



**ESTUDIO Y COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL CHEQUEO DE LA
ESTABILIDAD LATERAL DE LAS VIGAS PRETENSADAS DE PUENTES
VEHICULARES DURANTE EL IZADO E INSTALACIÓN**

Daniel Camilo Duque Correa

William Alberto Gallego Ruiz

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

Asesor

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

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Duque Correa & Gallego Ruiz, 2022)
Referencia	Duque Correa, D, & Gallego Ruiz, W. (2022). <i>Estudio y comparación de metodologías para el chequeo de la estabilidad lateral de las vigas pretensadas de puentes vehiculares durante el izado e instalación</i> [Trabajo de grado especialización].
Estilo APA 7 (2020)	Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte X.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Juan Carlos Vélez

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

Tabla de contenido

MOTIVACIÓN	5
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
MARCO TEÓRICO	6
METODOLOGÍA	10
CAUSAS DE COLAPSO DE VIGAS EN EL IZADO	11
HIPÓTESIS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD LATERAL.....	12
NORMATIVIDAD VIGENTE	13
METODOLOGÍA DE CÁLCULO	16
IMPERFECCIONES EN VIGAS	27
LIMITE DE ESFUERZOS EN EL CONCRETO.....	29
CONCLUSIONES	33
REFERENCIAS	36
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	37

Lista de figuras

Figura 1 Pandeo lateral en vigas	7
Figura 2 Equilibrio de la viga en posición inclinada.....	8
Figura 3 Desplazamiento del centro de gravedad de una viga pretensada durante el izado.	11
Figura 4 Desplazamiento del centro de gravedad de una viga pretensada durante el izado.	13
Figura 5 Sección transversal Viga I tipo VI.....	16
Figura 6 Sección longitudinal de viga de estudio	17
Figura 7 Esquema de viga con cables de preesfuerzo.....	18
Figura 8 Esfuerzos en las fibras extremas de la viga	19
Figura 9 Esquema de equilibrio de fuerzas en viga postensada.	22
Figura 10 Medidas de barrido en vigas pretensadas.	27
Figura 11 Medidas de excentricidad de los soportes.	28
Figura 12 Factor de seguridad ante la falla en relación con la posición del punto de izado.....	29
Figura 13 Esfuerzos en el concreto según la posición de los puntos de soporte.....	31

MOTIVACIÓN

En la construcción de puentes se utilizan con frecuencia vigas de concreto postensado y/o pretensado, esto debido a las ventajas que ofrecen en comparación con otros sistemas constructivos, el uso de este tipo de vigas permite alcanzar mayores luces sin necesidad de emplear elementos muy esbeltos, lo que se refleja en estructuras más livianas con menor costo de producción.

El crecimiento económico ha impulsado la inversión en el sector de infraestructura vial, lo cual se ha traducido en un aumento en la construcción de puentes vehiculares que permitan dar continuidad a los trazados viales. El mejoramiento en las técnicas y procesos de constructivos han permitido desarrollar obras de ingeniería de gran complejidad en tiempos relativamente cortos, sin poner en riesgo la estabilidad las obras.

La construcción de puentes vehiculares con este tipo de sistemas es ampliamente usada en el gremio de la construcción por la facilidad de fabricación, transporte e instalación, sin embargo, las vigas de concreto pretensadas son más susceptibles al pandeo lateral sobre todo durante la etapa de instalación (izado), por ende, existe una probabilidad de ocurrencia de fallos que pueden poner en riesgo la estabilidad del elemento y de la estructura en general. Por lo anterior, es importante conocer y comprender el comportamiento de estos elementos durante el izado.

La etapa de construcción en la cual se realiza el izado o alzado de las vigas pretensadas es quizás una de las más críticas en la construcción del puente, ya que un fallo en la manipulación de estos elementos podría provocar su colapso, razón por la cual desde el diseño se deben considerar todos los posibles escenarios de falla que se pueden generar, siendo la estabilidad lateral durante el izado uno de los escenarios más importantes y en el cual se debe tener especial cuidado. Sin embargo, durante el proceso de diseño se suele verificar la estabilidad lateral del puente cuando la estructura se encuentra terminada y la viga se comporta como sección compuesta con el tablero, dejando de lado el análisis y la verificación de estabilidad lateral durante el izado.

A lo largo de documento se hace una descripción de la metodología propuesta por algunos autores para evaluar la estabilidad lateral durante el proceso de izado de las vigas pretensadas, explicando mediante un ejemplo detallado el procedimiento metodológico.

OBJETIVO GENERAL

Analizar la información bibliográfica relacionada con el chequeo de la estabilidad lateral de las vigas de concreto pretensadas y/o postensadas de puentes vehiculares durante su izado e instalación, con el fin de comparar las metodologías de cálculo para su comparación, así como los criterios mínimos definidos por las normativas internacionales aplicables.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar las diferentes fuentes bibliográficas con el fin de definir las ecuaciones necesarias para verificar el pandeo lateral en el izado de vigas de concreto postensado y/o pretensado, así como los conceptos básicos y los límites admisibles del pandeo.
- Definir los procedimientos metodológicos requeridos para la verificación de pandeo lateral en vigas de concreto pretensado a través de un caso de estudio.

MARCO TEÓRICO

Con el avance de la tecnología de pretensado, junto con la mejora de los materiales (especialmente el hormigón de alta resistencia y los aceros de pretensado de alta resistencia), las secciones de las vigas se hicieron progresivamente más eficientes desde el punto de vista estructural. En consecuencia, las secciones de las vigas volvieron más esbeltas y las luces mucho más largas (George Laszlo, 1987).

A lo largo de los años se ha logrado aumentar las luces entre apoyos en los puentes vehiculares con la ayuda del sistema de postensado y pretensado de vigas de concreto, lo que se refleja en un ahorro significativo en el peso de la estructura, logrado disminuir costos en la construcción de puentes, sin embargo, el uso de este sistema implica que se tengan vigas muy esbeltas, las cuales son susceptibles a agrietarse y peor aún a derrumbarse durante el proceso de manipulación en el izado.

Generalmente durante el análisis y diseño de la superestructura de un puente en vigas de concreto tensado se verifican el pandeo por flexión y la torsión alrededor del eje de mayor rigidez, sin considerar los efectos del pandeo lateral generado durante su manipulación por izado, efecto que puede llegar a significar incluso el colapso de la viga si no se toman las medidas necesarias.

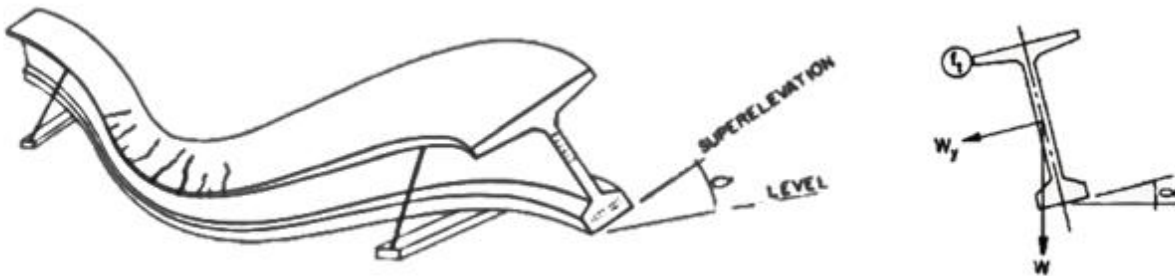
Si las luces se alargan y las vigas son más esbeltas, dichas vigas son susceptibles de doblarse por su propio peso, esto puede ocurrir en el proceso de fabricación, manipulación y montaje. El problema más grave de una viga que cuelga de dos cables es que no existe ninguna restricción lateral (T. J. Stratford, 1999).

El pandeo es entonces un fenómeno de inestabilidad que generalmente se produce en elementos esbeltos como en el caso de las vigas postensadas a causa de la excentricidad que se genera entre el centro de masa de la viga y el eje vertical, produciendo un momento sobre el eje débil que podría exceder la capacidad estructural, ocasionando así, el colapso de la misma durante el proceso de manipulación e izado.

Cuando una viga esbelta está sometida una carga vertical creciente (uniforme o concentrada) existe un valor crítico de esta carga (que puede ser mucho menor que el que produce el colapso por flexión o por cizalladura) para el que se producen deflexiones laterales rápidamente crecientes con sus correspondientes rotaciones cerca del centro de la viga que producen un pandeo lateral y puede provocar el colapso de la viga. Este fenómeno puede producirse incluso cuando no se aplican cargas laterales o fuerzas directas (Muller, 1962).

Figura 1

Pandeo lateral en vigas



Nota. Fuente Handling and Shipping of Long Span Bridge Beams (George Laszlo, 1987)

Si durante la producción de las vigas se genera una ligera excentricidad horizontal en el pretensado desde el eje vertical, o los puntos de izado para la elevación no están centrados en la sección o si el gradiente térmico varía de un lado a otro de la viga, se podría producir la inclinación horizontalmente de la viga durante la manipulación, desplazando así el centro de la masa del centroide original de la viga. Cuando se levanta la viga, la combinación del arco horizontal con la acción de inclinación hace que la viga se flexe y se desvíe progresivamente en el eje débil.

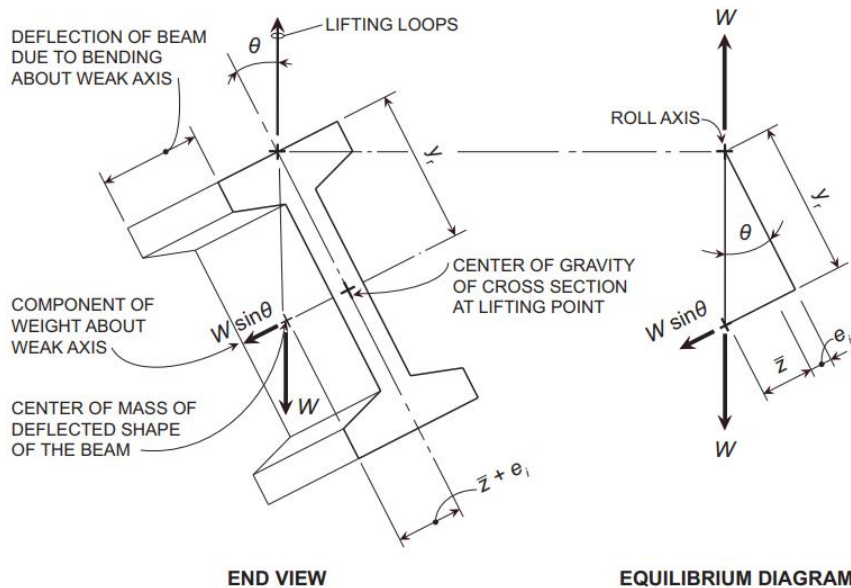
Las imperfecciones durante la fabricación del elemento pretensado tales como diferencias entre las tensiones de los torones o variaciones en el módulo elástico pueden producir problemas de estabilidad lateral durante el izado, debido a los sobreesfuerzos de compresión o de agrietamiento, generando una tendencia al pandeo y potenciando una posible falla del elemento.

En cuanto el momento de inercia del eje débil se agrieta, el fenómeno aumenta rápidamente hasta que la viga falla en compresión o en tensión, dependiendo de la configuración de la viga en el eje vertical. Este fenómeno puede producirse incluso cuando no se aplican cargas laterales o fuerzas directas.

Cuando una viga cuelga de soportes flexibles, como los lazos de elevación, es libre de rotar. El centro de rotación es el punto en el que el soporte flexible se une al cuerpo rígido, normalmente en la superficie superior de una viga de hormigón. Una línea que pasa por el centro de rotación (centro de balanceo) en cada soporte forma un eje de balanceo.

Figura 2

Equilibrio de la viga en posición inclinada.



Nota. Fuente Lateral Stability of Long Prestressed Concrete Beams (Mast, 1989)

Durante el proceso de elevación o izado de las vigas postensadas hasta su posición, que en el caso de las vigas de gran longitud suele realizarse con dos grúas, la viga puede torcerse como un cuerpo rígido, de modo que parte del peso de la viga actúa en torno al eje menor, en consecuencia,

pueden producirse grandes deflexiones a flexión sin que varíe la torsión a lo largo de la viga (T. J. Stratford, 1999).

Para determinar el factor de seguridad de una viga al pandeo, se debe verificar la relación entre la distancia entre el centro de gravedad de la sección y el eje de balanceo (Y_r - ver Figura 2) con la deflexión teórica de la viga en centro de masa cuando se aplica todo el peso sobre el eje débil (\bar{Z}_o), esta relación tendrá que ser mayor o igual a tres (3) para evitar efectos de pandeo lateral.

$$FS = \frac{Y_r}{\bar{Z}_o} \geq 3 \quad EC. 1$$

Algunos de los métodos para aumentar el factor de seguridad consisten en desplazar el eje de balanceo, aumentado el módulo de elasticidad o modificando la posición de los puntos de elevación, este último incluso al moverlo una pequeña distancia del extremo, puede mejorar drásticamente la estabilidad de la flexión lateral. No sólo porque se reduce la deflexión en aproximadamente la cuarta potencia de la luz neta, sino que \bar{Z}_o se mejora aún más, ya que el peso en los extremos que sobresalen está en el lado opuesto del eje de balanceo (T. J. Stratford, 1999).

Otra manera de aumentar el factor de seguridad de la estabilidad lateral consiste en elevar el eje de balanceo “ Y_r ” o aumentar el módulo de elasticidad, incrementando el valor de $f'c$ dado que el módulo depende de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del concreto, este cambio sólo supone una ligera mejora de la estabilidad lateral, adicionalmente pueden añadirse arriostramientos, sin embargo, este método es uno de los menos eficaces, por último, es posible aumentar el factor de seguridad al modificar la sección transversal de la viga.

METODOLOGÍA

Desde la etapa de diseño se deben considerar los efectos del pandeo lateral que podrían presentarse durante el proceso de izado de las vigas de puentes, para esto el diseñador estructural deberá emplear una metodología de análisis que le permita determinar o cuantificar la resistencia de la viga ante un posible evento de pandeo; las metodologías más comunes en la literatura determinan la resistencia al pandeo en función de la geometría del elemento y a las características de resistencia de los materiales de construcción, definiendo los criterios mínimos que deben tener en cuenta para dicha evaluación, sin embargo, la normativa vigente para nuestro país (Norma Colombiana de Diseño de Puente LRFD CCP14), no describe una la metodología para la evaluación de la estabilidad lateral, lo que implica que debemos adoptar procedimientos de diseño propuestas por diferentes autores en otros países.

Los vacíos normativos y la necesidad de encontrar una metodología valida que permita evaluar con cierta certeza la estabilidad de un elemento pretensado al momento del izado, es uno de los motivos por los cuales los diseñadores optan por emplear procedimientos de diseño desarrollados por algunos autores, centrándose principalmente en la metodología desarrollada por (George Laszlo, 1987), la cual, ha sido mejorada y/o complementada a lo largo del tiempo por otros autores, sin embargo, se sigue conservando los principios básicos asociados a la resistencia de materiales.

La estabilidad e integridad de los elementos estructurales es un factor importante a tener en cuenta durante la construcción de todo tipo de infraestructura, siendo este el motivo principal que lleva a realizar un análisis de la teoría desarrollada para la evaluación de la estabilidad desde un punto de vista bibliográfico, mostrando de manera general un procedimiento con el cual se verifica la estabilidad de una viga en concreto pretensado al momento del izado.

El procedimiento analítico empleado para evaluar la estabilidad lateral presta especial atención a la localización de los puntos de elevación y al peralte o altura de la viga, toda vez que al tratarse de vigas de gran longitud estas variables juegan un papel importante en la estabilidad de la misma. Es de anotar que la integridad de la viga también se puede ver afectada durante el transporte del elemento al lugar de instalación, sin embargo, nos centraremos en analizar el procedimiento que usa comúnmente para diseñar la estabilidad lateral de la viga durante la manipulación por el izado.

La manera de evaluar la estabilidad lateral de la viga de concreto pretensado durante su manipulación, según la metodología analizada es mediante la determinación de un factor de seguridad que relaciona la deflexión teórica del elemento con la posición del centro de gravedad respecto al eje de balanceo, con lo cual, si se alcanza el valor mínimo aceptable se considera entonces que el diseño es adecuado, en caso contrario, se deberán realizar los ajustes correspondientes por parte del diseñador estructural que le permitan alcanzar dichos valores.

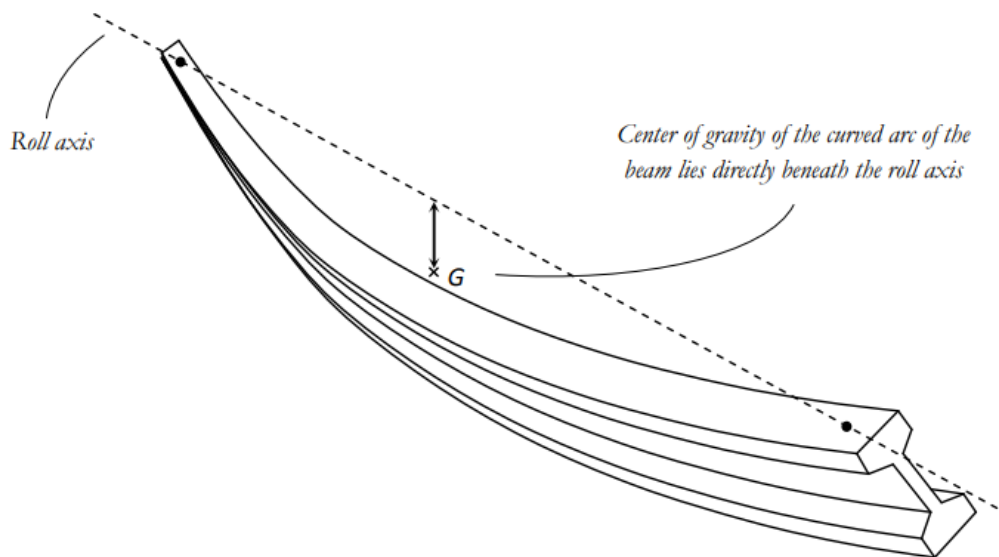
CAUSAS DE COLAPSO DE VIGAS EN EL IZADO

Una causa común del colapso de las vigas pretensadas durante su manipulación en el izado está asociada a un ligero cambio en la posición del centro de gravedad por desbalanceo, esto provoca que la componente por peso propio genere una deflexión lateral desplazando aún más el centro de gravedad, generando mayor componente y mayor deflexión, si la viga cuenta con rigidez suficiente podrá mantener una posición una posición de equilibrio, caso contrario ocurre cuando la viga no cuenta con rigidez lateral suficiente desarrollando un aumento progresivo en la deflexión lateral que finalmente provoca su colapso.

En la siguiente figura se ilustra el desbalanceo generado por el cambio en la posición de centro de gravedad de una viga pretensada durante el izado.

Figura 3

Desplazamiento del centro de gravedad de una viga pretensada durante el izado.



Nota. Fuente LATERAL STABILITY ANALYSIS OF LONG PRECAST PRESTRESSED CONCRETE BEAMS (German, 2015)

Es necesario determinar la posición de equilibrio de la viga bajo la posible condición de falla provocada por el desplazamiento del centro de gravedad de la viga para determinar la resistencia al pandeo lateral, para esto se debe analizar la condición final de la viga en la cual se genera el equilibrio.

HIPÓTESIS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD LATERAL

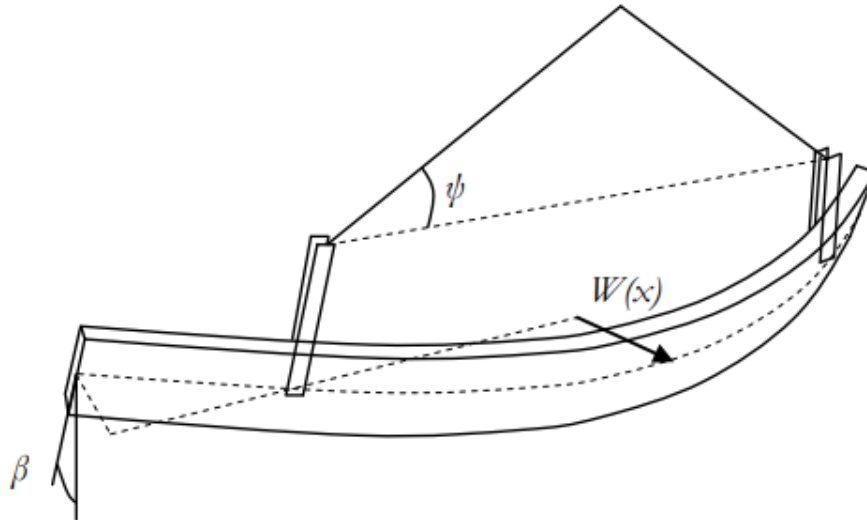
La formulación de las ecuaciones de equilibrio que permiten determinar la capacidad lateral en de una viga pretensada en el eje débil consideran algunas suposiciones con respecto al comportamiento estructural de la viga, entre las que se encuentran las siguientes (German, 2015):

- Se considera que la viga no se deforma por flexión ni por torsión alrededor de su eje mayor. Sin embargo, es libre de doblarse alrededor de su eje menor y de volcarse como un cuerpo rígido.
- Se supone que los yugos están conectados rígidamente a la viga.
- La viga está sometida a una carga lateral t por unidad de longitud, que se aplica a una distancia r por debajo de los puntos de unión Yugo cable. Se supone que t actúa paralelamente a la dirección del eje principal de la viga cuando ésta gira.
- La viga tiene una pequeña imperfección inicial $\delta(x)$ que varía como una única media onda sinusoidal a lo largo de la longitud de la viga, pero desplazada de manera que δ es cero (0) en los puntos de fijación del yugo.
- Se supone que la desviación del eje menor W es pequeña en comparación con la longitud de la viga.
- La viga permanece linealmente elástica en todo momento con propiedades de sección fijas. El análisis no trata de estudiar el comportamiento de la viga después de que se produzca la fisuración.
- No se tienen en cuenta las cargas laterales del viento ya que, por lo general, el levantamiento se realizaba cuando las cargas de viento no son significativas

En la siguiente figura se presenta un esquema con la configuración de la viga deflectada bajo los supuestos definidos anteriormente.

Figura 4

Desplazamiento del centro de gravedad de una viga pretensada durante el izado.



Nota. Fuente LATERAL STABILITY ANALYSIS OF LONG PRECAST PRESTRESSED CONCRETE BEAMS (German, 2015)

NORMATIVIDAD VIGENTE

Se toman como referencias algunas normas internaciones que contienen regulaciones respecto a la resistencia y estabilidad de la estructura en todas las etapas de construcción desde la fabricación del elemento hasta la puesta en servicio de la estructura. En particular se tienen en cuenta los requerimientos planteados por la normativa española EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural, el Eurocodigo y el PCI Bridge Design Manual.

La normativa española EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural establece los límites o tolerancias que deberán tener las vigas prefabricadas en concreto pretensadas en cuanto a las flechas laterales medidas desde el plano vertical que contiene a la viga de la siguiente manera:

- La deflexión o flecha lateral durante la fabricación de la viga en concreto pretensado no podrán exceder $L/750$, con el fin de controlar los efectos de pandeo lateral.

El Eurocodigo por su parte establece que cuando no se tenga certeza o seguridad de la estabilidad lateral de la viga se deberán realizar las respectivas comprobaciones mediante un método adecuado, sin embargo, deberán cumplirse con algunos requisitos para considerarse adecuada, dichos requisitos se relacionan a continuación (4.3.5.7 Eurocode):

$$l_{ot} < |50|bf$$

$$h < |2.5|bf$$

Donde:

bf: Ancho del ala de compresión.

h: Profundidad total de la viga.

lot: Longitud del ala de compresión medida entre apoyos laterales.

El manual de diseño de puentes PCI (PCI Bridge Design Manual) establece por su parte una tolerancia por unidad de longitud para el pandeo lateral durante la etapa de construcción y define además un factor de seguridad mínimo que se debe garantizar ante el fallo, este manual adopta la metodología de (Mast, 1989).

- El PCI especifica una tolerancia de barrido de 3,2 mm por cada 3 m de longitud de la viga.
- El PCI en la sección 8.10 sugiere un factor de seguridad mínimo de 1.50 ante el fallo de las vigas izadas.

Es evidente que los códigos de diseño vigentes carecen de suficiente orientación sobre el tema de la estabilidad de las vigas prefabricadas de hormigón pretensado durante el levantamiento (German, 2015), en nuestro caso la normativa vigente CCP-14 no establece los requisitos que se deben tener en cuenta para la evaluación de la estabilidad lateral de las vigas de concreto pretensadas durante su manipulación para el izado.

Algunos autores proporcionaron un método global para estudiar la respuesta (fuerzas internas, momentos, deflexiones y ángulos de rotación) de la viga curva levantada por dos cables. La mayoría de ellos pueden aplicarse tanto para la torsión uniforme como para la no uniforme. Estos también mencionan que la ubicación de los puntos de elevación desempeña un papel importante en la determinación del ángulo de balanceo y las deformaciones de la viga, por ejemplo, si los puntos de elevación se sitúan alrededor de $1/5L$ hacia el interior de los extremos de la viga, el ángulo de balanceo y el ángulo de torsión serían muy pequeños. Esto también se demostró en el trabajo de Peart, como se ha mostrado anteriormente. Sin embargo, debido a las limitaciones de la fisuración, esta ubicación de los yugos de elevación no es práctica en la construcción.

No se consideró la carga lateral del viento ya que, por lo general, el levantamiento y/o izado de las vigas se realiza cuando las cargas de viento no son significativas. Por último, destacaron la importancia de predecir el comportamiento de la viga durante la construcción. La razón principal era que las tensiones y deformaciones máximas de una viga curva pueden producirse durante la

fase de izado. En la siguiente tabla se relacionan algunos de los autores que han presentado metodologías para determinar la estabilidad lateral de las vigas.

Tabla 1 Investigación sobre estabilidad lateral de vigas bajo fases transitorias.

Year	Type	Main considerations	Outcomes	Authors
1962	Analytical study	-torsional -boundary conditions -lifting positions	A model for calculating the critical vertical loads for precast members during handling and placing	Muller
1987	Analytical study	-lifting positions -plant handling -field handling	Different safety factors for different handling phases were defined. Practical ways of enabling the stability of girders by using external materials were proposed.	Laszlo and Imper
1989	Analytical study with physical model	-initial sweep -camber -lifting positions	A model for evaluating the lateral stability in terms of the safety factor.	Mast
1992	Analytical study with differential equations	- precamber - support types	The influence of precamber to the buckling load of girder with flexible supports	Peart
2000	Analytical study with both finite model and analytical model	- inclined or vertical cables - inclined or vertical lifting yokes - lateral loads - initial imperfections	Methods for predetermining the buckling load, the buckling mode, the load-deflection path of imperfect beams	Stratford and Burgoyne

Nota. Fuente Lateral Stability of Long Precast Prestressed Concrete Girders During Transient Load Situations (Zhang, 2017).

METODOLOGÍA DE CÁLCULO

La metodología para determinar la estabilidad lateral de una viga pretensada fue desarrollada por (Mast, 1989) y consiste en determinar la deflexión lateral generada sobre el eje débil en el centro de gravedad, haciendo.

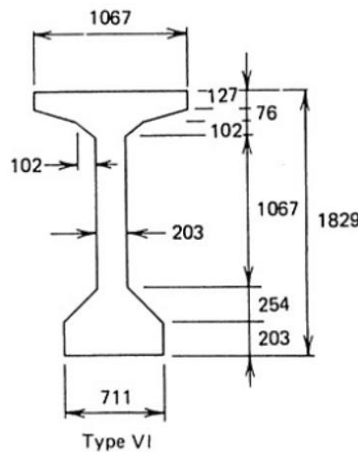
A modo práctico se evaluará la estabilidad lateral de una viga pretensada AASHTO de sección I tipo VI con resistencia a la compresión del concreto de 49 MPa y una luz de 40 m, las propiedades geométricas de la sección y sus dimensiones se encuentran definidas a continuación:

Propiedades geométricas viga tipo VI AASHTO			
Área de la sección	A	7.00E-01	m ²
Inercia respecto a eje fuerte	I _y	3.05E-01	m ⁴
Inercia respecto a eje débil	I _z	2.56E-02	m ⁴
Distancia del CG a la parte superior	Y _t	9.05E-01	m
Distancia del CG a la parte inferior	Y _b	9.24E-01	m

La metodología de diseño empleada para el desarrollo del ejercicio está basada en el artículo de la revista Prestressed Concrete Institute Journal del año 2009 (Richard Brice, 2009).

Figura 5

Sección transversal Viga I tipo VI



1. Determinar el peso propio de la viga

Para determinar el peso propio correspondiente a la viga basta con determinar el volumen de concreto de la misma y multiplicarlo por el peso específico del concreto ($\gamma_c = 24 \text{ kN/m}^3$).

Longitud $L = 35 \text{ m}$

Área sección $A = 0.7 \text{ m}^2$

$$W_c = A * L * \gamma_c = 0.70 \text{ m}^2 * 40 \text{ m} * 24 \text{ kN/m}^3 = 672 \text{ kN}$$

El peso por metro lineal de la viga es:

$$W_c = A * \gamma_c = 0.70m^2 * 24kN/m^3 = 16.8kN/m$$

2. Establecer los puntos de soporte para el izado

Para la viga se considera que los puntos de izado se encuentran localizados a una distancia de 2.0 m medidos desde los bordes de la viga.

Donde:

a : Posición de los puntos de izado (2.0m)

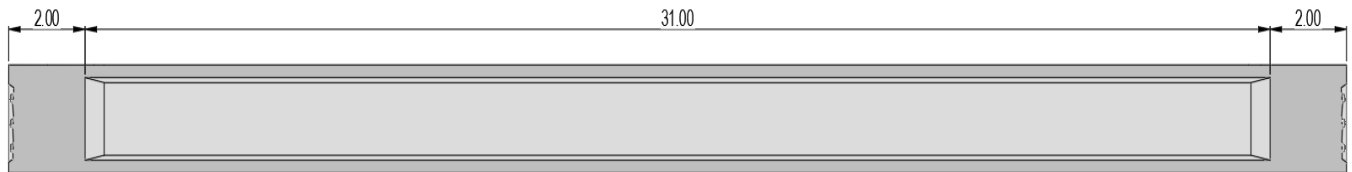
l_1 : Distancia entre puntos de izado (36 m)

$$a = 2.0m$$

$$l_1 = L - 2a = 36 m$$

Figura 6

Sección longitudinal de viga de estudio



3. Chequeo de esfuerzos por manipulación

Los esfuerzos producidos en la viga de concreto están asociados al peso propio del elemento y a las cargas de pretensado que actúan sobre la viga. El máximo esfuerzo a compresión producido en la sección esta dado por la siguiente ecuación:

$$f_b = -\frac{P}{A} - \frac{Pe_h}{S_b} + \frac{M_g}{S_b}$$

$$f_t = -\frac{P}{A} + \frac{Pe_h}{S_t} - \frac{M_g}{S_t}$$

Donde:

f_b : Esfuerzo en la fibra inferior en punto de inflexión de cable

f_t : Esfuerzo en la fibra superior en punto de inflexión de cable

P : Fuerza de pretensado en la sección considerada inmediatamente después de la transferencia (10,000 kN).

e_h : Excentricidad de la fuerza de pretensado en el punto de inflexión del cable (0.65m).

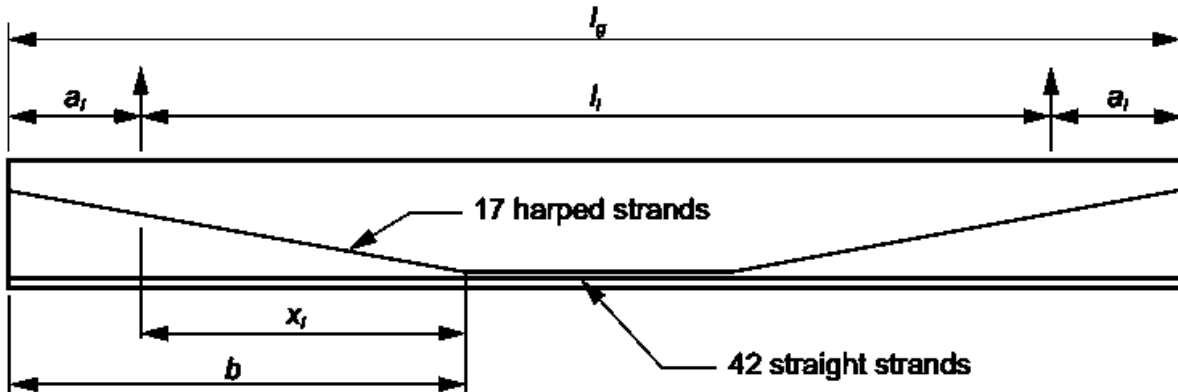
A : Área de la sección transversal (0.70 m²).

M_g : Momento por carga muerta.

S_b : Modulo de sección

Figura 7

Esquema de viga con cables de preesfuerzo.



En la figura se presenta el trazado del cable considerado para el ejercicio, además de algunas de las variables geométricas consideradas para el análisis de la estabilidad lateral de la viga durante el izaje.

$$M_g = \frac{W_c}{2} (l_1 x - x^2 - a^2)$$

Donde:

W_c : Carga distribuida por peso propio de viga (16.8 kN/m).

M_g : Momento por peso propio en el punto de inflexión de los cables de pre-esfuerzo.

a : Longitud desde el extremo de la viga al apoyo (2.0 m).

$$M_g = \frac{16.8 \text{ kN/m}}{2} ((36 \text{ m} * 14 \text{ m}) - (14 \text{ m})^2 - (2.0 \text{ m})^2)$$

$$M_g = 2553.6 \text{ kN.m}$$

El módulo de sección se determina como:

$$S_b = \frac{I_y}{Y_b} = \frac{0.305 \text{ m}^4}{0.924 \text{ m}} = 0.3301 \text{ m}^3$$

$$S_t = \frac{I_y}{Y_t} = \frac{0.305 \text{ m}^4}{0.905 \text{ m}} = 0.3371 \text{ m}^3$$

El esfuerzo en la fibra inferior a compresión es igual a:

$$f_b = -\frac{10,000 \text{ kN}}{0.70 \text{ m}^2} - \frac{10,000(0.65 \text{ m})}{0.3301 \text{ m}^3} + \frac{2553.6 \text{ kN.m}}{0.3301 \text{ m}^3}$$

$$f_b = -26.0 \text{ MPa}$$

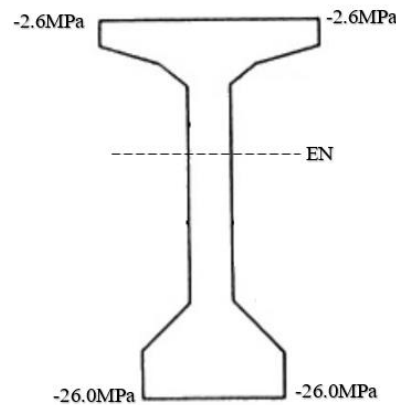
El esfuerzo en la fibra superior a compresión es igual a:

$$f_t = -\frac{10,000 \text{ kN}}{0.70 \text{ m}^2} + \frac{10,000(0.65 \text{ m})}{0.3371 \text{ m}^3} - \frac{2553.6 \text{ kN.m}}{0.3371 \text{ m}^3}$$

$$f_b = -2.6 \text{ MPa}$$

Figura 8

Esfuerzos en las fibras extremas de la viga



La resistencia admisible a la compresión del concreto según la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 en la tabla 5.9.4.2.1-1 es de:

$$f_b = 0.6 f'_c$$

Por lo que la resistencia requerida para que el concreto soporte los esfuerzos transmitidos es de:

$$f'_c = \frac{f_b}{0.6} = \frac{26 \text{ MPa}}{0.6} = 43 \text{ MPa}$$

Se requiere una resistencia del concreto de 43 MPa, por lo cual se considera como resistencia de diseño 49 MPa.

4. Excentricidad inicial del centro de gravedad de la viga

Para verificar la estabilidad lateral de la viga pretensada se requiere inicialmente determinar la excentricidad inicial del centro de gravedad de la viga desde el eje de balanceo mediante la siguiente ecuación.

$$e_i = e_{sw} F_{of} + e_{lt}$$

Donde:

e_i : Excentricidad inicial del centro de gravedad de la viga desde el eje de balanceo

e_{sw} : Tolerancia de deflexión de la viga por unidad de longitud (2mm por cada 3m)

F_{of} : Factor de desplazamiento que determina la distancia entre el eje de balanceo y el centro de gravedad del arco de una viga curva.

e_{lt} : Tolerancia lateral para la colocación de los dispositivos de elevación (0.25" o 6.35mm)

$$F_{of} = \left(\frac{l_1}{L}\right)^2$$

Donde:

l_1 : Distancia entre dispositivos de elevación (36m).

L : Longitud de la viga (40m).

$$F_{of} = \left(\frac{36m}{40m}\right)^2 = 0.81$$

$$e_{sw} = \left(\frac{2mm}{3m}\right) * 40m = 0.0267m$$

La excentricidad inicial es igual a:

$$e_i = 26.7mm * 0.81 + 6.35mm$$

$$e_i = 27.95mm = 0.028m$$

5. Cálculo de deflexiones

Inicialmente se calcula de deflexión por peso propio de la viga considerando una condición de apoyo simple en los extremos, por tanto:

$$\Delta_{sw} = \frac{-w_c L^4}{384 E_c I_y}$$

Donde:

W_c : Carga distribuida por peso propio de viga (16.8 kN/m).

E_c : Módulo de elasticidad del concreto de la viga ($4900\sqrt{f'_c}$).

I_y : Momento de inercia de la viga alrededor del eje fuerte ($3.05E-01 \text{ m}^4$).

L : Longitud total de la viga (40.0 m).

En donde el módulo de elasticidad del concreto se determina de acuerdo con el artículo 5.4.2.4 de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes LRFD CCP-14.

$$E_c = 0.043 K_1 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c}$$

Donde:

K_1 : Factor de corrección para fuente de agregado (1.0).

w_c : Densidad del concreto en 2400 kg/m^3 .

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto (49 MPa).

$$E_c = 0.043(1.0)(2400 \text{ kg/m}^3)^{1.5} \sqrt{42 \text{ MPa}}$$

$$E_c = 35390 \text{ MPa}$$

Por tanto, la deflexión por peso propio es de:

$$\Delta_{sw} = \frac{-(16.8kN/m)(40m)^4}{384(35390228kN/m^2)(0.305m^4)} = -10.4mm$$

Deflexión hacia arriba debido al pretensado:

$$\Delta_{ps} = \frac{Pe_e L^2}{8E_c I_y} + \frac{Pe'}{E_c I_y} \left(\frac{L^2}{8} - \frac{b^2}{6} \right)$$

Donde:

Δ_{ps} : Deflexión hacia arriba debido al postensado en la viga.

P : Fuerza de pre esfuerzo en el centro de la luz se considera $P = 9,800$ kN.

b : Longitud desde el borde de viga hasta el punto de inflexión (16 m).

e' : Cambio de la excentricidad entre el punto de inflexión y el extremo de la viga.

e_e : Excentricidad del área total del acero de pretensado en el extremo de la viga (0.0).

$$e' = e_h - e_e$$

$$e_e = 0.0m$$

$$e' = 0.65m$$

Por tanto,

$$\Delta_{ps} = \frac{9800kN(0.65m)}{(35390228kN/m^2)(0.305m^4)} \left(\frac{(40m)^2}{8} - \frac{(16m)^2}{6} \right)$$

$$\Delta_{ps} = 92.8 mm$$

Deflexión adicional hacia arriba debida al voladizo de la viga más allá de los puntos de elevación:

$$\Delta_{wcs} = \frac{w_c a L^3}{16E_c I_y}$$

Donde:

Δ_{wcs} : Deflexión hacia arriba al voladizo.

W_c : Carga distribuida por peso propio de viga (16.8 kN/m).

a : Longitud desde el extremo de la viga al apoyo (2.0 m).

$$\Delta_{wcs} = \frac{(16.8kN/m)(2.0m)(40m)^3}{16(35390228kN/m^2)(0.305m^4)}$$

$$\Delta_{wcs} = 12.5mm$$

Deflexión total:

$$\Delta = \Delta_{sw} + \Delta_{ps} + \Delta_{wcs}$$

$$\Delta = -10.4\text{mm} + 92.8\text{mm} + 12.5\text{mm}$$

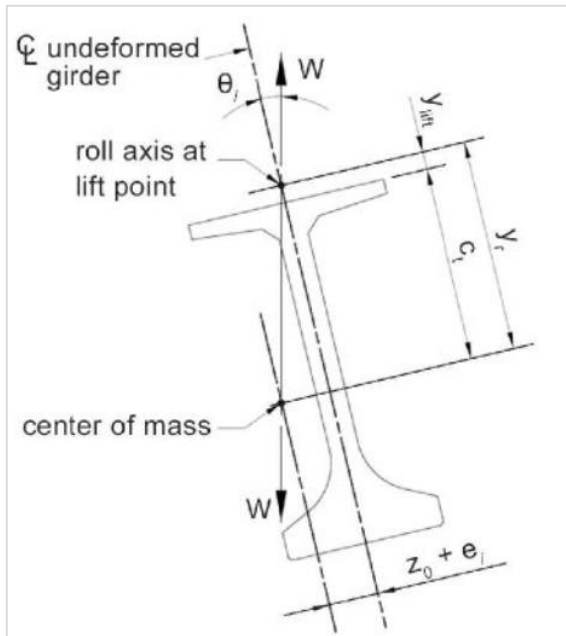
$$\Delta = 94.9\text{mm}$$

6. Cálculo de desviación lateral

Para determinar la desviación lateral teórica de la viga se debe considerar el siguiente esquema:

Figura 9

Esquema de equilibrio de fuerzas en viga postensada.



Nota. Fuente Sweep in Precast, Prestressed Concrete Bridge Girders—Part II (Russell, 2019).

Cálculo de altura de eje de balanceo

La altura desde el centro de gravedad de la viga al centro o eje de balanceo está dado por la siguiente ecuación:

$$y_r = y_t - \Delta F_{of}$$

Donde:

y_r : Altura desde el centro de gravedad de la viga al centro o eje de balanceo.

y_t : Altura desde la parte superior de la viga hasta el centroide de la sección (0.905m).

F_{of} : Factor de desplazamiento que determina la distancia entre el eje de balanceo y el centro de gravedad del arco de una viga curva.

Δ : Deflexión total de la viga.

$$y_r = 0.905 - (0.095) * 0.81$$

$$y_r = 0.828\text{m}$$

La altura desde el centro de gravedad hasta el eje de balanceo de la viga durante el izado es de 0.83m.

Calculo de deflexión lateral en el centro de gravedad de la viga

La deflexión en el centro de la luz para una viga con apoyos ubicados a una distancia “a” desde el extremo de la viga se determina como:

$$\bar{Z} = \frac{W_c}{12E_c I_z L} \left[\frac{l_1^5}{10} - a^2 l_1^3 + 3a^4 l_1 + \frac{6a^5}{5} \right]$$

Donde:

W_c : Carga distribuida por peso propio de viga (16.8 kN/m).

E_c : Modulo de elasticidad del concreto de la viga ($4900\sqrt{f'_c}$).

I_z : Momento de inercia de la viga alrededor del eje débil ($2.56E-02 \text{ m}^4$).

L : Longitud total de la viga (40.0 m).

l_1 : Longitud entre apoyos de la viga (36.0 m).

a : Longitud desde el extremo de la viga al apoyo (2.0 m).

$$x = \left[\frac{(36\text{m})^5}{10} - (2.0\text{m})^2(36\text{m})^3 + 3(2.0\text{m})^4(36.0\text{m}) + \frac{6(2.0\text{m})^5}{5} \right] =$$

$$x = 5861760.0 \text{ m}^5$$

$$\bar{Z} = \frac{16.8 \text{ kN/m} (5861760.0 \text{ m}^5)}{12(35390228 \text{ kN/m}^2)(2.56 \times 10^{-2} \text{ m}^4)(40\text{m})}$$

$$\bar{Z} = 0.23\text{m}$$

La deflexión en la luz central por el peso propio de la viga es de 23 cm.

7. Calculo de ángulos de inclinación de la viga

Ángulo de balanceo inicial de una viga

El ángulo de balanceo inicial de la viga se determina en función de la excentricidad inicial de la viga y la altura desde el centro de gravedad al eje de balanceo de la siguiente manera:

$$\tan \theta_i \approx \theta_i = \frac{e_i}{y_r}$$

Donde:

θ_i : ángulo de balanceo inicial de la viga.

e_i : Excentricidad inicial del centro de gravedad de la viga desde el eje de balanceo (27.95 mm)

y_r : Altura desde el centro de gravedad de la viga al centro o eje de balanceo (0.828m).

$$\theta_i = \frac{0.028\text{m}}{0.828\text{m}} = 0.0338 \text{ rad}$$

Ángulo de inclinación en el que empieza la fisuración

El ángulo de inclinación de la viga en el cual empieza la fisuración del concreto se determina como:

$$\theta_{max} = \frac{M_{lat}}{M_g}$$

Donde:

θ_{max} : Ángulo de inclinación de la viga en el que empieza la fisuración del concreto.

M_{lat} : momento de flexión lateral de la viga en el momento de la fisuración.

M_g : Momento por peso propio en el punto de inflexión de los cables de pre-esfuerzo.

$$M_{lat} = \frac{2(f_r + f_t)I_z}{b_t}$$

Donde:

f_r : Módulo de rotura del concreto $0.62\sqrt{f'_c}=4.34\text{MPa}$ – Art 5.4.2.6 CCP-14.

f_t : Esfuerzos en el ala superior de la viga 2.6 MPa.

I_z : Momento de inercia de la viga alrededor del eje débil ($2.56\text{E-}02\text{ m}^4$).

b_t : Ancho del ala superior (1067mm).

$$M_{lat} = \frac{2(4340\text{kN/m}^2 + 2600\text{kN/m}^2)(0.0256\text{m}^4)}{(1.067\text{m})} = 333.0\text{ kN}\cdot\text{m}$$

Por tanto,

$$\theta_{max} = \frac{333.0\text{ kN}\cdot\text{m}}{2553.6\text{ kN}\cdot\text{m}}$$

$$\theta_{max} = 0.13\text{ rad}$$

8. Calculo de factor de seguridad contra la fisuración

El factor de seguridad ante la fisuración del concreto se determina a partir de la siguiente ecuación (Mast, 1989):

$$FS_f = \frac{1}{\frac{\bar{z}}{y_r} + \frac{\theta_i}{\theta_{max}}} > 1.0$$

Donde:

FS_f : Factor de seguridad ante la fisuración del concreto (>1.0).

\bar{Z} : Deflexión lateral en el centro de la luz.

y_r : Altura desde el centro de gravedad de la viga al centro o eje de balanceo (0.828m).

θ_i : ángulo de balanceo inicial de la viga.

θ_{max} : Ángulo de inclinación de la viga en el que empieza la fisuración del concreto.

$$FS_f = \frac{1}{\frac{0.23m}{0.828m} + \frac{0.0338 \text{ rad}}{0.13 \text{ rad}}}$$

$$FS_f = 1.86 > 1.0$$

El factor de seguridad ante la fisuración del concreto es de 1.86, por tanto, la viga cumple ante este requerimiento durante el izado, toda vez que el valor obtenido para el factor de seguridad es mayor a 1.0.

9. Calculo del factor de seguridad contra el fallo FS'

El factor de seguridad ante la falla del concreto se determina a partir de la siguiente ecuación (Mast, 1989):

$$FS' = \frac{y_r \theta'_{max}}{\bar{Z}' \theta'_{max} + e_i}$$

Donde:

FS' : factor de seguridad ante la falla del concreto (>1.50)

\bar{Z}' : Deflexión lateral en el centro de la luz calculada utilizando el momento de inercia efectivo para la inclinación ángulo de falla.

y_r : Altura desde el centro de gravedad de la viga al centro o eje de balanceo (0.828m).

θ'_{max} : Ángulo de inclinación de la viga en el que genera la falla en el concreto.

e_i : Excentricidad inicial del centro de gravedad de la viga desde el eje de balanceo (27.95 mm)

$$\theta'_{max} = \sqrt{\frac{e_i}{2.5\bar{Z}'}}$$

Por tanto,

$$\theta'_{max} = \sqrt{\frac{0.028m}{2.5 * 0.23m}} = 0.22 \text{ rad}$$

Donde,

$$\bar{Z}' = \bar{Z}(1 + 2.5\theta'_{max})$$

$$\bar{Z}' = 0.23m(1 + 2.5 * 0.22)$$

$$\bar{z}' = 0.357m$$

El factor de seguridad ante la falla de la viga es igual a:

$$FS' = \frac{0.828m * 0.22}{0.357m * 0.22 + 0.028m}$$

$$FS' = 1.70 > 1.50$$

El factor de seguridad ante la falla del concreto de la viga es de 1.70, por tanto, la viga cumple ante este requerimiento durante el izado, toda vez que el valor obtenido para el factor de seguridad es mayor a 1.5 (Mast, 1989).

IMPERFECCIONES EN VIGAS

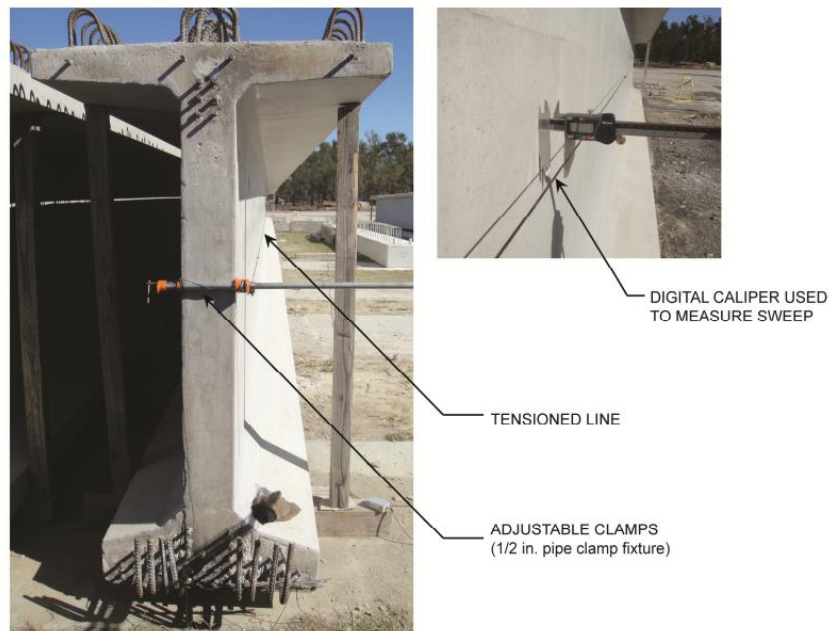
Durante la fabricación de las vigas de concreto postensado se presentan algunas imperfecciones que afectan el comportamiento de elemento durante el proceso de izado, dichas imperfecciones se pueden ser sujeto de revisión y medición antes del proceso de izado, para lo cual se deberán revisar los siguientes aspectos.

Medidas de barrido

Para medir las imperfecciones a lo largo de la viga se realiza un barrido realizando mediciones de deformación, para esto se toma como referencia una línea tensada con anclajes que se sujetan a los extremos de una viga, tal como se indica en la Figura 10. Las mediciones se pueden realizar con un calibrador digital en incrementos de 3 metros a lo largo de la longitud de la viga, tanto para el patín superior e inferior como para el alma de la viga medido en la parte central. Se considera una desviación lateral máxima de 2.0 mm por cada 3m de longitud.

Figura 10

Medidas de barrido en vigas pretensadas.



Nota. Fuente Lifting Analysis of Precast Prestressed Concrete Beams (Cojocarú, 2012).

Revisión de excentricidad de los soportes de elevación.

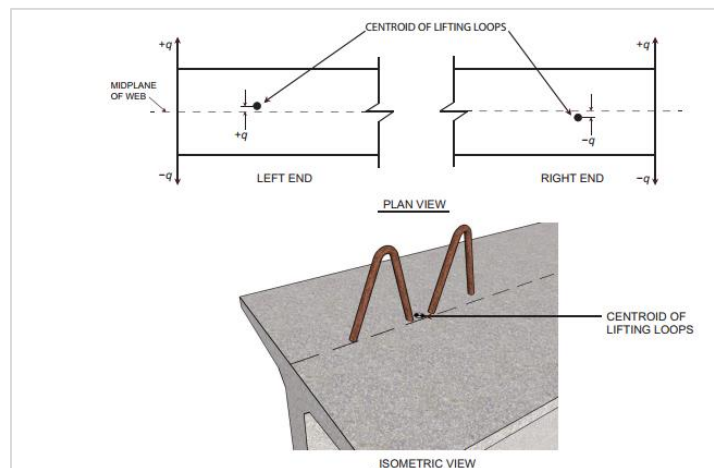
La excentricidad de los soportes de elevación en la viga también influye en el comportamiento de la viga al momento de la elevación e izado de la misma, una ligera variación de su posición con respecto a eje de simetría genera el desplazamiento del centro de gravedad de

la viga y con esto se incrementa el ángulo de rotación inicial que conlleva a la agrietamiento y posterior falla del elemento.

Por lo anterior se debe validar la ubicación de los soportes para el izado, en general se recomienda la posición de estos no tenga una excentricidad mayor a $\frac{1}{4}$ " medidos desde el eje de simetría de la viga. En la siguiente figura se presenta el esquema que describe la ubicación de los soportes de izado de las vigas respecto al plano medio o eje de simetría vertical.

Figura 11

Medidas de excentricidad de los soportes.



Nota. Fuente Lifting Analysis of Precast Prestressed Concrete Beams (Cojocar, 2012).

Disminución de efectos de imperfecciones.

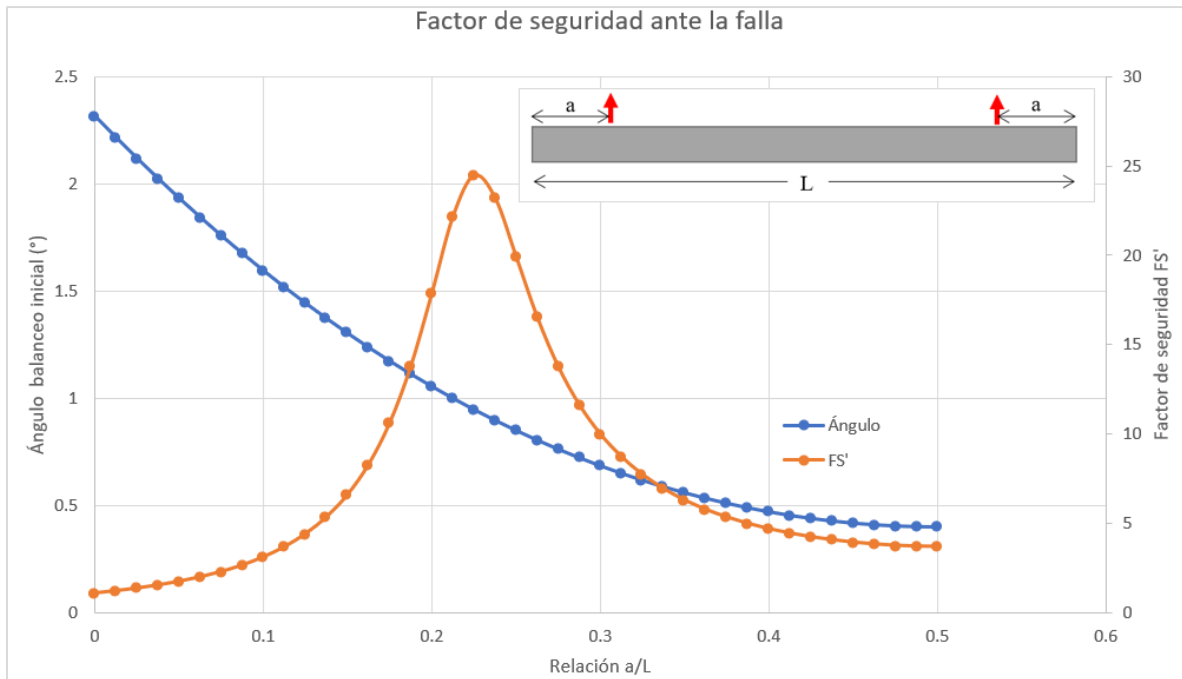
Para mitigar o disminuir los efectos de las imperfecciones de fabricación en la viga que podrían afectar la elevación y transporte se pueden implementar las siguientes alternativas (Russell, 2019):

- Desplazar el lugar de elevación hacia el centro de la viga: Al disminuir la distancia entre los puntos de elevación se aumenta el factor de seguridad, dado que se disminuye el desplazamiento inicial del centro de gravedad de la viga, sin embargo, aumentan los esfuerzos de compresión y tensión.
- Aumentar la altura del punto de elevación.
- Incorporar torones superiores totalmente tensados.
- Proporcionar un refuerzo a lo largo de la viga del puente.

El efecto de desplazar los puntos de elevación en la viga sobre el factor de seguridad de falla se encuentra ilustrado en la siguiente figura:

Figura 12

Factor de seguridad ante la falla en relación con la posición del punto de izado.



Nota. Fuente propia.

En la gráfica se ilustra el factor de seguridad ante la falla lateral de la viga en relación con la posición del punto de izado, es de notar que el factor de seguridad aumenta a medida que desplazan los puntos de elevación hacia el centro, sin embargo, a partir de una relación a/L mayor a 0.23 el factor de seguridad disminuye, por tanto, se deberá limitar dicha relación.

La Figura 12 presenta igualmente el ángulo de balanceo que en función de la distancia a de los soportes de elevación al extremo de la viga. Es evidente que el desplazamiento de los puntos de elevación hacia el interior reduce la rotación de la viga (Herrando, 2015).

LIMITE DE ESFUERZOS EN EL CONCRETO

Si bien durante el proceso de izado la viga debe ser capaz de soportar los esfuerzos producidos por su propio peso, es necesario hacer una revisión exhaustiva del estado de esfuerzos a lo largo del elemento, teniendo en cuenta que durante el izado de la viga se pueden presentar rotaciones en la viga que generan un desplazamiento del centro de gravedad de la viga haciendo que se genere una carga por la componente del peso propio sobre el eje débil.

“En 1991, Mast realizó un ensayo de flexión lateral en una viga I de hormigón pretensado de 149 pies de longitud para investigar el comportamiento de la sección agrietada de las vigas sometidas a cargas laterales (Mast 1994). Según sus conclusiones, la viga de ensayo toleró cargas laterales superiores a la carga teórica de fisuración, sin ningún signo visible de daño una vez retirada la carga lateral (Mast 1994). Sin embargo, como subrayan Swann y Godden (1966), si se permite una sección agrietada durante el levantamiento, se producirá una reducción de la rigidez de la viga, lo que dará lugar a un aumento de las deflexiones y, en consecuencia, aumentará la posibilidad de un fallo de estabilidad catastrófico autopropagado que se produciría con poco o ningún aviso (Swann y Godden 1966). Por lo tanto, tal y como recomiendan Stratford et al. (1999), por razones de seguridad se aconseja no permitir una sección agrietada durante el levantamiento.” (Cojocarú, 2012).

De acuerdo con lo anterior, se hace necesario limitar los esfuerzos de tracción de concreto al módulo de ruptura, con el fin de controlar el agrietamiento de la viga durante el levantamiento o izado, así mismo se deben controlar los esfuerzos de compresión en el concreto de la viga cuidando siempre de que no se excedan los límites permitidos por normativa, la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 limita los esfuerzos de tracción y compresión a los siguientes valores.

Resistencia admisible a la compresión para el concreto:

$$F_C = 0.6f'_c$$

Dado que para ejemplo planteado en el documento se tiene una resistencia de 49 MPa, el esfuerzo límite a compresión en el concreto será de:

$$F_C = 0.6 * 49 \text{ MPa} = 29.4 \text{ MPa}$$

Resistencia admisible a la tracción para el concreto:

La resistencia a esfuerzos tensión en el concreto está limitada por el módulo de rotura del concreto, el cual se estima mediante la siguiente ecuación (Art 5.4.2.6 CCP-14):

$$f_r = 0.62\sqrt{f'_c}$$

Sin embargo, el esfuerzo admisible del concreto ante cargas de tracción para elementos con torones de pre-esfuerzo adheridos es igual a (5.9.4.2.2-1 CCP-14):

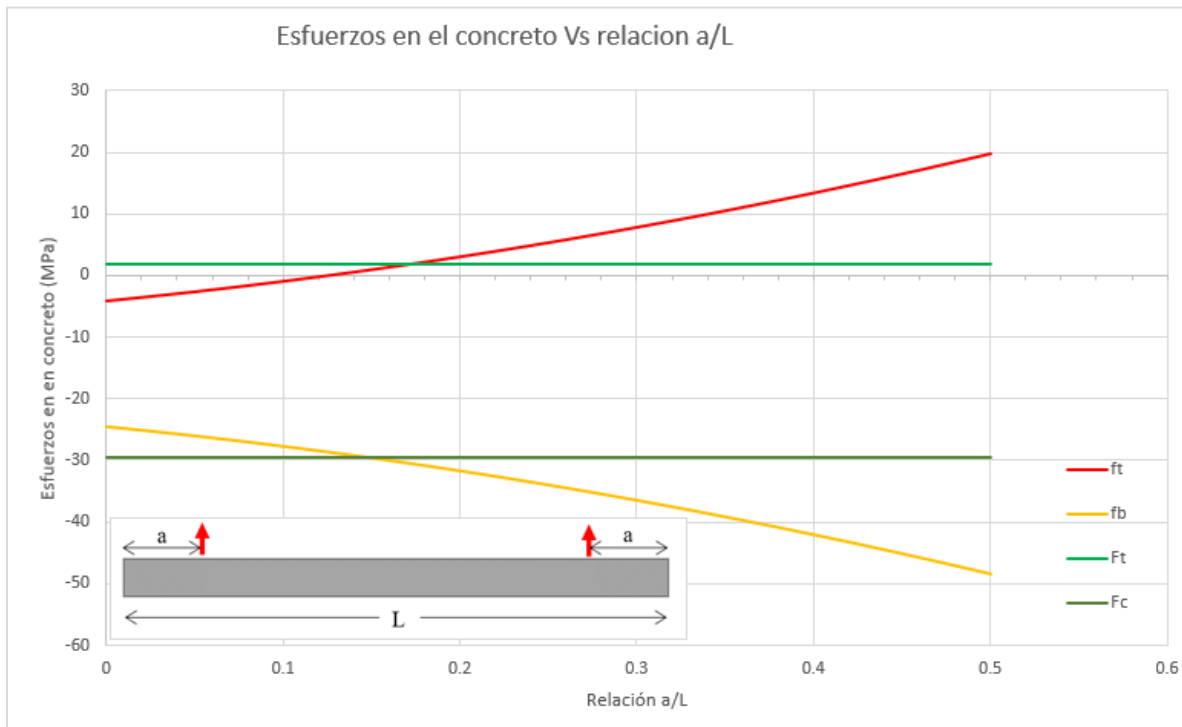
$$F_T = 0.25\sqrt{f'_c}$$

$$F_T = 0.25\sqrt{49\text{MPa}} = 1.75\text{MPa}$$

Se realiza la revisión de esfuerzos en la viga de concreto para el ejercicio planteado en documento, considerando una variación en la posición de los puntos de izado en relación con la longitud total de la viga. En la siguiente figura se presentan los esfuerzos máximos de tracción y compresión producidos en la viga según la relación a/L seleccionada para el diseño.

Figura 13

Esfuerzos en el concreto según la posición de los puntos de soporte.



Nota. Fuente propia.

En el gráfico anterior se presentan los esfuerzos en la viga según la relación entre el punto de soporte o izado y la longitud total del elemento, del gráfico se resalta que para relaciones a/L menores a 0.13 los esfuerzos en la viga se mantienen en los rangos admisibles, por tanto, para el ejercicio planteado la posición del punto de izado no deberá exceder $0.13L$ ($a=5.2$ m), sin embargo, en el ejercicio se tomó la posición de los soportes a 2.0 m, lo cual implica que los esfuerzos en el concreto no superan los esfuerzos admisibles normativos.

Al aumentar la relación a/L se incrementan los esfuerzos de tracción (f_t) y compresión (f_b) en el concreto, por lo cual, se debe seleccionar una relación de longitudes que permita obtener un factor de seguridad adecuado ante la falla ($FS > 1.5$) sin llegar a exceder el esfuerzo admisible a compresión (F_c) y/o a tensión (F_t).

Debido a que el izado de la viga de la viga es una etapa crítica durante la construcción de los puentes vehiculares, se hace necesario analizar el conjunto de variables que intervienen en la estabilidad de la viga de la misma, siendo la selección de los puntos de izado o de elevación uno de los aspectos que cobra gran relevancia, una adecuada selección de este parámetro permitirá obtener factores de seguridad superiores a los mínimos exigidos, además de un adecuado control de esfuerzos en las vigas.

CONCLUSIONES

Las vigas de concreto pretensadas de gran longitud son una buena alternativa al momento de la construcción de puentes vehicular o peatonales, puesto que permiten acelerar la construcción de la superestructura (viga tablero) de una manera más ágil, logrando una disminución el tiempo de ejecución y en los costos de construcción, sin embargo, este tipo de elemento se suelen construir en un lugar diferente al del proyecto, lo que implica que requieran ser transportadas hasta el lugar de instalación, lo cual supone un primer escenario en el que se pueden presentar afectaciones a la capacidad estructural de elemento, posteriormente y una vez que se encuentran en el lugar de instalación requieren ser izadas hasta su posición final en puente, es en este escenario en el que genera un mayor riesgo de falla en las vigas por pandeo lateral, que podría llegar a afectar tanto la viga que se está elevando como los elementos adyacentes, generando un colapsó general por el efecto dominó por la falla de viga cerca a otra.

Las causas más comunes en la falla de vigas de concreto pretensado ocurren durante las maniobras de manipulación de la viga ya sea durante el transporte o durante la elevación o izado de la misma, en cualquiera de estos dos escenarios se pueden producir esfuerzos adicionales en el concreto alrededor del eje débil de la viga que generan una falla lateral del elemento o una afectación grave que se reflejaría en la etapa de servicio y/o operación del puente. Por lo anterior es primordial hacer una evaluación de estos posibles escenarios durante la etapa de diseño a fin de proveer a las vigas de los elementos necesarios que permitan mitigar los posibles esfuerzos, adicionalmente se debe contar además con protocolos claros para el transporte e instalación de este tipo de elementos dada la complejidad de su manipulación, de igual manera es muy importante hacer un adecuado control de calidad de elemento con el fin de reducir al máximo los defectos de fabricación, los cuales se deberán mantener por debajo de los límites admisibles según la normativa vigente que aplique en cada situación.

Las metodologías de análisis que existen en la actualidad para evaluar la estabilidad lateral de una viga pretensada durante el proceso de izado parten de una condición de equilibrio de fuerzas, y permiten considerar las variables relacionadas a la capacidad estructural del elemento, tales como geometría, resistencia de concreto, imperfecciones de construcción, fuerza de postensado entre otras, con lo anterior se pueden determinar los factores de seguridad ante la fisuración y ante la falla, definidos como la relación entre las deflexiones laterales teóricas de la viga en el izado y la distancia entre el centro de gravedad al eje de balanceo. Los criterios mínimos de aceptación para

los factores de seguridad ante el agrietamiento y la falla son de 1.0 y 1.50 respectivamente según el artículo 5.6.3.C.2 del Manual de diseño de puente (Washington State Department of Transportation, 2022).

La Norma Colombiana de Diseño de Puentes LRFD CCP-14 no tiene en su alcance la evaluación de la estabilidad lateral de las vigas de concreto pretensadas cuyo proceso constructivo implique el izado, de manera que para el diseño es necesario apoyarse en normas y manuales internacionales para la evaluación de la estabilidad, entre las que se encuentra el Eurocodigo, EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural y el Bridge Design Manual LRFD, siendo este último el usado para la evaluación de la estabilidad del ejercicio propuesto en el desarrollo del documento.

A modo de ejercicio y con el fin de explicar la metodología de cálculo que se requiere para la evaluación de estabilidad lateral de una viga de concreto pretensado durante el izado o elevación, se presenta en el desarrollo del documento un ejemplo práctico para una viga en I tipo VI (AASHTO) para la cual se calculan los factores de seguridad ante el agrietamiento y ante la falla considerando una condición de preesfuerzo después de pérdidas inmediatas y considerando que las imperfecciones en la viga están en los límites admisibles, para este escenario supuesto de análisis se obtuvieron factores de seguridad satisfactorios toda vez que los resultados encontrados están por encima de los mínimos requeridos, sin embargo, para tener un panorama más amplio del comportamiento del factor de seguridad y de los esfuerzos en el concreto se presentan dos gráficos en el que se muestra la variación de estos dos parámetros en función de la relación a/L (localización de puntos de izaje sobre longitud total), se observa que el factor de seguridad tiende a aumentar hasta una relación de 0.2 para luego disminuir, los esfuerzos por el contrario mantienen una relación directa aumentando a medida que se aumenta la relación a/L , lo cual implica que si bien incrementar la posición de los puntos de izado produce un aumento en el factor de seguridad también incrementa los esfuerzos en el concreto hasta el punto de exceder los esfuerzos admisibles, razón por la cual hacer una adecuada selección del punto de izado puede ayudar a mejorar las condiciones de estabilidad durante el izado. Un ejercicio similar fue realizado por (Albert de la Fuente, 2019) relacionando el ángulo de giro de la viga en el izado.

Al igual que en el diseño se hace un control de los esfuerzos para que estos no superen los máximos admisibles, también se debe hacer un control de calidad de las vigas de concreto pretensados que requieren ser izados o elevados sobre la subestructura del puente, este control implica la revisión de imperfecciones en el concreto, la revisión de la localización de los puntos de

apoyo en relación con el eje de simetría vertical de la viga y la revisión de desviación lateral de la viga tanto en los patines superior e inferior como en la parte central del eje de la viga, debido a que estas variables afectan de manera significativa la estabilidad lateral de la viga, provocando un incremento en la deflexión lateral inicial y con esto una disminución del factor de seguridad que podría generar un posible evento de falla.

REFERENCIAS

- Albert de la Fuente, J. B. (2019). *Lateral stability of prestressed precast concrete girders during lifting: study case*. Catalunya: Springer International Publishing.
- Cojocar, R. (2012). *Lifting Analysis of Precast Prestressed Concrete Beams*. Blacksburg.
- George Laszlo, R. R. (1987). Handling and Shipping of Long Span Bridge Beams. *PCI JOURNAL*, 86-101.
- German, V. H. (2015). LATERAL STABILITY ANALYSIS OF LONG PRECAST PRESTRESSED CONCRETE BEAMS. 34.
- Herrando, G. V. (2015). *LATERAL STABILITY ANALYSIS OF LONG PRECAST PRESTRESSED CONCRETE BEAMS*. Barcelona.
- Mast, R. F. (1989). Lateral Stability of Long Prestressed Concrete Beams. *PCI JOURNAL*, 34 - 53.
- Muller, J. (1962). Lateral Stability of Precast Members During Handling and Placing. *Prestressed Concrete Institute Journal - PCI Journal*, 20-31.
- Richard Brice, B. K. (2009). Design Optimization for Fabrication of Pretensioned Concrete Bridge Girders: An Example Problem. *Prestressed Concrete Institute Journal - PCI Journal*, 73-111.
- Russell, B. W. (2019). Sweep in Precast, Prestressed Concrete Bridge Girders—Part II. *Concrete Bridge Technology* , 38-43.
- T. J. Stratford, B. M. (1999). Stability design of long precast concrete beams. *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, 159-168.
- Washington State Department of Transportation. (2022). *Bridge Design Manual (LRFD)*. Washington D. C.
- Zhang, F. (2017). *Lateral Stability of Long Precast Prestressed Concrete Girders During Transient Load Situations*. Barcelona.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PARA EL DESRROLLO DE LA MONOGRAFÍA																
ACTIVIDAD	Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre			
	Sem 1	Sem 2	Sem 3	Sem 4	Sem 1	Sem 2	Sem 3	Sem 4	Sem 1	Sem 2	Sem 3	Sem 4	Sem 1	Sem 2	Sem 3	Sem 4
Definición tema																
Entrega inicial																
Revisión bibliográfica																
Identificar fuentes																
Recopilación de información																
Filtración información																
Preparación 2a entrega																
Investigación																
Cálculos																
Análisis de resultados																
Elaboración conclusiones																
Elaboración informe final																