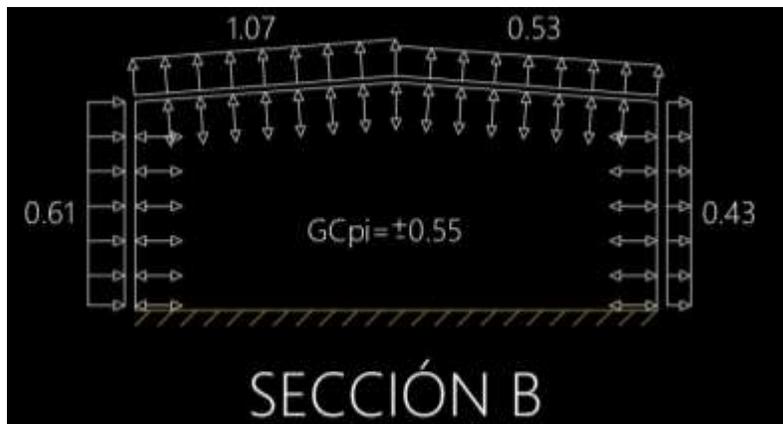


Figura 34. Coeficientes de presión externa e interna, sección B con viento en dirección X

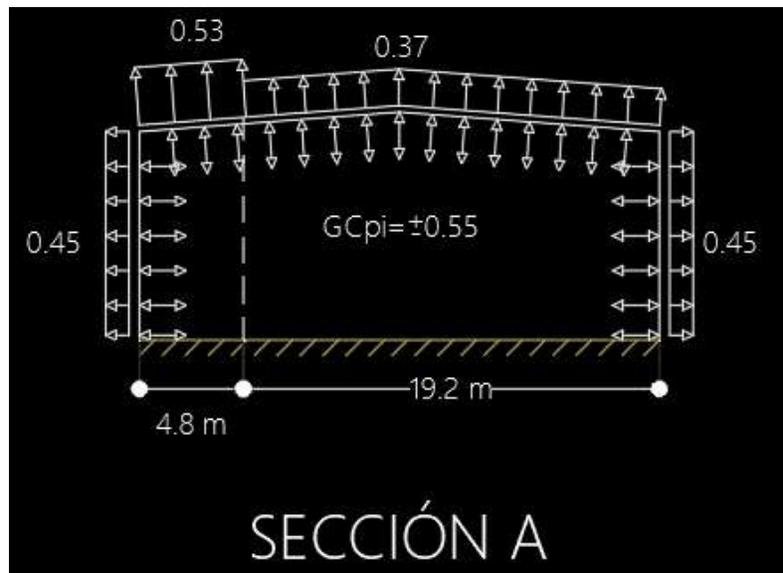


Figura 35. Coeficientes de presión externa e interna, sección A con viento en dirección Y

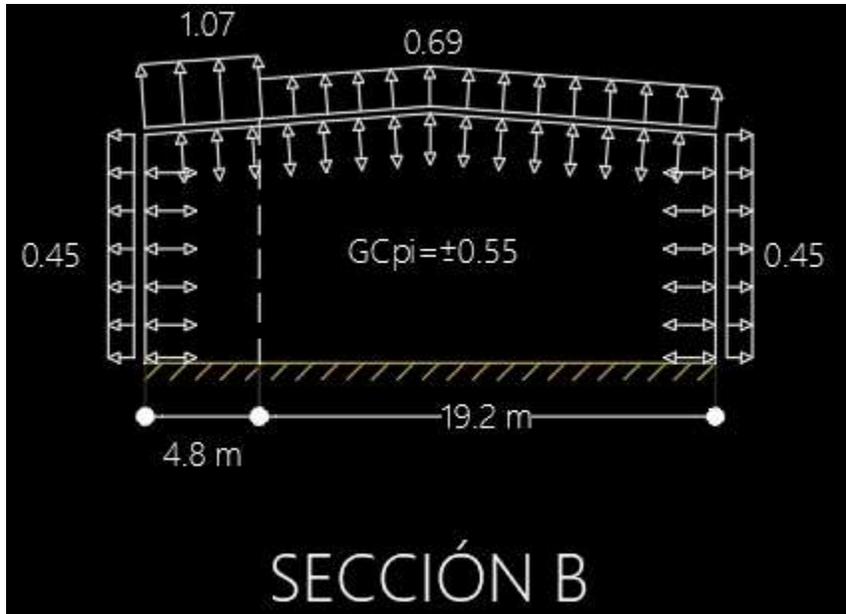


Figura 36. Coeficientes de presión externa e interna, sección B con viento en dirección Y

Ahora se presenta la sumatoria de los coeficientes de presión externa e interna para los dos casos posibles.

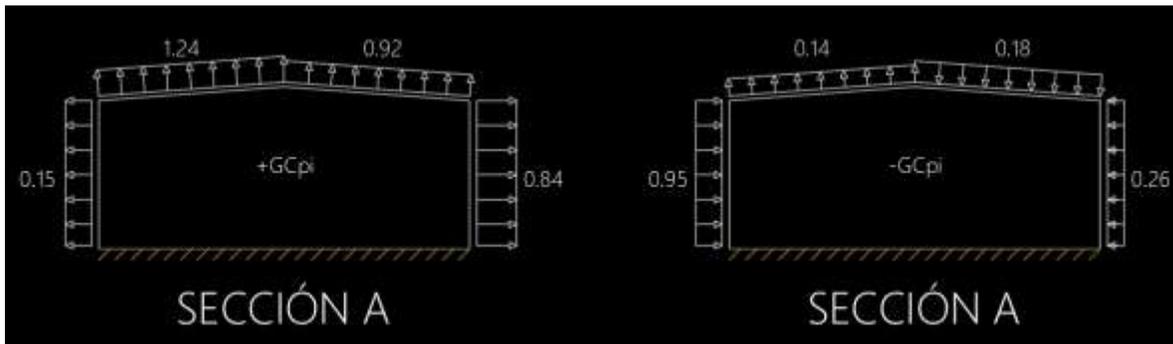


Figura 37. Sumatoria de coeficientes de presión, sección A con viento en dirección X

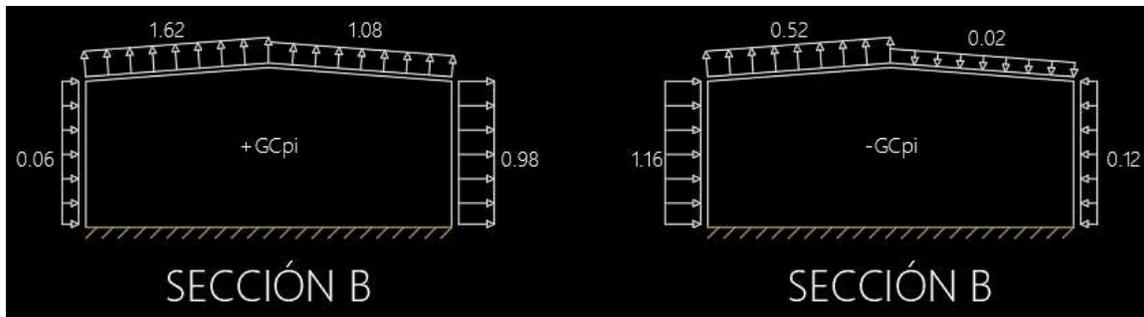


Figura 38. Sumatoria de coeficientes de presión, sección B con viento en dirección X

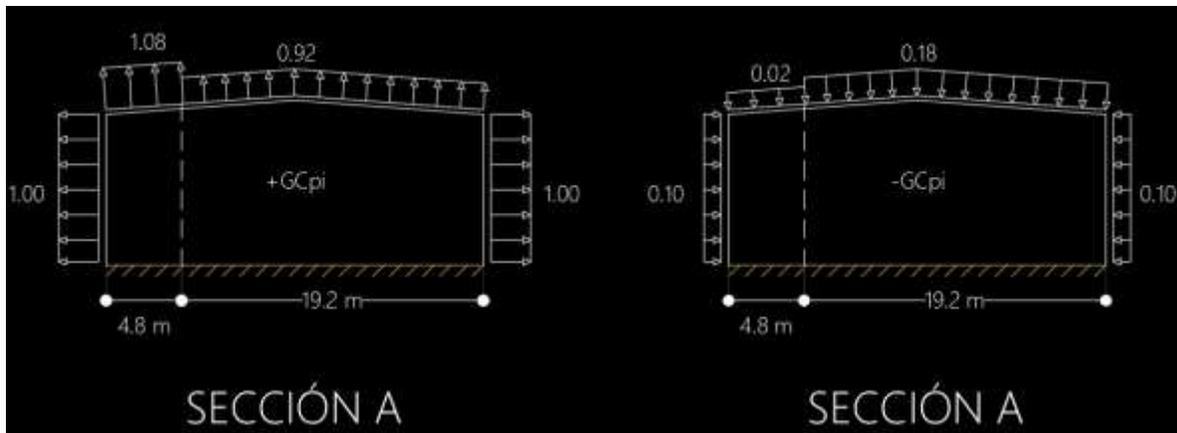


Figura 39. Sumatoria de coeficientes de presión, sección A con viento en dirección Y

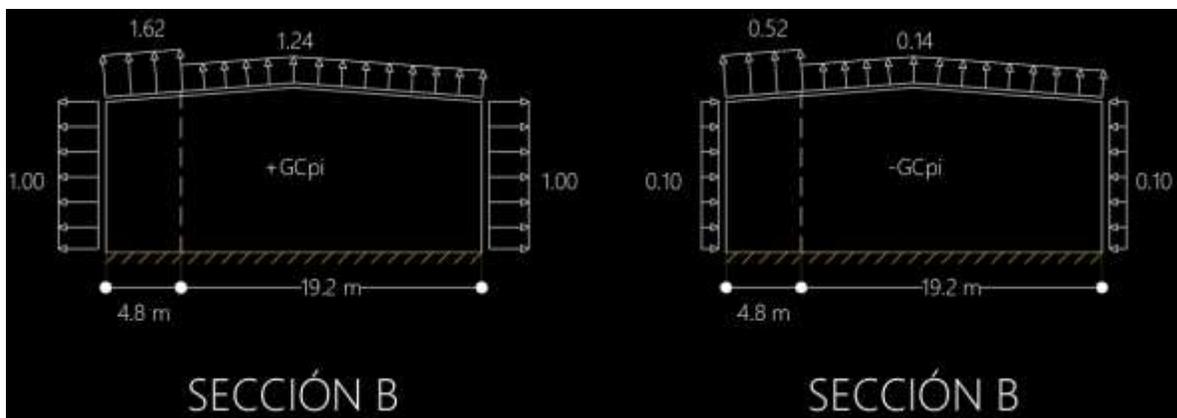


Figura 40. Sumatoria de coeficientes de presión, sección B con viento en dirección Y

10.1.13. Cargas de viento SPRFV

Se analizará una cercha típica localizada en la zona central de la bodega, por lo tanto, nos interesa los coeficientes de presión externa de la sección A y sección A o B para el viento perpendicular y paralelo a la cumbrera respectivamente. Adicionalmente, se debe considerar la carga de viento de diseño mínima para SPRFV como se define en B.6.1.3, el valor mínimo es $0,40 \text{ kN/m}^2$, proyectado a un plano vertical normal a la dirección del viento de estudio.

A continuación, se mostrará esquemas de aplicación de las cargas de viento sobre la cercha en kN/m para cada dirección principal del viento y cada zona.

Notación: Los casos de carga de viento se nombraron con la siguiente convención.

WX(GCpi+)SeccA: Significa viento en dirección X con coeficiente de presión interna positivo para la zona delimitada por la sección A.

A continuación, se presenta un resumen con las cargas de viento de diseño.

Separación entre cerchas, b: 7.50 m
 a = 2.4 m
 2a = 4.8 m
 Presión por velocidad, qh: 0.84 kN/m²
 Coeficientes de presión interna, Gcpi: 0.55

Dirección del viento								p = Presión Neta (kN/m ²)		p = Presión Neta (kN/m)	
Paralelo	Perpendi.	Superficie	Superficie	Gc _{pf}	Gc _{pf} - (+)Gc _{pi}	Gc _{pf} - (-)Gc _{pi}	q*(Gc _{pf} - (+)Gc _{pi})	q*(Gc _{pf} - (-)Gc _{pi})	q*(Gc _{pf} - (+)Gc _{pi})*b	q*(Gc _{pf} - (-)Gc _{pi})*b	
B	A	Barbovento	1	0.40	-0.15	0.95	-0.13	0.80	-0.95	6.00	
B	A	Cubierta	2	-0.69	-1.24	-0.14	-1.04	-0.12	-7.84	-0.88	
A	A	Cubierta	3	-0.37	-0.92	0.18	-0.78	0.15	-5.81	1.14	
A	A	Sotavento	4	-0.29	-0.84	0.26	-0.71	0.22	-5.31	1.64	
A o B	B	Lateral	5	-0.45	-1.00	0.10	-0.84	0.08	-6.32	0.63	
A o B	A	Lateral	6	-0.45	-1.00	0.10	-0.84	0.08	-6.32	0.63	
B	B	Barbovento	1E	0.61	0.06	1.16	0.05	0.98	0.38	7.33	
B	B	Cubierta	2E	-1.07	-1.62	-0.52	-1.36	-0.44	-10.24	-3.29	
A	B	Cubierta	3E	-0.53	-1.08	0.02	-0.91	0.02	-6.82	0.13	
A	B	Sotavento	4E	-0.43	-0.98	0.12	-0.83	0.10	-6.19	0.76	

De la tabla anterior se resalta lo siguiente, para dirección del viento paralelo a la cumbrera es posible para una cercha intermedia quedar entre la sección A o B, pero De la tabla anterior, obsérvese que la sección A produce la mayor presión sobre la cubierta mientras que la sección B genera la mayor succión, por lo tanto, se considera ambos casos de carga, por otro lado, es posible descartar la sección B para el viento perpendicular a la cumbrera dado que no se genera en una cercha intermedia que es el caso de estudio.

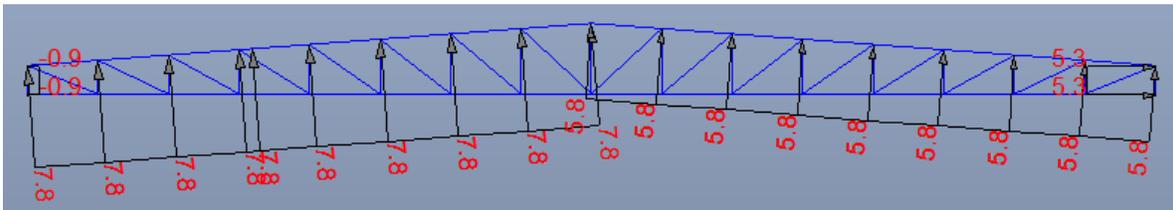


Figura 41. Asignación de viento WX(C_{pi}+)SeccA (kN/m)

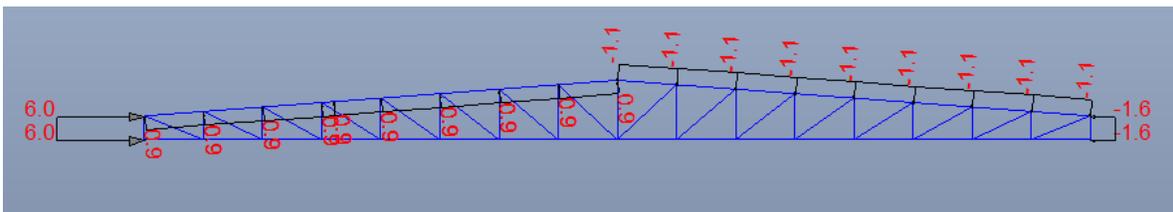


Figura 42. Asignación de viento WX(C_{pi}-)SeccA (kN/m)

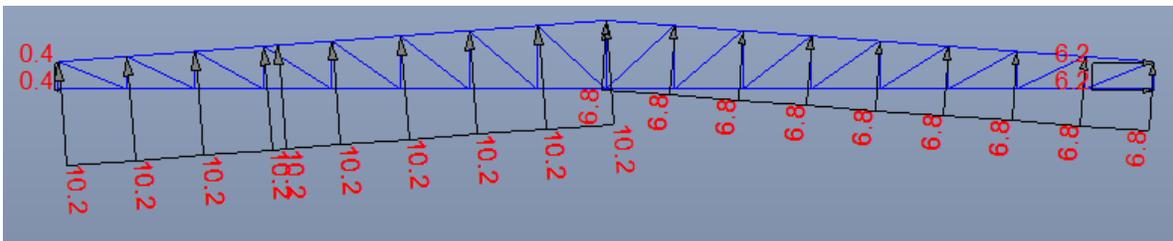


Figura 43. Asignación de viento WX(C_{pi}+)SeccB (kN/m)

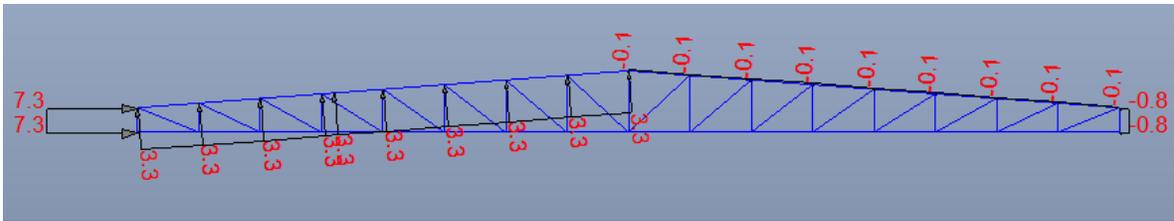


Figura 44. Asignación de viento WX(Cpi-)SeccB (kN/m)

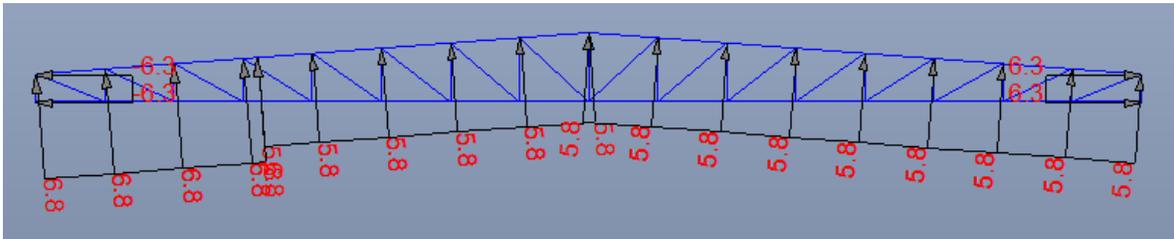


Figura 45. Asignación de viento WY(Cpi+)SeccA (kN/m)

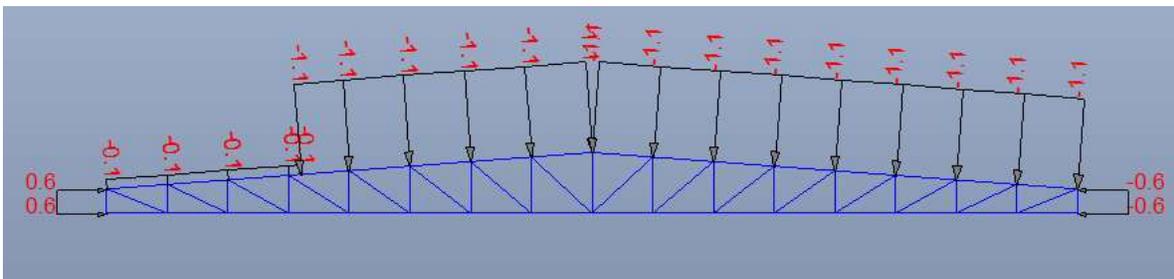


Figura 46. Asignación de viento WY(Cpi-)SeccA (kN/m)

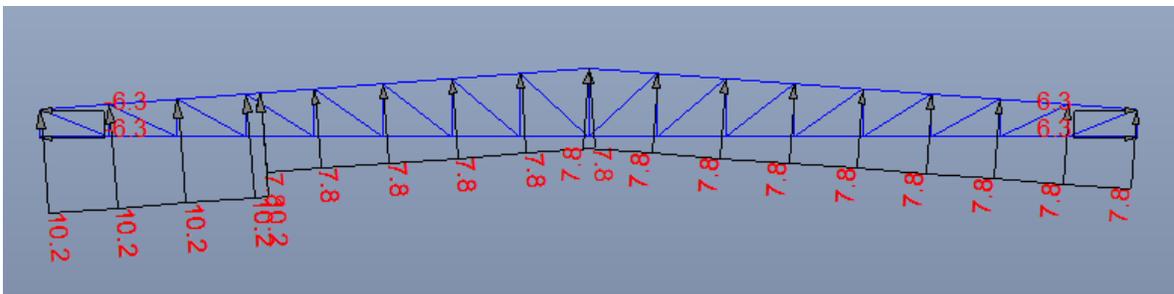


Figura 47. Asignación de viento WY(Cpi+)SeccB (kN/m)

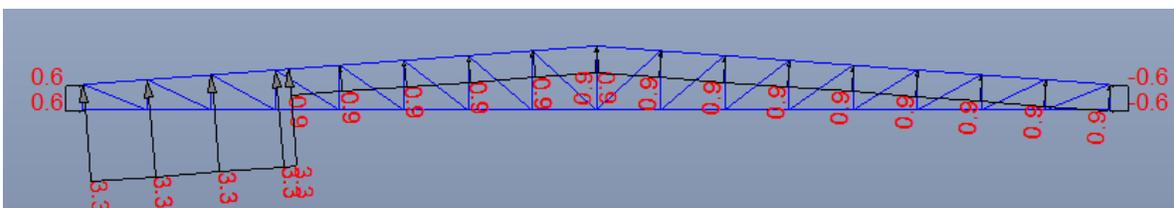


Figura 48. Asignación de viento WY(Cpi-)SeccB (kN/m)