

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Análisis Estático de Puentes de Vigas Preesforzadas

Emilia Antonia Andrade Borges

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera Civil

Quito, 8 de mayo de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Análisis Estático de Puentes de Vigas Preesforzadas

Emilia Antonia Andrade Borges

Nombre del profesor, Título académico

**Eva Lantsoght, Ph.D.
Sebastián Castellanos, Ing. (M.Sc.)**

Quito, 8 de mayo de 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Emilia Antonia Andrade Borges

Código: 00130350

Cédula de identidad: 1717094674

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en el análisis de la respuesta estática de puentes de vigas preesforzadas, y es un aporte a la investigación doctoral “Cuantificación de la Incertidumbre en la Evaluación de la Capacidad de Carga de Puentes de Vigas Preesforzadas incluyendo Monitoreo de Salud Estructural”, desarrollada en la Universidad del Valle, Colombia. La problemática que justifica la investigación es el deterioro progresivo de puentes, y la necesidad de determinar su capacidad de carga de manera certera con el fin de garantizar la seguridad de su uso.

La primera parte de esta investigación es un análisis aislado de vigas preesforzadas mediante la predicción de su deflexión, con el objetivo de comparar su respuesta analítica con los resultados de las mediciones experimentales. La segunda parte constituye un análisis global de un puente de vigas preesforzadas, mediante la modelación de la superestructura del puente sobre el río Lili, ubicado en Cali, Colombia, y la determinación de la posición crítica para los vehículos de diseño.

En el análisis de vigas preesforzadas se plantea un modelo lineal mediante ecuaciones analíticas, programado en Matlab, para establecer la comparación con la deflexión obtenida mediante experimentación. Para la modelación del puente objetivo se utiliza el programa SCIA Engineer e información de un levantamiento manual. Debido a la ausencia de planos y especificaciones de diseño del puente objetivo, se aplica variaciones a los parámetros del modelo (módulo de elasticidad de las vigas transversales y rigidez de los neoprenos) para cuantificar la afectación de estos elementos en su comportamiento global.

Entre los resultados principales se destaca que el modelo lineal desarrollado describe adecuadamente el comportamiento de las vigas preesforzadas antes del agrietamiento del hormigón, en relación con su desplazamiento máximo. En la modelación y análisis del puente objetivo, se determina que la combinación que produce la posición crítica, tanto para tándem como para camión de diseño, es la misma, al igual que la viga principal más afectada. También se verifica que las variaciones aplicadas a los parámetros no afectan el orden de magnitud de momento, corte y desplazamiento máximo.

Como principales conclusiones se destaca que el modelo lineal logra explicar el comportamiento de las vigas preesforzadas analizadas, lo que implica un ahorro en tiempo computacional versus modelos no lineales, dentro de su rango de aplicabilidad. En el análisis del puente de vigas preesforzadas, los parámetros escogidos para la variación no afectaron representativamente su respuesta. Los resultados obtenidos de posición crítica indican un rango amplio, tanto en geometría como en valor de carga, para que esta también coincida con la del vehículo utilizado en la prueba de carga de diagnóstico del puente sobre el Río Lili.

Palabras clave: análisis estático, deflexión, puente de viga preesforzadas, modelación de puentes, capacidad de carga, posición crítica, prueba de carga.

ABSTRACT

This study focuses on the analysis of the static response of prestressed girder bridges and is part of the doctoral research “Uncertainty Quantification in Load Capacity Evaluation of Prestressed Girder Bridges including Structural Health Monitoring”, developed at Universidad del Valle, Colombia. The problem surrounding this investigation is the progressive deterioration of bridges, and the necessity to determine their load capacity accurately to guarantee the safety of their use.

The first part of this investigation consists in the analysis of isolated prestressed beams by predicting its deflection, with the aim of comparing its analytical response with experimental measurements. The second part constitutes a global analysis of a prestressed girder bridge, by modeling the superstructure of the bridge over the Lili River, located in Cali, Colombia, and determining the critical position of the design vehicles.

In the analysis of prestressed beams, a linear model developed by analytical equations and programmed in Matlab is proposed to establish a comparison with the deflection obtained by experimentation. To model the bridge, the SCIA Engineer program and information from a manual survey are used. Due to the absence of plans and design specifications for the bridge, variations are applied to certain model parameters (cross – beam elasticity modulus and stiffness of the elastomeric bearings), to quantify the effect of these elements on the overall behavior of the bridge.

The main results show that the developed linear model adequately describes the behavior of the prestressed beams before concrete cracking, in relation to its maximum displacement. In the modeling and analysis of the bridge, it is determined that the combination that produces the critical position, for both tandem and design truck, is the same, as well as its most affected girder. It is also verified that the variations applied to the parameters do not affect the order of magnitude for moment, shear, and displacement.

As main conclusions it is found that the linear model achieves to explain the behavior of the analyzed prestressed beams, which implies a saving in computational time versus non – linear models, within its range of applicability. In the analysis of the prestressed girder bridge, the parameters chosen for the variation do not affect its response representatively. Results regarding the critical position indicate a wide range, in both geometry and load value, so that it also coincides with the vehicle used in the diagnostic load testing of the bridge over Lili River.

Key words: static analysis, deflection, prestressed girder bridge, bridge modeling, load capacity, critical position, load testing.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	12
1.1.	Antecedentes	12
1.2.	Descripción de Proyecto Principal	13
1.3.	Alcance de Proyecto Específico.....	14
1.4.	Objetivos	15
1.4.1.	Objetivo General.....	15
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	15
1.5.	Metodología de Proyecto Específico	15
1.6.	Descripción del Proyecto Específico	16
1.7.	Pregunta de Investigación	17
2.	REVISIÓN DE LITERATURA	17
2.1.	Análisis de Vigas Preesforzadas	17
2.1.1.	Predicción de Deflexión mediante Cálculos Manuales.	17
2.1.1.1.	<i>Ecuaciones para predicción de deflexión.</i>	18
2.1.2.	Análisis Seccional mediante Ecuaciones Analíticas.....	20
2.1.2.1.	<i>Ecuaciones para análisis seccional</i>	22
2.2.	Análisis de Posición Crítica en Puentes de Vigas Preesforzadas	28
2.2.1.	Carga Viva Vehicular de Diseño.	29
2.2.2.	Modelos en Elementos Finitos en Pruebas de Carga en Puentes.....	31
3.	ANÁLISIS ESTÁTICO DE VIGAS PREESFORZADAS	32
3.1.	Descripción de Vigas Preesforzadas.....	32
3.2.	Predicción de Deflexión mediante Ecuaciones Analíticas.....	34
3.3.	Análisis de la Sección Transversal mediante Ecuaciones Analíticas	37

3.4.	Predicción de Deflexión mediante SCIA Engineer	38
3.5.	Análisis de Resultados mediante Cálculos Manuales y Modelación en SCIA	41
3.6.	Resultados Experimentales de Vigas Preesforzadas.....	42
3.6.1.	Instrumentación y Protocolo de Carga.....	43
3.6.2.	Resultados Experimentales Obtenidos.....	45
3.6.3.	Comparación de Resultados Experimentales y por Cálculos Manuales	48
4.	ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS	51
4.1.	Descripción del Puente de Vigas Preesforzadas	52
4.2.	Parámetros del Modelo	53
4.2.1.	Materiales.....	54
4.2.2.	Condiciones de Borde.....	55
4.2.3.	Parámetros de Variación.....	56
4.3.	Modelo Final.....	57
4.4.	Resultados de Análisis de Posición Crítica.....	60
4.4.1.	Camión de Diseño.....	60
4.4.2.	Tándem de Diseño.	66
5.	DISCUSIÓN	67
6.	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	70
7.	CONCLUSIONES	71
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
9.	ANEXOS	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos Preliminares Diagrama Carga vs. Desplazamiento	34
Tabla 2: Cargas Aplicadas - Viga Tipo I # 1	34
Tabla 3: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo I # 1	35
Tabla 4: Desplazamiento Total por Tipo de Viga – Cálculos Manuales	36
Tabla 5: Datos Preliminares Diagrama Momento vs. Curvatura	37
Tabla 6: Información Preliminar de Modelo Lineal en SCIA Engineer	39
Tabla 7: Restricciones en Apoyos – Modelo de Viga.....	40
Tabla 8: Cargas Aplicadas y Resultados de Desplazamiento - SCIA Engineer	41
Tabla 9: Comparación de Resultados - Cálculos Manuales y Modelo en SCIA Engineer.....	42
Tabla 10: Carga Viva por Ciclo	45
Tabla 11: Diferencia (%) entre Rigidez Experimental de Ciclo 1 y Rigidez Teórica	51
Tabla 12: Materiales de Modelo Lineal de Puente	54
Tabla 13: Información de Material - Hormigón de 35 MPa	54
Tabla 14: Información de Material - Hormigón de 28 MPa	55
Tabla 15: Restricciones en Apoyos - Modelo de Puente	55
Tabla 16: Parámetros de Variación Cuantitativos - Modelo de Puente.....	57
Tabla 17: Valores de Parámetros de Variación según Protocolo.....	59
Tabla 18: Posición Crítica y Valor Máximo Asociado	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama Carga vs. Desplazamiento Lineal - Esquema	20
Figura 2: Curva Esfuerzo vs. Deformación para acero de Mattock	21
Figura 3: Curva Esfuerzo vs. Deformación para hormigón de Thorenfeldt	22
Figura 4: Diagrama Momento vs. Curvatura - Esquema	28
Figura 5: Camión de Diseño	30
Figura 6: Esquema de Aplicación de Cargas	33
Figura 7: Aplicación de Cargas en Ensayo	33
Figura 8: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo I # 1	35
Figura 9: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo I # 1	38
Figura 10: Modelo en SCIA Engineer - Viga Tipo 1	39
Figura 11: Eje de Coordenadas de los Apoyos	40
Figura 12: Desplazamiento Máximo - Viga Tipo I # 1	41
Figura 13: Instrumentación de Vigas Preesforzadas	43
Figura 14: Protocolo de Carga	44
Figura 15: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo I # 1	46
Figura 16: Rigidez Secante Experimental	47
Figura 17: Degradación de Rigidez Secante Experimental	47
Figura 18: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo I # 1	48
Figura 19: Porcentaje de Diferencia Desplazamiento Potenciómetro 5 y 7	49
Figura 20: Porcentaje de Diferencia Desplazamiento Experimental vs. Modelo Lineal	50
Figura 21: Ubicación de Puente sobre Río Lili	53
Figura 22: Eje de Coordenadas de Apoyos	56
Figura 23: Modelo Final - Puente	57
Figura 24: Posición de Camión de Diseño - Momento Máximo	58

Figura 25: Posiciones para Momento Máximo	62
Figura 26: Posiciones para Corte Máximo.....	63
Figura 27: Parámetros en Corte Máximo - Rigidez de Neopreno	64
Figura 28: Parámetros en Corte Máximo - Módulo de Elasticidad Vigas Transversales	65

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Para predecir la respuesta ante condiciones de operación y en algunos casos no previstas, el diseño estructural y revisión de puentes dispone de métodos analíticos, modelos y programas de cómputo, mediante los cuales se representa el comportamiento de sus elementos estructurales a diferentes solicitaciones. Los modelos matemáticos permiten representar el comportamiento estructural ante diferentes escenarios que podrían presentarse en función del tipo de material, cargas, geometrías y ante la ocurrencia de eventos adversos (sismos, deslizamientos, asentamientos, etc.).

En estructuras existentes, los modelos numéricos permiten evaluar la capacidad de respuesta ante escenarios que no fueron considerados en su diseño, sobre todo en relación con condiciones de carga viva excesiva o por el deterioro progresivo de los materiales.

El deterioro progresivo de infraestructura vial es un problema latente en la actualidad, que se ve reflejado en las cifras disponibles de varios países. En el caso de Estados Unidos, se registra que el 9% de sus puentes se encuentran en estado estructural deficiente; igualmente, un análisis realizado en 2000 puentes en Colombia arrojó un 28% de estructuras con daños significativos, y 4% con daños graves y riesgo de colapso (U.S. Department of Transportation, 2016) (Muñoz & Gómez, 2011). En el caso de Ecuador, a pesar de que no se conocen cifras oficiales, reportes sobre el deterioro visible y colapso de puentes indican que la problemática se hace presente (El Universo, 2020) (El Universo, 2010). Debido a que los puentes, al igual que otras obras de infraestructura, deben garantizar seguridad en su uso, la evaluación de la capacidad de carga de estas estructuras es una necesidad latente en la actualidad.

El presente Proyecto Específico está relacionado con la investigación doctoral (Proyecto Principal) “*Cuantificación de la Incertidumbre en la Evaluación de la Capacidad de Carga de Puentes de Vigas Preesforzadas incluyendo Monitoreo de Salud Estructural*”, que está ejecutando Sebastián Castellanos, candidato a doctor de la Universidad del Valle de Colombia. La investigación del comportamiento de las vigas preesforzadas se justifica por el considerable porcentaje de puentes con estas estructuras que existe en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia (Castellanos, 2019).

Este informe corresponde al Proyecto Específico ya indicado, y se enfoca principalmente en el análisis de la respuesta estática de puentes de vigas preesforzadas; el alcance, objetivos y la metodología utilizada se describen en detalle en las siguientes secciones.

1.2. Descripción de Proyecto Principal

El Proyecto Principal, que integra el Proyecto Específico objeto de este documento, tiene como título “*Cuantificación de la Incertidumbre en la Evaluación de la Capacidad de Carga de Puentes de Vigas Preesforzadas incluyendo Monitoreo de Salud Estructural*”, y constituye una investigación doctoral que está llevando a cabo Sebastián Castellanos, estudiante de la Universidad del Valle - Colombia, y cuenta con el apoyo del Grupo de Investigación en Ingenierías Sísmicas, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7), de la misma universidad.

El estudiante de doctorado Castellanos colabora con la profesora Eva Lantsoght, de la Universidad San Francisco de Quito, y la suscrita, Emilia Andrade Borges, a través del presente Proyecto Específico derivado del Proyecto Principal.

El objetivo general del Proyecto Principal es cuantificar la incertidumbre que existe al realizar la evaluación de la capacidad de carga de los puentes con vigas preesforzadas,

integrando tres elementos: el ajuste de modelos analíticos, las pruebas de carga y el monitoreo de salud estructural (Castellanos, 2019).

El Proyecto Principal comprende varias etapas, entre las cuales cabe destacar las siguientes: el desarrollo de modelos estructurales, tanto de vigas como de puentes de vigas preesforzadas, en donde se aplica la variación de diferentes parámetros para determinar la influencia de estas variables en la capacidad de carga de los elementos analizados; la identificación de los parámetros más influyentes en la estimación de la capacidad de carga, cuantificar su incertidumbre, y estimar el nivel de incertidumbre total; la determinación de la capacidad de carga de vigas preesforzadas mediante modelos ajustados con información experimental y monitoreo de salud estructural; y, la realización de una prueba de carga a un puente en servicio, mediante modelos analíticos con el propósito de evaluar la confiabilidad de la capacidad de carga calculada.

1.3. Alcance de Proyecto Específico

El presente Proyecto Específico se enmarca de forma general en el Proyecto Principal, cuyas etapas se describieron en la *sección 1.1* de este informe, y las principales actividades desarrolladas constituyen las siguientes:

- Análisis seccional y estimación de la deflexión de las vigas preesforzadas;
- Comparación entre la estimación de deflexión con los resultados de las mediciones experimentales;
- Modelación de la superestructura del puente sobre el Río Lili (para ubicación ver *sección 4.1*); y,
- Determinación de la posición crítica de la carga generada por los vehículos de diseño (ver *sección 2.2.1*), y su respuesta asociada.

Los resultados obtenidos corresponden a cálculos manuales, programación en Matlab, y a la aplicación del programa SCIA Engineer (MathWorks, 2020) (Nemetschek Group, 2019).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General.

Evaluar la respuesta estática de vigas preesforzadas y la distribución de esfuerzos en un puente de vigas preesforzadas.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Contrastar la respuesta estática de las vigas preesforzadas, obtenida mediante ecuaciones analíticas con la información experimental disponible;
- Desarrollar un modelo en elementos finitos del puente objetivo, planteando la variación de parámetros de diseño que no están suficientemente documentados;
- Establecer la posición crítica y respuestas (corte y momento) asociadas, de los vehículos de diseño.

1.5. Metodología de Proyecto Específico

La metodología utilizada comprende la ejecución de las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica (incluye el alcance del Proyecto Principal);
- Definición del contenido, objetivos y alcance del Proyecto Específico;
- Acopio y revisión de la información de base (información de vigas ensayadas, puente objetivo, resultados experimentales);
- Análisis estático de vigas preesforzadas (análisis seccional, predicción de deflexión, modelación, etc.);
- Análisis estático de puentes de vigas preesforzadas (modelación y posición crítica); y,
- Análisis y síntesis de resultados.

1.6. Descripción del Proyecto Específico

El presente documento, el cual constituye el Proyecto Específico se desarrolla en 8 capítulos, e incluye un anexo como numeral 9, mismos que se detallan a continuación.

En el capítulo 1 se presenta la introducción, que consta de antecedentes, descripción del Proyecto Principal, el alcance del Proyecto Específico, sus objetivos, metodología y la descripción de su contenido.

El capítulo 2 incluye la revisión de la literatura, que incluye los métodos para el análisis seccional y la obtención de la respuesta estática de vigas preesforzadas, la información de la normativa vigente en cuanto a la carga vehicular de diseño, y la aplicación de modelos en elementos finitos para las pruebas de carga en puentes.

El capítulo 3 se enfoca en el análisis estático de vigas preesforzadas, integra el análisis seccional y la predicción de deflexión de las vigas mediante cálculos numéricos, la modelación de estas, y la comparación de la respuesta estática con las mediciones experimentales disponibles. El análisis seccional es un método no lineal, por lo que se desarrollaron modelos de hormigón y acero de preesfuerzo para realizarlo. El cálculo numérico para predecir la deflexión de las vigas preesforzadas es lineal, al igual que el análisis del modelo en el software SCIA Engineer (Nemetschek Group, 2019).

El capítulo 4 comprende el análisis estático de un puente de vigas preesforzadas, y consta de la construcción del modelo lineal en elementos finitos del puente objetivo, y de la obtención de la posición crítica con los vehículos de diseño.

Por último, los capítulos 5, 6 y 7 contienen la discusión, conclusiones y recomendaciones del trabajo presentado, y el capítulo 8 integra la bibliografía utilizada.

El anexo que se presenta como numeral 9 comprende en su orden varios anexos, con tablas, gráficas, figuras, y demás información que en conjunto soportan o son resultados generados en este Proyecto Específico.

1.7. Pregunta de Investigación

Con base en lo expuesto anteriormente, surge la pregunta de investigación: ¿Cuál es el comportamiento y la distribución de esfuerzos del puente de vigas preesforzadas sobre el río Lili ante cargas de diseño, y de vigas preesforzadas aisladas ensayadas en laboratorio ante esfuerzos dentro del rango lineal?

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Análisis de Vigas Preesforzadas

2.1.1. Predicción de Deflexión mediante Cálculos Manuales.

El procedimiento utilizado para la predicción de la deflexión es el método aproximado propuesto por Arthur Nilson (1987). Las suposiciones que sustentan este método, al igual que su validez para el caso de análisis, se enlistan a continuación:

- El valor del preesfuerzo aplicado se conoce con determinada precisión: todo el proceso de aplicación de la fuerza de postensado en las vigas fue monitoreado y medido, por lo que el valor real es conocido;
- El hormigón no presenta fisuras: la carga máxima aplicada para la obtención de la respuesta será la equivalente a la que genera el Momento de Agrietamiento del Hormigón M_{cr} , ya que a partir de allí la linealidad ya no se cumple; y,
- Los materiales solo son sometidos a esfuerzos dentro de su rango elástico: para mantener la validez de la linealidad en la predicción, la carga aplicada teóricamente no produce esfuerzos en los materiales que tengan como consecuencia deformaciones permanentes.

El método utiliza la superposición, la cual considera la deflexión provocada por la carga muerta y viva como un cálculo en un miembro a flexión general, y en el caso del preesfuerzo, la deflexión se obtiene a partir de cargas equivalentes (Nilson, 1987). Las ecuaciones utilizadas se enumeran a continuación, al igual que la explicación de las respectivas variables.

2.1.1.1. Ecuaciones para predicción de deflexión.

Ecuación 1: Módulo de Elasticidad (American Concrete Institute, 2014).

E_c : Módulo de Elasticidad del Hormigón; y,

f_c : Resistencia a Compresión del Hormigón [MPa].

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \quad (1)$$

Ecuación 2: Momento de Inercia de la Sección.

I_c : Inercia bruta de la sección;

b : Base de la sección; y,

h : Altura de la sección.

$$I_c = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

Ecuación 3: Deflexión por carga muerta.

Δ_o : Deflexión por carga muerta;

w : Carga distribuida equivalente a peso propio;

l : Luz libre de la viga;

E_c : Módulo de elasticidad del hormigón; y,

I_c : Inercia bruta de la sección.

$$\Delta_o = \frac{5wl^4}{384E_cI_c} \quad (3)$$

Ecuación 4: Deflexión por carga viva puntual simétrica respecto al centro de la luz.

Δ_L : Deflexión por carga viva;

a : Distancia desde el apoyo hasta el punto de aplicación de carga;

Pv : Carga viva aplicada;

E_c : Módulo de elasticidad del hormigón;

I_c : Inercia bruta de la sección; y,

l : Luz libre de la viga.

$$\Delta_L = \frac{Pv a}{24E_c I_c} (3l^2 - 4a^2) \quad (4)$$

Ecuación 5: Deflexión por preesfuerzo - Cable Parabólico.

Δ_{pe} : Deflexión por preesfuerzo;

P : Fuerza efectiva de preesfuerzo;

e : Excentricidad del cable, medido desde el eje neutro de la sección;

l : Luz libre de la viga;

E_c : Módulo de elasticidad del hormigón; y,

I_c : Inercia bruta de la sección.

$$\Delta_{pe} = -\frac{5}{48} \frac{Pe l^2}{E_c I_c} \quad (5)$$

Ecuación 6: Deflexión por preesfuerzo - Cable Recto con excentricidad e .

Δ_{pe} : Deflexión por preesfuerzo;

P : Fuerza efectiva de preesfuerzo;

e : Excentricidad del cable, medido desde el eje neutro de la sección;

l : Luz libre de la viga;

E_c : Módulo de elasticidad del hormigón; y,

I_c : Inercia bruta de la sección.

$$\Delta_{pe} = -\frac{1}{8} \frac{P e l^2}{E_c I_c} \quad (6)$$

La deflexión total se obtiene al sumar la deflexión por carga muerta (*ecuación 3*), por carga viva (*ecuación 4*) y por preesfuerzo (*ecuación 5*). En el caso del diagrama Carga vs. Desplazamiento, este se construye mediante el incremento progresivo del valor de la carga viva aplicada. En la *figura 1* se muestra de manera esquemática la forma esperada del diagrama Carga vs. Desplazamiento dentro del rango lineal.

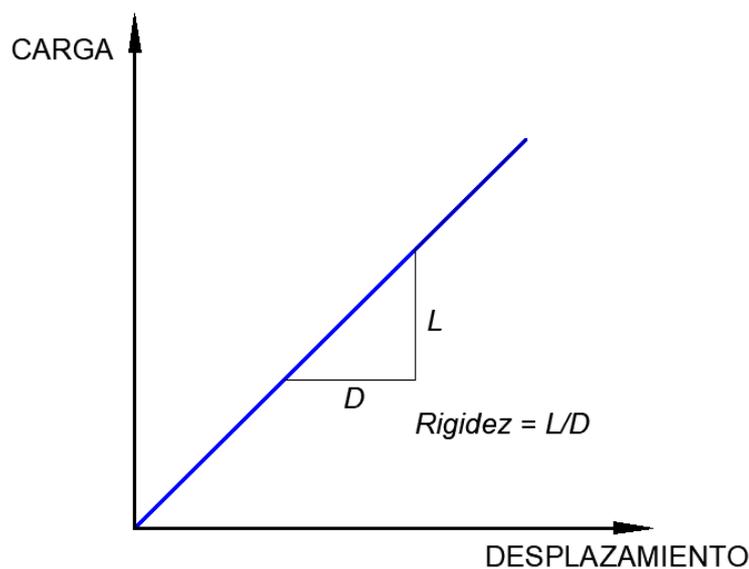


Figura 1: Diagrama Carga vs. Desplazamiento Lineal - Esquema

De este análisis se espera obtener el desplazamiento máximo de las 6 vigas preesforzadas analizadas, ante cargas que generen comportamientos dentro del rango elástico de los materiales, al igual que el diagrama Carga vs. Desplazamiento lineal correspondiente.

2.1.2. Análisis Seccional mediante Ecuaciones Analíticas.

El análisis seccional de un elemento estructural implica, tanto a nivel lineal como no lineal, un estudio de la capacidad de la sección. Por lo tanto, no depende de las cargas externas a las cuales el elemento analizado será sometido. El objetivo principal del análisis seccional

aplicado es la obtención del diagrama Momento vs. Curvatura, y el procedimiento utilizado es propuesto por Edward Nawy (2010). Como pasos preliminares, necesarios para realizar el cálculo, se plantearon las curvas esfuerzo vs. deformación para el acero utilizado (1860 MPa o 270 ksi) y el hormigón (35 MPa o 5 ksi). En el caso del acero de alta resistencia, se utilizó el modelo propuesto por Mattock en 1979, junto con la suposición de una relación entre el esfuerzo de fluencia y esfuerzo último f_{py}/f_{pu} de 0.90 (American Concrete Institute, 2014) (Skogman, Tadros, & Grasmick, 1988) (Mattock, 1979). La curva esfuerzo vs. deformación obtenida se muestra en la *figura 2*.

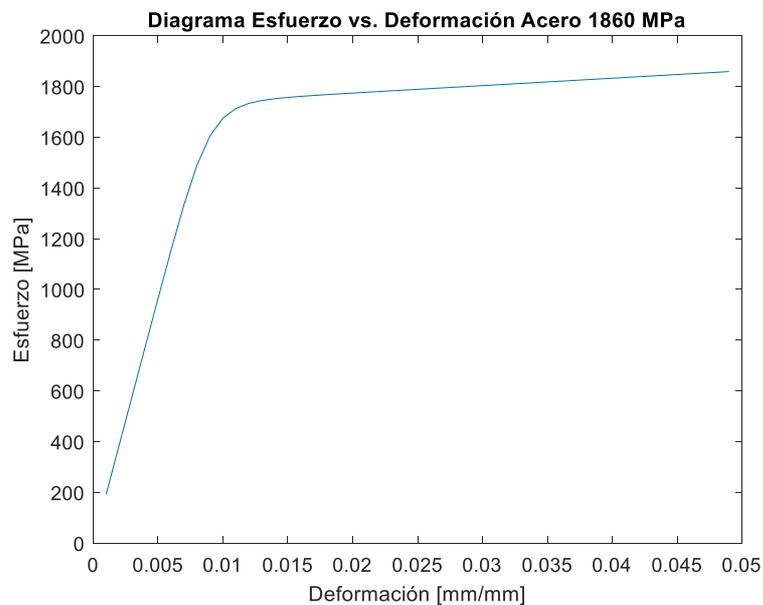


Figura 2: Curva Esfuerzo vs. Deformación para acero de Mattock (1979)

Para el hormigón, se utilizó el modelo desarrollado por Thorenfeldt, cuyo resultado para la resistencia especificada se muestra en la *figura 3* (1987).

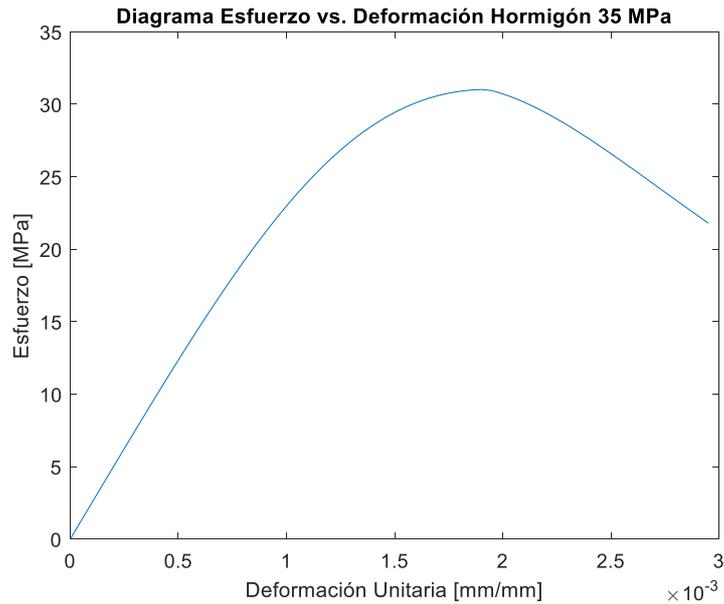


Figura 3: Curva Esfuerzo vs. Deformación para hormigón de Thorenfeldt (1987)

Las ecuaciones utilizadas en el método se presentan en la sección a continuación.

2.1.2.1. Ecuaciones para análisis seccional

Ecuación 7: Esfuerzo causado por fuerza de pretensado en zona superior de la sección.

Ecuación 8: Esfuerzo causado por fuerza de pretensado en zona inferior de la sección.

f_T/f_B : Esfuerzo causado por fuerza de pretensado

P_i : Fuerza de pretensado aplicada;

A_c : Área de sección de hormigón;

e_c : excentricidad de cable, medida desde el eje neutro de la sección;

c_t/c_b : centroide de la sección de hormigón, medida desde la fibra superior/inferior; y,

r^2 : radio de giro.

$$f_T = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{e_c c_t}{r^2} \right) \quad (7)$$

$$f_B = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e_c c_b}{r^2} \right) \quad (8)$$

Ecuación 9: Deformación debido a fuerza de pretensado en zona superior de la sección.

Ecuación 10: Deformación debido a fuerza de pretensado en zona inferior de la sección.

$\epsilon_c^t/\epsilon_c^b$: Deformación debido a fuerza de pretensado superior/inferior;

f_T/f_B : Esfuerzo causado por fuerza de pretensado; y,

E_c : Módulo de Elasticidad del Hormigón.

$$\epsilon_c^t = \frac{f_T}{E_c} \quad (9)$$

$$\epsilon_c^b = \frac{f_B}{E_c} \quad (10)$$

Ecuación 11: Curvatura

ϕ : Curvatura;

$\epsilon_c^t/\epsilon_c^b$: Deformación debido a fuerza de pretensado; y,

h : Altura de la sección.

$$\phi = \frac{\epsilon_c^b - \epsilon_c^t}{h} \quad (11)$$

Ecuación 12: Corrección de deformación por pérdidas de fuerza de pretensado en zona superior de sección.

Ecuación 13: Corrección de deformación por pérdidas de fuerza de pretensado en zona inferior de sección.

$\epsilon_{c-red}^t/\epsilon_{c-red}^b$: Deformación superior/inferior corregida por pérdidas;

P_e : Fuerza de pretensado efectiva;

f_T/f_B : Esfuerzo causado por fuerza de pretensado;

P_i : Fuerza de pretensado aplicada; y,

E_c : Módulo de Elasticidad del Hormigón.

$$\epsilon_{c-red}^t = \frac{P_e}{P_i} \frac{f_T}{E_c} \quad (12)$$

$$\epsilon_{c-red}^b = \frac{P_e}{P_i} \frac{f_B}{E_c} \quad (13)$$

Ecuación 14: Deformación por descompresión.

$\epsilon_{descomp}$: Deformación por descompresión;

ϵ_{c-red}^b : Deformación corregida por pérdidas;

$h_{b\ efec}$: Altura de triángulo inferior en distribución de deformaciones, restada la distancia entre la fibra inferior al refuerzo; y,

h_b : Altura de triángulo inferior en distribución de deformaciones.

$$\epsilon_{descomp} = \epsilon_{c-red}^b \frac{h_{b\ efec}}{h_b} \quad (14)$$

Ecuación 15: Deformación por esfuerzo efectivo de pretensado.

ϵ_{pe} : Deformación por esfuerzo efectivo de pretensado;

f_{pe} : Esfuerzo efectivo de pretensado; y,

E_{ps} : Módulo de elasticidad de Acero.

$$\epsilon_{pe} = \frac{f_{pe}}{E_{ps}} \quad (15)$$

Ecuación 16: Esfuerzo efectivo de acero de preesfuerzo.

f_{pe} : Esfuerzo efectivo de acero de preesfuerzo;

P_e : Fuerza de pretensado efectiva; y,

A_{ps} : Área de acero de preesfuerzo.

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A_{ps}} \quad (16)$$

Ecuación 17: Deformación total.

$\epsilon_{pe\ total}$: Deformación total;

$\epsilon_{descomp}$: Deformación por descompresión; y,

ϵ_{pe} : Deformación por esfuerzo efectivo de pretensado.

$$\epsilon_{pe\ total} = \epsilon_{descomp} + \epsilon_{pe} \quad (17)$$

Ecuación 18: Fuerza de preesfuerzo ajustada.

$P_{e \text{ ajustado}}$: Fuerza de preesfuerzo ajustada;

$f_{pe \text{ total}}$: Preesfuerzo correspondiente a $\epsilon_{pe \text{ total}}$; y,

A_{ps} : Área de acero de preesfuerzo.

$$P_{e \text{ ajustado}} = f_{pe \text{ total}} \cdot A_{ps} \quad (18)$$

Ecuación 19: Esfuerzo por Descompresión.

$f_{descomp}$: Esfuerzo de descompresión;

$\epsilon_{descomp}$: Deformación por descompresión; y,

E_c : Módulo de Elasticidad de Hormigón.

$$f_{descomp} = \epsilon_{descomp} E_c \quad (19)$$

Ecuación 20: Momento por Descompresión.

$M_{descomp}$: Momento por descompresión;

$f_{descomp}$: Esfuerzo de descompresión;

I_c : Inercia bruta de la sección; y,

e_c : excentricidad de cable, medida desde el eje neutro de la sección.

$$M_{descomp} = f_{descomp} \frac{I_g}{e_c} \quad (20)$$

Ecuación 21: Esfuerzo provocado por el momento de descompresión.

f^t : Esfuerzo provocado por el momento de descompresión;

$M_{descomp}$: Momento por descompresión; y,

S_t : Módulo de sección elástico superior.

$$f^t = \frac{M_{descomp}}{S_t} \quad (21)$$

Ecuación 22: Esfuerzo de ruptura.

f_r : Esfuerzo de ruptura; y,

$f'c$: Resistencia a la compresión de hormigón.

$$f_r = 0.62\lambda\sqrt{f'c} \quad (22)$$

Ecuación 23: Momento de agrietamiento.

M_{cr} : Momento de agrietamiento;

S_b : Módulo de sección elástico inferior;

$f'c$: Resistencia a la compresión de hormigón;

P_e : Fuerza de pretensado efectiva;

A_c : Área de sección de hormigón;

e_c : excentricidad de cable, medida desde el eje neutro de la sección;

c_t/c_b : centroide de la sección de hormigón, medida desde la fibra superior/inferior; y,

r^2 : radio de giro.

$$M_{cr} = S_b \left[7.5 \lambda \sqrt{f'c} + \frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{e_c c_b}{r^2} \right) \right] \quad (23)$$

Ecuación 24: Variación en deformación para una deformación ε .

$\Delta \epsilon_{ps}$: Variación en deformación para una deformación ε ;

h_{efec} : Altura de la sección desde la fibra superior hasta la ubicación del acero de preesfuerzo;

c : centroide de la sección de hormigón; y,

ε : Deformación planteada para el cálculo de curvatura en sección agrietada.

$$\Delta \epsilon_{ps} = \frac{(h_{efec} - c)}{c} \varepsilon \quad (24)$$

Ecuación 25: Deformación del acero de preesfuerzo.

ϵ_{ps} : Deformación del acero de preesfuerzo;

$\Delta \epsilon_{ps}$: Variación en deformación para una deformación ϵ ; y ,

$\epsilon_{pe\ total}$: Deformación total.

$$\epsilon_{ps} = \Delta \epsilon_{ps} + \epsilon_{pe\ total} \quad (25)$$

Ecuación 26: Fuerza de Tensión en Acero de Preesfuerzo.

T_p : Fuerza de Tensión en Acero de Preesfuerzo;

f_{ps} : Esfuerzo correspondiente a la deformación ϵ_{ps} ; y ,

A_{ps} : Área de acero de preesfuerzo.

$$T_p = f_{ps} A_{ps} \quad (26)$$

Ecuación 27: Fuerza de Compresión en Hormigón.

C_c : Fuerza de Compresión en Hormigón;

c : centroide de la sección de hormigón;

b : Base de la sección; y ,

f_c : Resistencia a la compresión del hormigón a una deformación ϵ .

$$C_c = c. b. f_c \quad (27)$$

Con base en las ecuaciones mostradas anteriormente, es posible obtener el diagrama Momento vs. Curvatura, el cual se muestra de manera esquemática en la *figura 4*. En la figura se incluyen las 6 etapas calculadas por el método incluido en la referencia (Nawy, 2010).

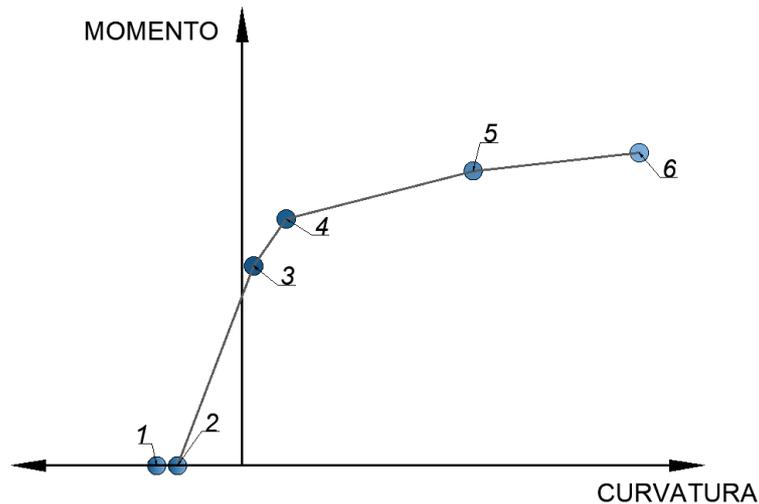


Figura 4: Diagrama Momento vs. Curvatura - Esquema

Las etapas indicadas en el diagrama anterior son las siguientes:

- 1) Etapa de transferencia de preesfuerzo;
- 2) Etapa de transferencia de preesfuerzo después de pérdidas;
- 3) Etapa de descompresión;
- 4) Etapa de módulo de ruptura;
- 5) Etapa de sección agrietada con deformación en el hormigón de 0.001 mm/mm; y,
- 6) Etapa de sección agrietada con deformación en el hormigón de 0.003 mm/mm.

Es importante destacar que las etapas 5 y 6 constan de procesos iterativos para converger hacia la solución.

2.2. Análisis de Posición Crítica en Puentes de Vigas Preesforzadas

Para realizar el análisis de la posición crítica es importante revisar la normativa aplicable, y con base en ello determinar las cargas a considerar. Como se indicó anteriormente (ver descripción del proyecto), el puente analizado está ubicado en Cali - Colombia, por lo que la normativa que rige el diseño de puentes es la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14, creada por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS (2014). Es importante

recalcar que el puente analizado fue diseñado y construido bajo el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes 1995; sin embargo, las cargas consideradas en este análisis corresponden a la norma vigente.

2.2.1. Carga Viva Vehicular de Diseño.

La carga viva vehicular total consiste en la combinación del camión o tándem de diseño y la carga de carril de diseño (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2014). En el caso del carril de diseño, el número de carriles se obtiene dividiendo el ancho libre de la calzada para el ancho normado de carril, el cual es 3600 mm (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2014). La carga de carril de diseño consiste en una carga uniformemente distribuida de 10.3 kN/m en la dirección longitudinal del puente, y transversalmente distribuida en un ancho de 3000 mm (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2014).

Por otro lado, la geometría y carga que representa el camión de diseño se muestra en la *figura 5*. El espaciamiento entre los dos ejes de 160 kN debe ser variado entre el rango especificado para encontrar el efecto más crítico. El tándem de diseño consiste en un par de ejes de 125 kN separados 1200 mm entre sí, y con espaciamiento transversal de ruedas de 1800 mm. El área de contacto con la llanta se supondrá como un rectángulo de ancho 500 mm y longitud 250 mm (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2014).

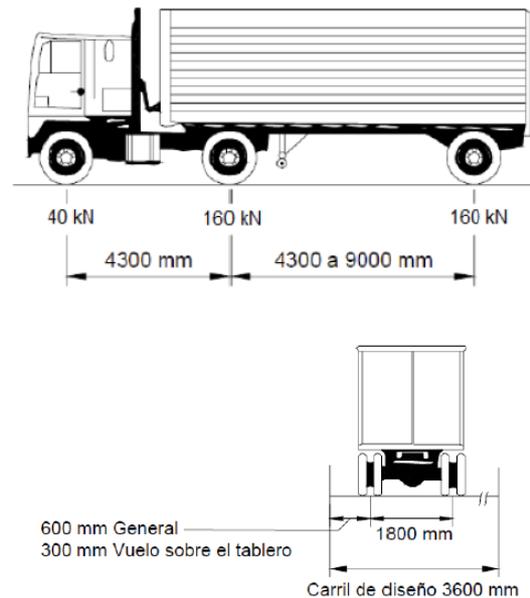


Figura 5: Camión de Diseño. Fuente: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2014.

El efecto extremo a considerar será el mayor de los 3 casos expuestos a continuación

(Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2014):

- El efecto del tándem de diseño y la carga de carril de diseño;
- El efecto del camión de diseño con el espaciamiento variable entre los dos ejes de 160 kN, y la carga de carril de diseño; y,
- En el caso de la reacción en los apoyos internos, aplicable a vigas continuas, el efecto a considerar será el mayor entre:
 - a) 100% del efecto de dos camiones espaciados un mínimo de 15 m entre el primer eje de un camión y el último eje del siguiente, sumado el 100% del carril del diseño.
 - b) 100% del efecto de dos camiones de diseño espaciados entre 8 y 12 m entre el primer eje de un camión y el último eje del siguiente, sumado el 100% del carril de diseño.

2.2.2. Aplicación de Modelos en Elementos Finitos para Pruebas de Carga en Puentes.

Las pruebas de carga en puentes constituyen un método que permite evaluar el desempeño de estas estructuras, especialmente en casos donde los métodos analíticos no brindan respuestas certeras sobre su comportamiento (Transportation Research Board, 2019). Estas pruebas o ensayos se pueden categorizar en dos grupos: las pruebas de carga de diagnóstico; y, las pruebas de carga de capacidad. La principal diferencia entre estos dos tipos de ensayo es el valor de carga aplicado. Mientras que las pruebas de diagnóstico involucran fracciones de la carga viva de diseño, las pruebas de capacidad utilizan la totalidad de la carga viva requerida por los códigos (Transportation Research Board, 2019).

Las pruebas de carga de diagnóstico permiten medir respuestas reales de una estructura ante cargas conocidas, para calibrar modelos analíticos que permitan a su vez predecir la respuesta ante cargas mayores (Lantsoght, 2017) (Wang & Zhang, 2020). Los resultados obtenidos de estas pruebas posibilitan, entre otros aspectos, verificar consideraciones o suposiciones de diseño, medir el esfuerzo al que están sometidos los componentes o miembros de la estructura y caracterizar de manera certera la distribución de cargas (Transportation Research Board, 2019).

Independientemente del tipo de prueba de carga, se presentan etapas que permiten llevar adelante con éxito la prueba. Estas etapas son la preparación, la ejecución y el análisis de resultados (Transportation Research Board, 2019).

En particular, la etapa de preparación permite definir el tipo de prueba de carga más adecuada, delimitar los objetivos, producir planes de seguridad, de instrumentación y más elementos que serán utilizados en las siguientes fases de la prueba. En esta etapa los modelos en elementos finitos tienen un papel importante, ya que gracias a la información proporcionada por estos es posible (Transportation Research Board, 2019):

- Identificar elementos secundarios y no estructurales que pueden afectar la respuesta del puente ante cargas;
- Desarrollar predicciones de la respuesta para elegir la instrumentación correcta y garantizar la seguridad del ensayo, y,
- Crear un plan de instrumentación basado en posiciones de interés.

La información obtenida de los modelos en elementos finitos incluye las posiciones críticas según el esfuerzo o fuerza que se está analizando. Los más comunes son momento y cortante. La posición crítica indica la ubicación de la carga donde estos efectos alcanzan el máximo valor. Estas posiciones se calculan con base en los vehículos de diseño que proveen los códigos y determinan la localización tanto de los vehículos que aplicarán la carga, como de la instrumentación.

3. ANÁLISIS ESTÁTICO DE VIGAS PREESFORZADAS

3.1. Descripción de Vigas Preesforzadas

Las vigas preesforzadas analizadas fueron fabricadas en noviembre del año 2017, y posteriormente ensayadas en septiembre de 2019. Existen 3 diseños diferentes de estas vigas, que se diferencian por la geometría del cable de postensado; se fundieron dos vigas por cada diseño, para un total de 6 vigas ensayadas.

En cuestión de geometría, las vigas tienen una longitud total de 7000 mm apoyadas en una luz libre de 6500 mm, y una sección constante de 300 x 400 mm². El refuerzo consta de acero sometido a fuerzas de pretensado y postensado. El acero pretensado se compone de 3 torones independientes ubicados en la parte superior e inferior de la viga, y fueron colocados para que la viga resista el traslado sin presentar fisuraciones; por otro lado, la fuerza de postensado está aplicada al cable conformado por 3 torones, el cual presenta una forma parabólica en la

Viga Tipo I, y recta en las vigas Tipo II y III. La información detallada sobre la geometría, el refuerzo y los materiales se encuentra en el **Anexo C**.

Las vigas fueron sometidas a flexión en dos puntos, lo que implica la aplicación de una carga a un tercio de cada extremo, como se indica en la *figura 6 y 7*.

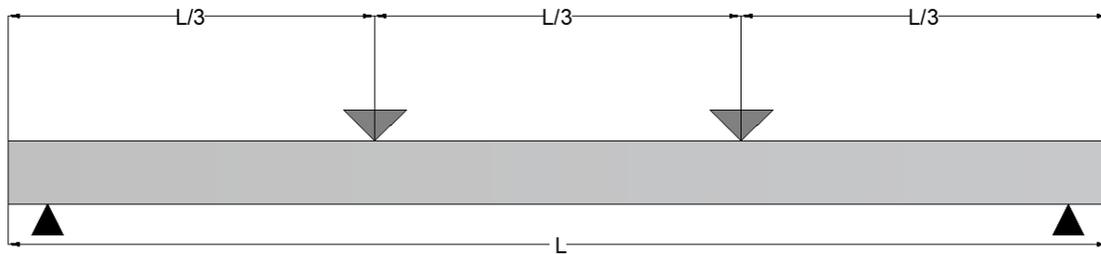


Figura 6: Esquema de Aplicación de Cargas



Figura 7: Aplicación de Cargas en Ensayo

Los valores de carga viva aplicada y fuerza de postensado que fueron utilizados en los análisis son valores conocidos, obtenidos del monitoreo durante los ensayos a las vigas preesforzadas.

3.2. Predicción de Deflexión mediante Ecuaciones Analíticas

Con base en la teoría explicada en la *sección 2*, las ecuaciones asociadas y los datos preliminares de la *tabla 1*, se obtuvieron los diagramas de Carga vs. Desplazamiento para los 6 tipos de viga. Asociado a cada diagrama existe una tabla que especifica la carga viva aplicada y la fuerza efectiva de postensado por viga, ya que los valores son diferentes según el caso. El valor de carga viva aplicada corresponde a la carga máxima a partir de la cual el modelo lineal ya no es válido, puesto que se supera el momento de agrietamiento de la sección.

Tabla 1: Datos Preliminares Diagrama Carga vs. Desplazamiento

Variable	Valor	Unidades
Base de Sección b	300	mm
Altura de Sección h	400	mm
Longitud de Luz l	6500	mm
Resistencia a Compresión de Hormigón f'_c	35	MPa
Peso específico del Hormigón ρ	24 E-9	kN/mm ³
Módulo de Elasticidad de Hormigón E_c	27.81	GPa

A continuación, se muestran las cargas aplicadas en la Viga Tipo I # 1 y sus resultados, los cuales incluyen el desplazamiento por tipo de carga y el diagrama Carga vs. Desplazamiento.

Tabla 2: Cargas Aplicadas - Viga Tipo I # 1

Variable	Valor	Unidades
Carga Viva	31.392	kN
Fuerza Efectiva de Postensado	261.34	kN

La carga viva indicada en la *tabla 2* se refiere a la aplicada en un punto a un tercio de la viga, por lo que la carga total a la cual cada viga es sometida es el doble.

Tabla 3: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo I # 1

Carga	Desplazamiento	Unidades
Carga Muerta	1.505	mm
Carga de Postensado	-2.585	mm
Carga Viva	6.885	mm
Carga Total	5.804	mm

El signo positivo se refiere a deflexiones que generan momento positivo en la viga. A continuación, en la *figura 8* se incluye el diagrama Carga vs. Desplazamiento.

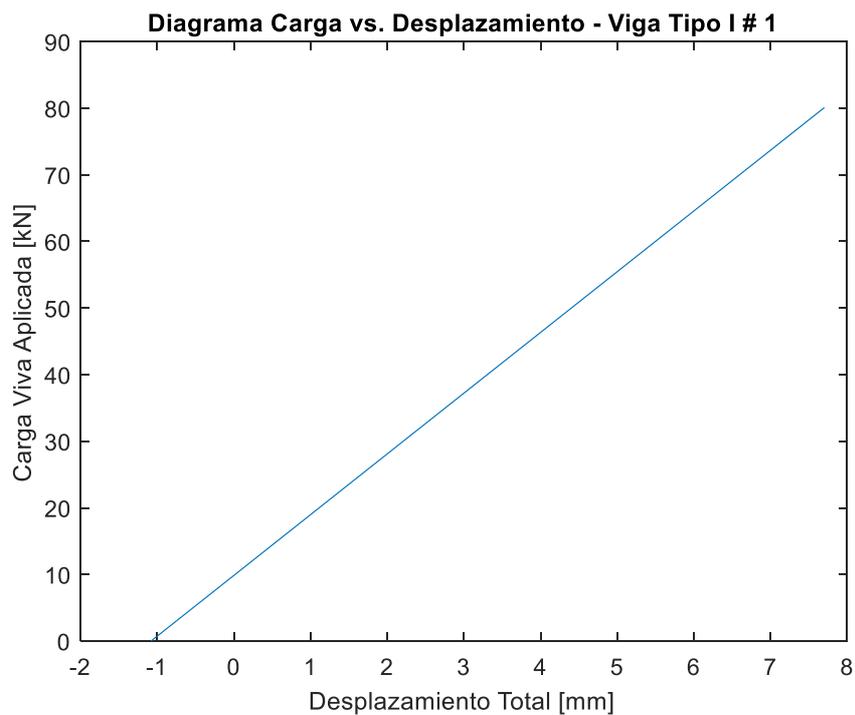


Figura 8: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo I # 1

El diagrama Carga vs. Desplazamiento inicia en la deflexión causada por el peso propio y por la acción del esfuerzo postensado, y crece durante la aplicación progresiva de la carga viva en dos puntos. Los resultados para las 5 vigas restantes se pueden ubicar en el **Anexo A** para el caso de la tabla de cargas aplicadas y desplazamientos por tipo de carga, y en el **Anexo B** para el diagrama Carga vs. Desplazamiento por tipo de viga.

En la *tabla 4* se muestra en resumen el desplazamiento total en el centro de la luz para cada tipo de viga.

Tabla 4: Desplazamiento Total por Tipo de Viga – Cálculos Manuales

Viga	Desplazamiento Total	Unidades
Tipo I # 1	5.804	mm
Tipo I # 2	6.638	mm
Tipo II # 1	5.506	mm
Tipo II # 2	5.513	mm
Tipo III # 1	5.700	mm
Tipo III # 2	5.808	mm

En el caso de las vigas *Tipo I* y *Tipo II*, se observa que antes del inicio del protocolo de carga viva, existen deflexiones negativas a causa del preesfuerzo, las cuales no fueron completamente contrapuestas por el peso propio del elemento. Por otro lado, en la viga *Tipo III*, la deflexión inicial es únicamente causada por el peso propio, ya que la ubicación y geometría del cable solo generan compresión en la sección. A pesar de que existe refuerzo sometido a fuerza de pretensado en los 3 tipos de vigas, su efecto se ve anulado por la ubicación superior e inferior del acero; por lo tanto, esta condición no afecta el diagrama Carga vs. Desplazamiento.

El diagrama Carga vs. Desplazamiento permite, a partir de la pendiente de la recta, obtener la rigidez de la sección. Ya que este diagrama solo aplica mientras las deformaciones estén dentro del rango elástico, la rigidez obtenida es una rigidez sin daño y no cambiará mientras la sección transversal, el módulo de elasticidad y la longitud se mantengan iguales, lo cual aplica para el caso analizado. El valor obtenido fue de 9.12 kN/mm. Esta información será contrastada con los resultados experimentales más adelante.

3.3. Análisis de la Sección Transversal mediante Ecuaciones Analíticas

El análisis de la sección transversal de un elemento estructural permite determinar su comportamiento y capacidad ante un rango de cargas. El objetivo principal de este análisis es la obtención del diagrama Momento vs. Curvatura, el cual permite la obtención de información sobre la ductilidad, la rigidez y la capacidad última de una sección (Rodríguez, 2015).

Con base en el método descrito en la *sección 2*, con sus respectivas ecuaciones y la información de la *tabla 1 y 5*, se obtuvo el diagrama Momento vs. Curvatura para las 6 vigas preesforzadas analizadas.

Tabla 5: Datos Preliminares Diagrama Momento vs. Curvatura

Variable	Valor	Unidades
Resistencia Última de Acero de Preesfuerzo f_{pu}	1860	MPa
Resistencia a Fluencia de Acero de Preesfuerzo f_{py}	90% f_{pu}	MPa
Módulo de Elasticidad de Acero de Preesfuerzo E_{ps}	193.55	GPa
Área Efectiva Total de Torones de Preesfuerzo A_{ps}	296.13	mm ²

A continuación, en la *figura 9*, se muestra el diagrama Momento vs. Curvatura para la Viga Tipo I # 1. Los diagramas restantes se encuentran en el **Anexo B**.

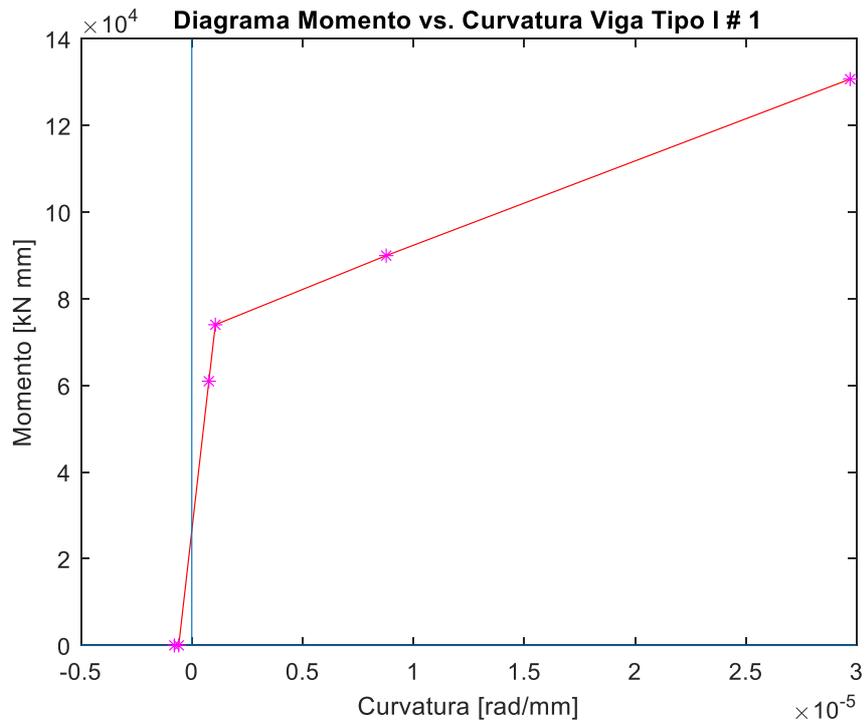


Figura 9: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo I # 1

3.4. Predicción de Deflexión mediante SCIA Engineer

La modelación de las vigas preesforzadas se realizó con ayuda del programa SCIA Engineer, que es un software de ingeniería estructural para modelos en 3 dimensiones (Nemetschek Group, 2019). En la *figura 10* se aprecia el modelo correspondiente a la Viga Tipo I, en la cual el cable postensado tiene una forma parabólica.

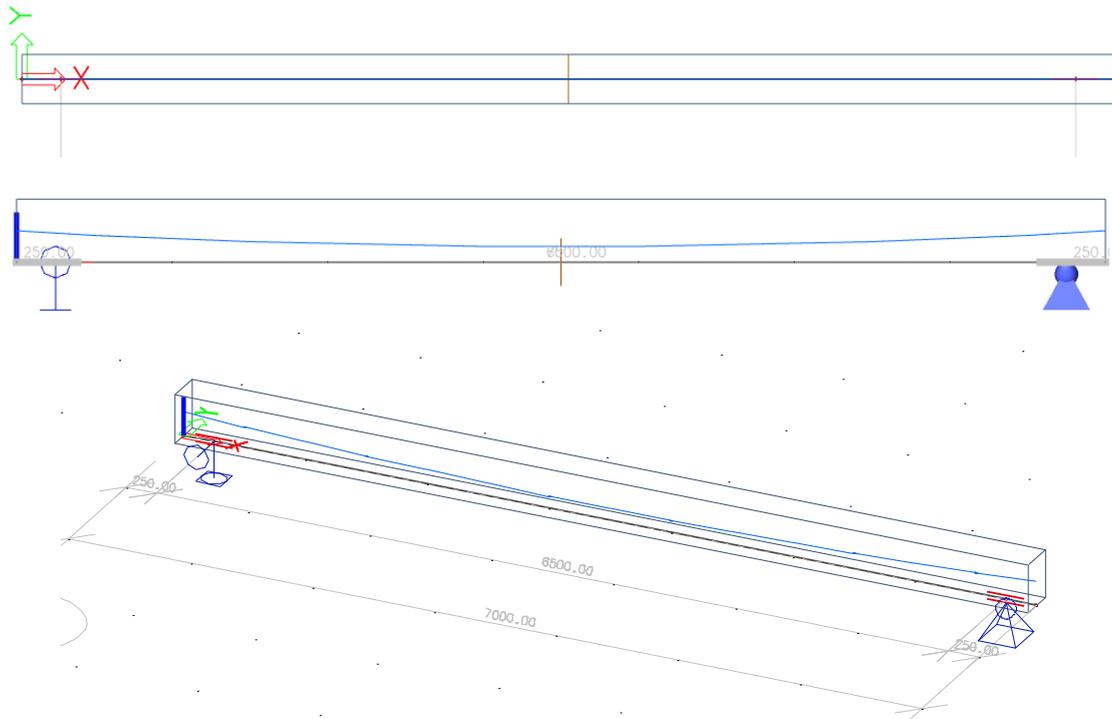


Figura 10: Modelo en SCIA Engineer - Viga Tipo 1

Los 6 modelos realizados se basan en un elemento de una dimensión, cuyas características geométricas y de material se especifican en la *tabla 6*. La información utilizada en los modelos está en concordancia con la utilizada en los cálculos a mano.

Tabla 6: Información Preliminar de Modelo Lineal en SCIA Engineer

Variable	Valor	Unidades
Base de Sección b	300	mm
Altura de Sección h	400	mm
Longitud de Luz l	7000	mm
Resistencia a Compresión de Hormigón $f'c$	35	MPa
Peso Específico del Hormigón ρ	24 E-9	kN/mm ³
Módulo de Elasticidad de Hormigón E_c	27.81	GPa
Coefficiente de Poisson η	0.15	-
Resistencia Última de Acero de Preesfuerzo f_{pu}	1860	MPa
Resistencia a Fluencia de Acero de Preesfuerzo f_{py}	90% f_{pu}	MPa
Módulo de Elasticidad de Acero de Preesfuerzo E_{ps}	193.55	GPa

Como se puede observar en la *figura 10*, los modelos constan de dos apoyos, cuyas restricciones permiten la simulación de una viga simplemente apoyada; estas restricciones se detallan en la *tabla 7* y *figura 11*. La restricción al giro en la dirección Z, aplicada al apoyo izquierdo en todos los modelos, responde a un requerimiento para la estabilidad del modelo al ser un análisis en 3 dimensiones. Por último, el acero postensado se modeló como un torón sometido a un esfuerzo inicial sin pérdidas, ya que el valor de fuerza efectiva es conocido.

Tabla 7: Restricciones en Apoyos – Modelo de Viga

Apoyo	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento Z
Izquierdo	Libre	Libre	Rígido
Derecho	Rígido	Rígido	Rígido
Apoyo	Rotación X	Rotación Y	Rotación Z
Izquierdo	Libre	Libre	Rígido
Derecho	Libre	Libre	Libre

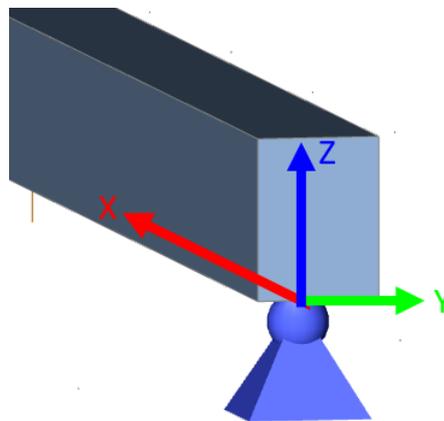


Figura 11: Eje de Coordenadas de los Apoyos

Con base en los parámetros explicados anteriormente, se obtuvieron los resultados de desplazamiento máximo, ubicado en el centro de la luz, para las 6 vigas analizadas. En la *figura 12* se muestra el resultado para la viga Tipo I # 1.

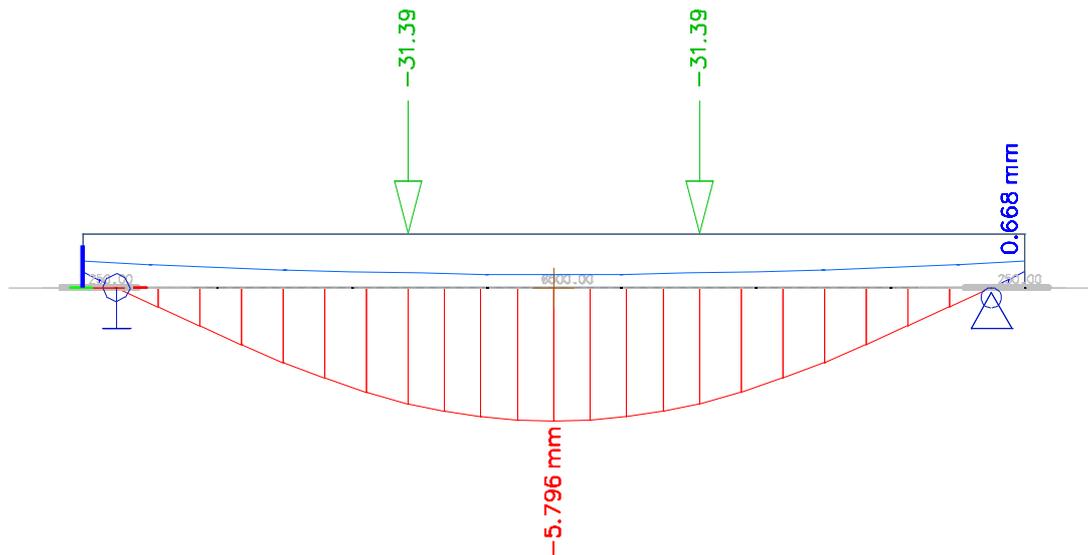


Figura 12: Desplazamiento Máximo - Viga Tipo I # 1

En la *tabla 8* se resumen los resultados de desplazamiento máximo para las 6 vigas preesforzadas, asociados a la carga viva y fuerza efectiva de postensado correspondiente.

Tabla 8: Cargas Aplicadas y Resultados de Desplazamiento - SCIA Engineer

Viga	Carga Viva [kN]	Fuerza Efectiva de Postensado [kN]	Esfuerzo Efectivo de Postensado [MPa]	Desplazamiento en el Centro de Luz [mm]
Tipo I # 1	31.39	261.34	882	5.796
Tipo I # 2	39.24	351.00	1185	6.613
Tipo II # 1	29.63	262.81	887	5.582
Tipo II # 2	29.72	264.38	893	5.586
Tipo III # 1	19.13	244.27	825	5.758
Tipo III # 2	19.62	264.38	893	5.866

Estos resultados son contrastados a continuación con los resultados de los cálculos manuales.

3.5. Análisis de Resultados mediante Cálculos Manuales y Modelación en SCIA

Una vez obtenidas las deflexiones en el centro de la luz, aplicando tanto el modelo lineal mediante cálculos manuales, cómo a través del software SCIA Engineer, se realizó una

comparación entre los resultados obtenidos por los dos métodos, mediante el cálculo del porcentaje de diferencia.

Ecuación 28: Porcentaje de Diferencia

valor1: Valor de contraste 1

valor2: Valor de contraste 2

$$Diferencia_{\%} = \frac{|valor_1 - valor_2|}{\frac{valor_1 + valor_2}{2}} * 100\% \quad (28)$$

Tabla 9: Comparación de Resultados - Cálculos Manuales y Modelo en SCIA Engineer

Viga	Desplazamiento Total Cálculos a Mano [mm]	Desplazamiento Total SCIA Engineer [mm]	Porcentaje de Diferencia [%]
Tipo I # 1	5.804	5.796	0.138
Tipo I # 2	6.638	6.613	0.377
Tipo II # 1	5.506	5.582	1.371
Tipo II # 2	5.513	5.586	1.315
Tipo III # 1	5.700	5.758	1.012
Tipo III # 2	5.808	5.866	0.994

En la tabla anterior se puede observar que el porcentaje de diferencia entre los resultados obtenidos por los dos métodos no supera el 1.4%. Por lo tanto, se concluye que tanto el método basado en cálculos manuales como el programa computacional SCIA Engineer son válidos para obtener los resultados de desplazamiento según el protocolo de carga de las vigas. Con base en esta conclusión, se utilizará el procedimiento manual empleado, para comparar el desplazamiento con los resultados experimentales, aspecto que se discute en la *sección 3.6*.

3.6. Resultados Experimentales de Vigas Preesforzadas

En la presente sección, se incluye la información obtenida de los ensayos experimentales de las 6 vigas preesforzadas en la Universidad del Valle, Colombia. A partir de los resultados

experimentales, se realizará un contraste con la información del análisis lineal explicado anteriormente.

3.6.1. Instrumentación y Protocolo de Carga.

Para obtener la información de interés durante los ensayos de las 6 vigas preesforzadas, se utilizó instrumentación específica, y la ubicación que se muestra en la *figura 13*.

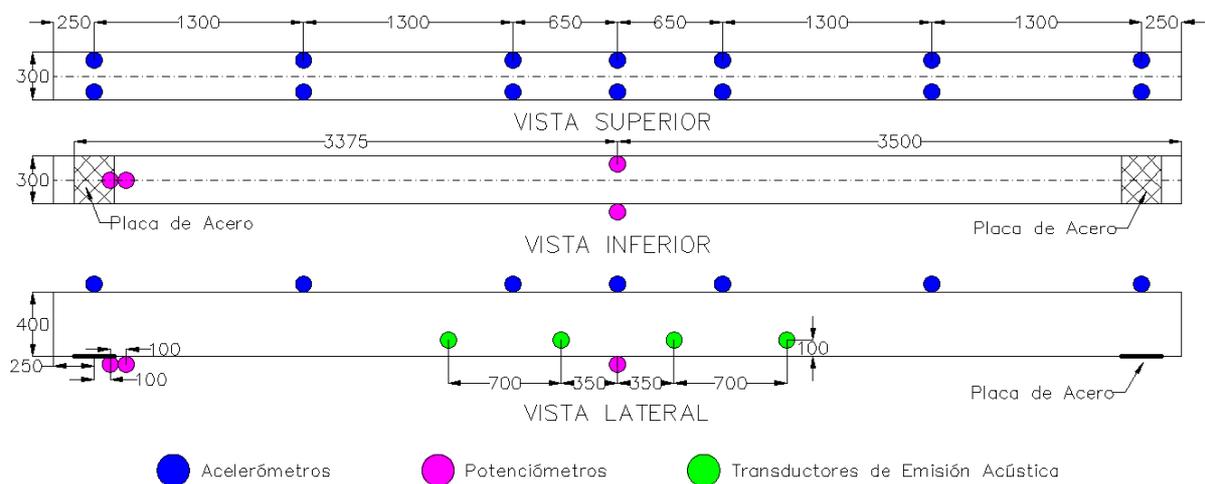


Figura 13: Instrumentación de Vigas Preesforzadas. Fuente: Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7)

Para realizar la medición se utilizó un total de 4 potenciómetros, distribuidos de la siguiente manera:

- Un potenciómetro ubicado en la placa de acero izquierda;
- Un potenciómetro ubicado contiguo a la placa de acero izquierda, instalado en el hormigón; y,
- Dos potenciómetros ubicados longitudinalmente en el centro de la luz y transversalmente en los dos extremos de la sección.

La forma general del protocolo de carga utilizado en el ensayo de las 6 vigas preesforzadas se muestra en la *figura 14*. Los 4 primeros ciclos de carga teóricamente producen deformaciones elásticas, mientras que a partir del ciclo 5 se esperan deformaciones permanentes.

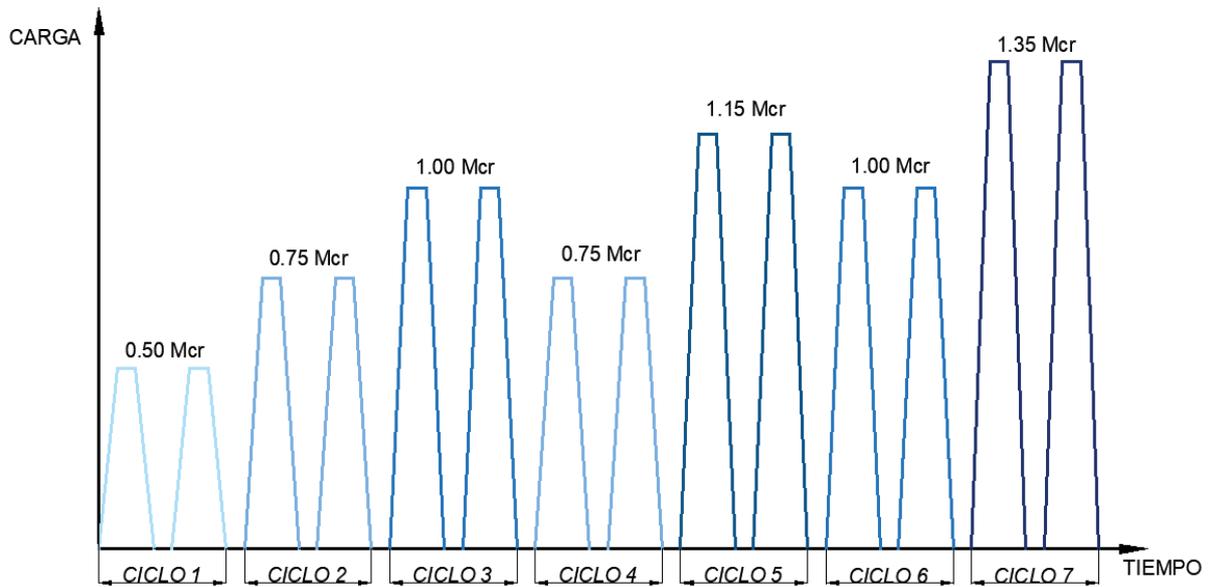


Figura 14: Protocolo de Carga

Como ya se discutió anteriormente, tanto el preesfuerzo como la carga viva varían con cada viga analizada. En las secciones anteriores, los valores de carga viva utilizados correspondieron al ciclo 3, el cual representa la carga máxima para la cual la linealidad del diagrama Carga vs. Desplazamiento se cumple.

A continuación, se muestran los valores de carga viva por ciclo para las 6 vigas analizadas, que corresponden a la carga aplicada en un punto; por lo tanto, la carga viva total será el doble de la indicada en la *tabla 10*.

Tabla 10: Carga Viva por Ciclo

Viga	Ciclo 1 [kN]	Ciclo 2 [kN]	Ciclo 3 [kN]	Ciclo 4 [kN]	Ciclo 5 [kN]	Ciclo 6 [kN]	Ciclo 7 [kN]
Tipo I # 1	31.4	47.1	62.8	47.1	72.2	62.8	84.8
Tipo I # 2	39.2	58.9	78.5	58.9	90.2	78.5	105.9
Tipo II # 1	29.6	44.4	59.2	44.4	68.1	59.2	80.0
Tipo II # 2	29.7	44.6	59.5	44.6	68.4	59.5	80.2
Tipo III # 1	19.1	28.7	38.3	28.7	44.0	38.2	51.6
Tipo III # 2	19.6	29.4	39.2	29.4	45.1	39.2	53.0

Con base en el protocolo explicado anteriormente, el ensayo de las vigas fue llevado a cabo, y los resultados principales se presentan a continuación.

3.6.2. Resultados Experimentales Obtenidos.

En la presente sección se muestran los resultados de desplazamiento y rigidez en el centro de la luz, para las 6 vigas ensayadas.

En el caso de desplazamiento, los resultados se muestran mediante diagramas de desplazamiento vs. tiempo, en correspondencia con el protocolo de carga mostrado en la *figura 14*. Como se explicó anteriormente en la sección de instrumentación, la información disponible responde a mediciones de 4 potenciómetros. Estas mediciones permiten obtener información de 2 posiciones en el centro de la luz, y a su vez calcular el desplazamiento relativo a la deformación de los neoprenos ubicados en los apoyos de las vigas.

Como *figura 15* se incluye el diagrama desplazamiento vs. tiempo para la viga Tipo I #1, el cual se compone de información del *potenciómetro 5* y *potenciómetro 7*, que corresponden a los resultados de desplazamiento relativo explicados anteriormente.

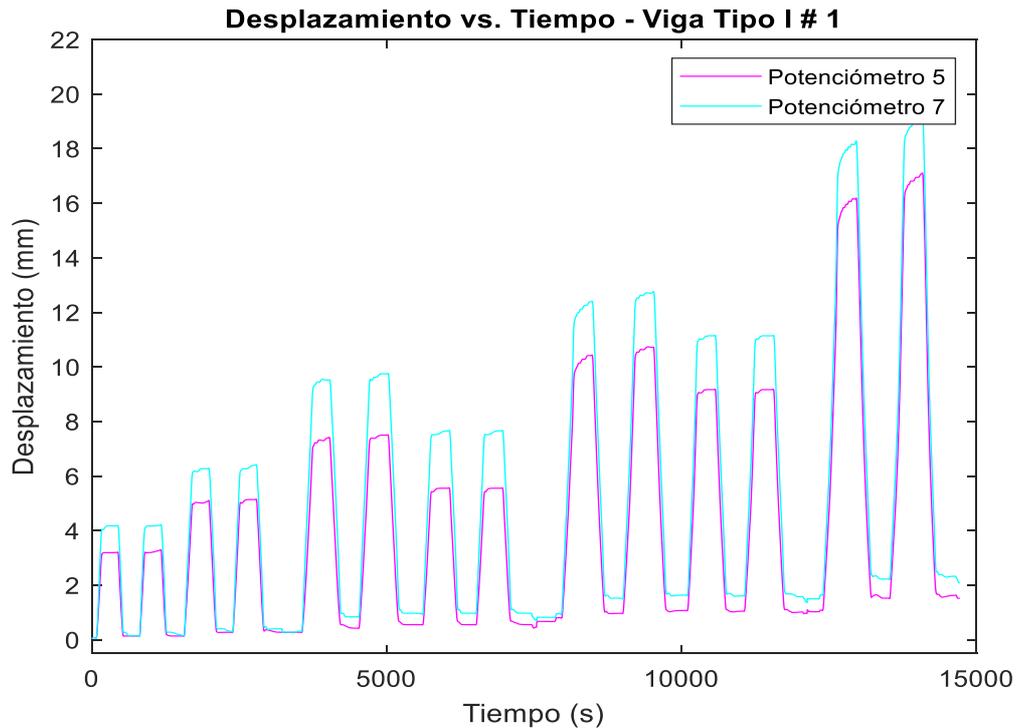


Figura 15: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo I # 1

Los diagramas de desplazamiento vs. tiempo para las 5 vigas restantes se encuentran en el **Anexo B**.

Ya que la carga viva aplicada es conocida, y el desplazamiento también, se utilizó la información disponible para calcular la rigidez secante en los puntos de carga máxima por ciclo del protocolo. La deformación utilizada es el promedio entre las 2 mediciones disponibles, conocidas como *potenciómetro 5* y *potenciómetro 7*. Estos valores se encuentran representados en las *figuras 16* y *17*. La información de base para esta figura se encuentra en el **Anexo A**, cuya tabla incluye su representación en porcentaje.

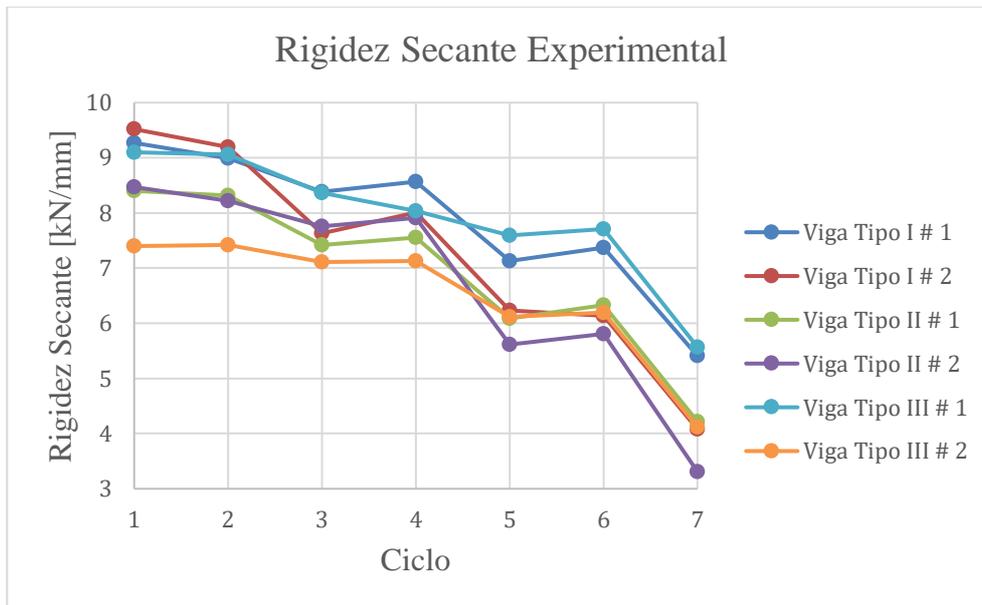


Figura 16: Rigidez Secante Experimental

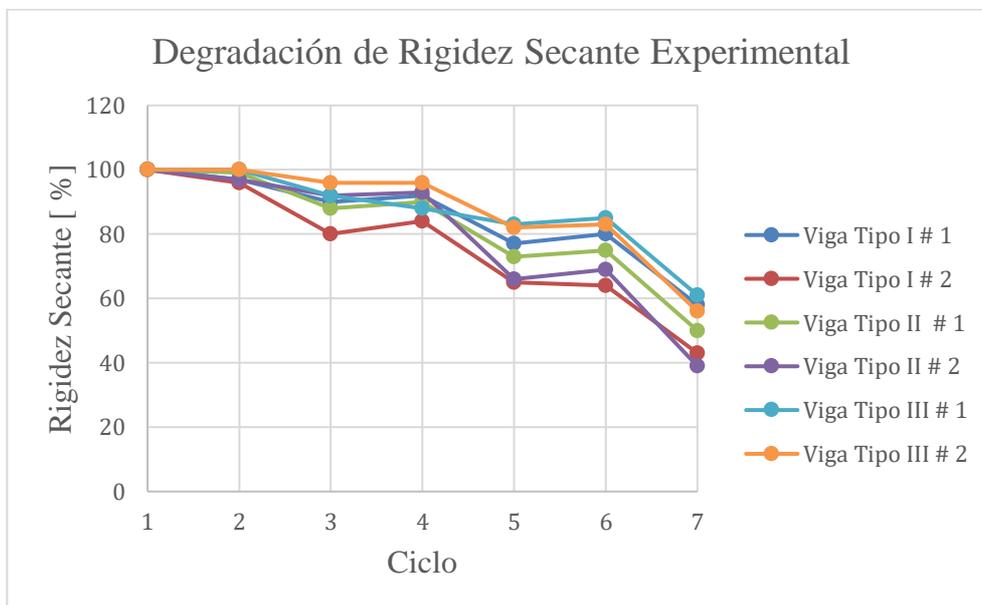


Figura 17: Degradación de Rigidez Secante Experimental

Las figuras anteriores muestran la degradación en la rigidez secante, real y expresada en porcentaje, a medida que los ciclos avanzan, de acorde al protocolo de carga, y, en consecuencia, la carga incrementada en el tiempo. La disminución progresiva indica la presencia de deformaciones permanentes.

3.6.3. Comparación de Resultados Experimentales y por Cálculos Manuales

El siguiente paso fue comparar los resultados lineales obtenidos mediante cálculos manuales con la información experimental disponible, con el objetivo de verificar la validez del modelo lineal. Para realizar esto, se sobrepuso la respuesta de desplazamiento en el tiempo obtenido mediante experimentación con la respuesta teórica lineal correspondiente al vector de cargas aplicado en cada viga.

A continuación, en la *figura 18* se muestra el diagrama Desplazamiento vs. Tiempo para la Viga Tipo I # 1, con los valores experimentales y la respuesta teórica lineal.

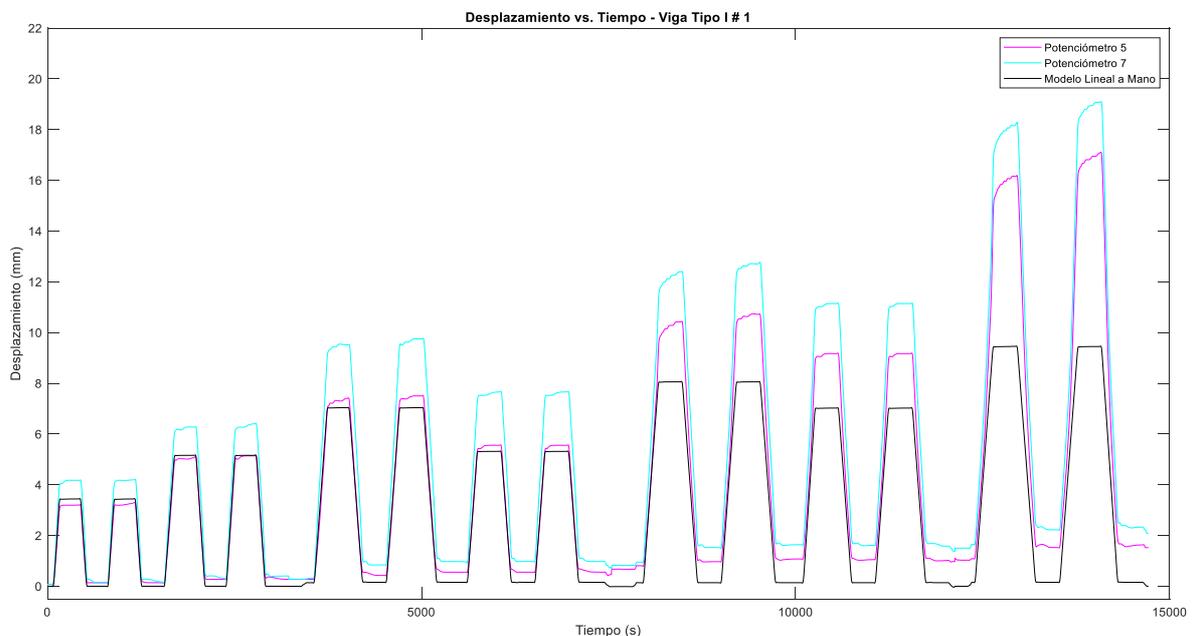


Figura 18: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo I # 1

Los diagramas de Desplazamiento vs. Tiempo, que incluyen la respuesta lineal resultante de los cálculos manuales se encuentran en el **Anexo B**.

De forma preliminar, se destaca que el modelo lineal desarrollado manualmente, es válido teóricamente solo en los 4 primeros ciclos del protocolo, ya que la carga no supera el momento de agrietamiento de la sección.

En la *figura 19*, mostrada a continuación, se muestra el porcentaje de diferencia entre el desplazamiento máximo por ciclo correspondiente al potenciómetro 5 y 7. La diferencia más marcada se da en la viga Tipo I # 1 y Tipo III # 2, aspecto que puede ser resultado de que las cargas no estaban adecuadamente centradas.

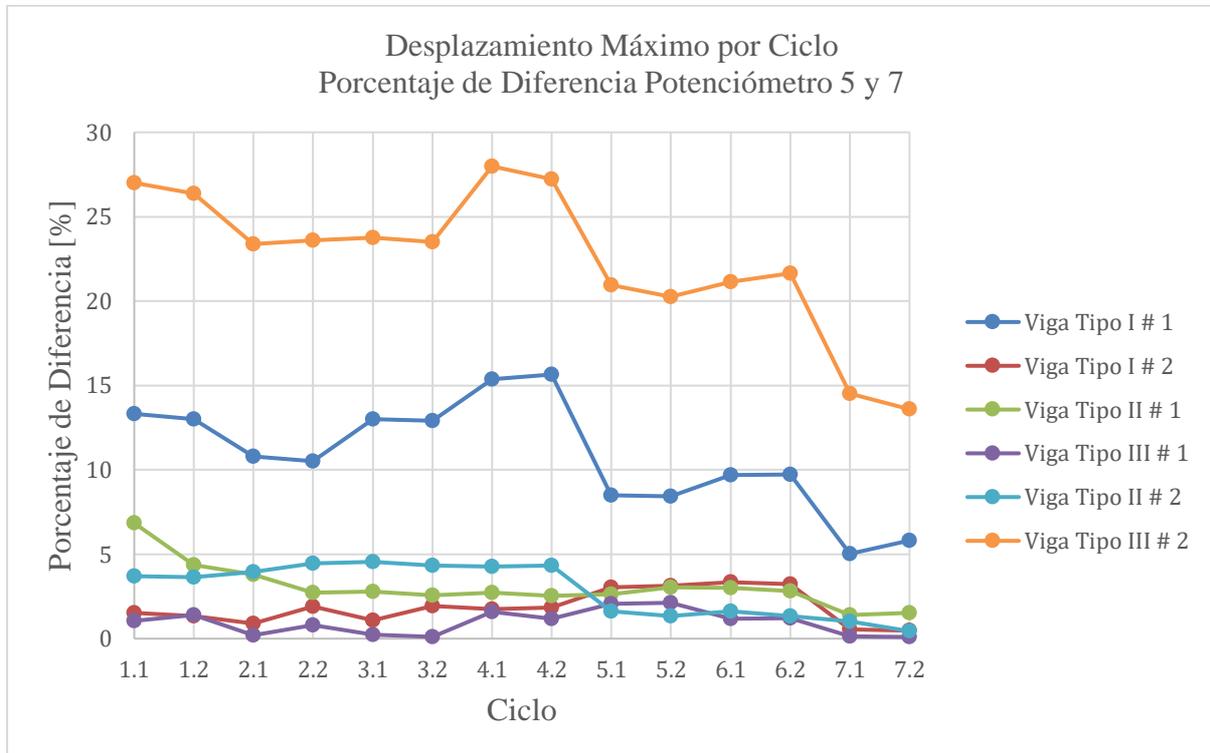


Figura 19: Porcentaje de Diferencia Desplazamiento Potenciómetro 5 y 7

En la *figura 20*, se representa el porcentaje de diferencia de desplazamiento máximo por cada ciclo, entre los resultados experimentales y el modelo lineal desarrollado. En este caso, la Viga III # 2 presenta el porcentaje más alto, el cual llega hasta el 50% durante los 4 ciclos iniciales de carga. Para las 5 vigas restantes, en el ciclo 1 y 2 el porcentaje se mantiene menor al 20%, y en el ciclo 3 y 4 sube hasta el 30%.

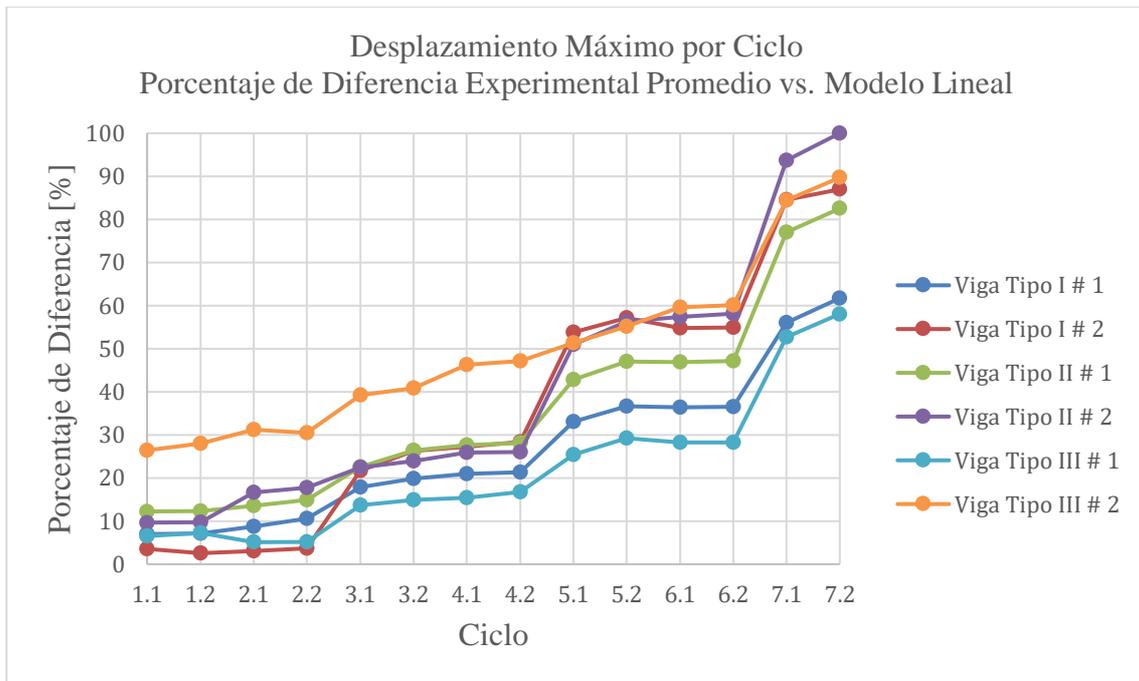


Figura 20: Porcentaje de Diferencia Desplazamiento Experimental vs. Modelo Lineal

Evaluando los resultados experimentales junto con el modelo lineal desarrollado manualmente, se muestra claramente como en los ciclos donde ya existen deformaciones permanentes, la respuesta real de las vigas se aleja considerablemente del modelo lineal, lo cual era un resultado esperado. Por otro lado, también se observa un comportamiento muy cercano de las vigas en comparación con el modelo lineal en los primeros 4 ciclos, y particularmente en los dos primeros. En el caso de los ciclos 3 y 4, se observa la presencia de deformaciones permanentes, lo cual se debe probablemente a la incertidumbre en la información de base para el cálculo del momento de agrietamiento teórico.

Anteriormente, el diagrama Carga vs. Desplazamiento permitió la obtención de la rigidez sin daño de la sección, cuyo valor fue comparado con la rigidez del ciclo 1 de carga, la cual ha sido tomada como la rigidez sin daño de los resultados experimentales. En la *tabla 11* se calculó el porcentaje de diferencia entre los valores experimentales de rigidez y el único valor obtenido de los cálculos numéricos manuales, igual a 9.12 kN/mm.

Tabla 11: Diferencia (%) entre Rigidez Experimental de Ciclo 1 y Rigidez Teórica

Viga	Viga I # 1	Viga I # 2	Viga II # 1
Porcentaje de Diferencia [%]	1.74	4.40	8.11
Viga	Viga II # 2	Viga III # 1	Viga III # 2
Porcentaje de Diferencia [%]	7.28	0.11	20.45

El análisis de la rigidez experimental muestra la degradación a partir del ciclo 2 en adelante, lo cual tiene relación directa con las deformaciones permanentes encontradas en los ciclos de carga, que son observados en el diagrama desplazamiento vs. tiempo y en la *figura 20*. La rigidez sin daño, la cual se compara en la *tabla 11*, tiene un porcentaje de diferencia que abarca un rango relativamente amplio, entre el 0.1% y el 20%.

Tomando en cuenta que la deformación utilizada en el cálculo de la rigidez secante es la promedio entre los dos potenciómetros utilizados, el porcentaje que presenta la Viga Tipo III # 2 puede verse justificado en la diferencia de los dos desplazamientos experimentales. Otra razón también es la diferencia que existe entre el valor del modelo lineal y el promedio del desplazamiento experimental, el cual se aleja de la tendencia de las 5 vigas restantes. Los siguientes 2 porcentajes más altos, que corresponden a las vigas II # 1 y II # 2, se justifican de igual manera por la diferencia que existe entre las dos mediciones experimentales, pero su porcentaje se reduce debido a que el valor promedio de desplazamiento es cercano al modelo lineal, al contrario de la viga III # 2.

4. ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS

La segunda fase de este proyecto consiste en desarrollar un modelo lineal en elementos finitos de un puente de vigas preesforzadas, utilizando el software SCIA Engineer (Nemetschek Group, 2019). Este modelo permitirá el cálculo posterior de las posiciones críticas, utilizando los vehículos de diseño que plantea el código vigente.

Para incorporar en el modelo la incertidumbre sobre las propiedades de los materiales utilizados, se aplicaron diferentes valores a los parámetros (por ejemplo, en el módulo de elasticidad de las vigas transversales), para obtener estimados considerados como referenciales de la respuesta del puente en la prueba de carga. Otra funcionalidad de esta variación propuesta es que permite determinar si los parámetros modificados generan un cambio significativo en la respuesta estructural del puente analizado.

Como ya se discutió en la *sección 2.2.2*, el objetivo de las pruebas de carga es medir la respuesta estructural del puente ante cargas conocidas, con varios enfoques. En el caso del Proyecto Principal, el enfoque es ajustar un modelo analítico con base en los resultados obtenidos de la prueba, para poder analizar su comportamiento ante cargas mayores. Por lo tanto, los objetivos del Proyecto Específico en relación con esta sección son determinar las posiciones críticas de los vehículos de diseño y el rango de resultados correspondientes para momento y cortante, en función de las variaciones de los parámetros propuestos.

4.1. Descripción del Puente de Vigas Preesforzadas

El puente modelado se encuentra ubicado en el barrio Ciudad Jardín de la ciudad de Cali, Valle del Cauca, Colombia. Su dirección es Calle #16 con Carrera 112 y 113 (ver *figura 21*).

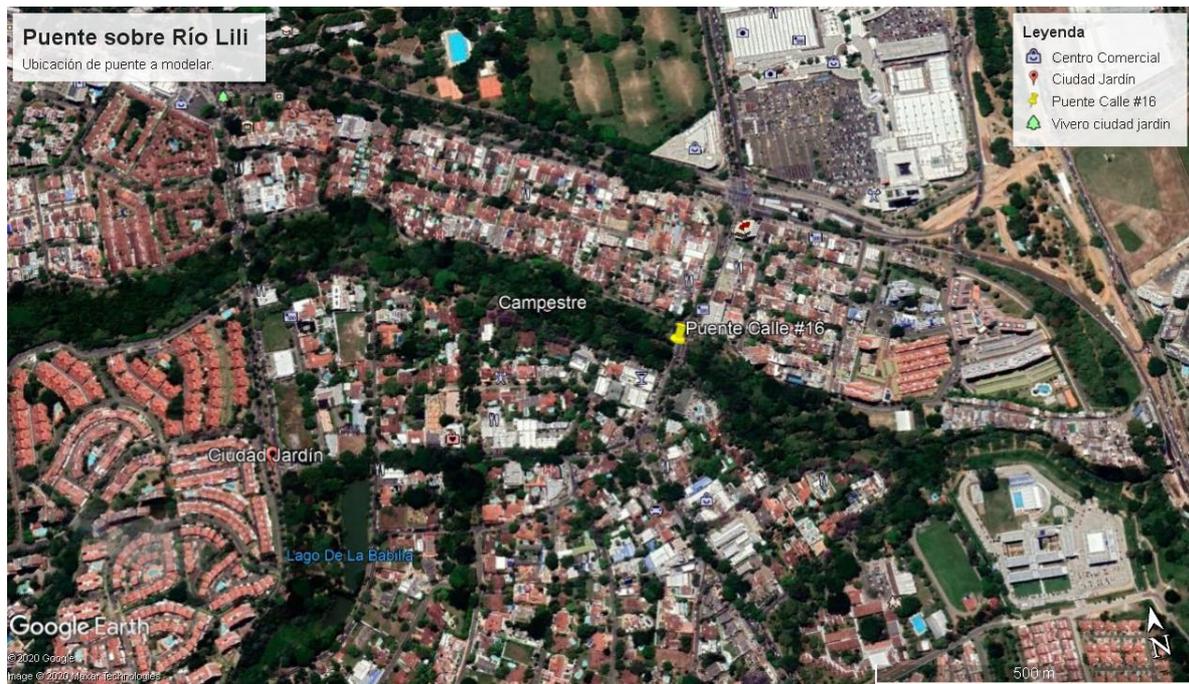


Figura 21: Ubicación de Puente sobre Río Lili. Fuente: Google Earth

El obstáculo que este puente salva es el río Lili, y contiene dos carriles en un mismo sentido de circulación. Un puente gemelo a su lado, estructuralmente independiente, maneja el sentido contrario de circulación. Los datos generales de la geometría son: puente de vigas I preesforzadas; luz de 19 m, ancho total de 12.2 m y sin apoyos intermedios.

Lamentablemente no se dispone de los planos referentes a este puente, por lo que la geometría fue obtenida mediante un levantamiento manual, cuyo plano se muestra en el **Anexo D**.

4.2. Parámetros del Modelo

El modelo requiere datos de entrada o parámetros que se mantendrán constantes durante todo el análisis, y otros que variarán con base en escenarios considerados. A continuación, se describe la información utilizada en el modelo.

4.2.1. Materiales.

No se dispone de los diseños del puente en análisis, lo que limita la determinación de las propiedades de los materiales involucrados en el modelo, sin embargo, se dispone de un puente en Cali, con planos disponibles, siendo los materiales utilizados y el tipo de estructura similares al puente de interés. Los dos puentes constan de vigas preesforzadas, y la sección de sus vigas principales tienen una forma muy similar. A pesar de que sus dimensiones son distintas, las similitudes permiten validar el uso de la información de los materiales para completar el modelo analizado. En la *tabla 12* se resume las propiedades de las estructuras, el material y la resistencia correspondiente.

Tabla 12: Materiales de Modelo Lineal de Puente

Elemento Estructural	Material	Resistencia [MPa]
Vigas Principales	Hormigón	35
Tablero	Hormigón	28
Vigas Transversales	Hormigón	Parámetro Variable

En el caso de las vigas transversales, como se indica en la tabla, la resistencia es un parámetro variable, aspecto que se analiza en la *sección 4.2.3*. Para complementar la información de la tabla anterior (*tabla 12*) a continuación, en la *tabla 13* se muestran los parámetros del material utilizado en el caso del hormigón de 35 MPa.

Tabla 13: Información de Material - Hormigón de 35 MPa

Variable	Valor	Unidades
Comportamiento de Material	Elástico	-
Módulo de Elasticidad E_c	27.81	GPa
Coefficiente de Poisson η	0.15	-
Resistencia a Compresión de Hormigón f'_c	35	MPa
Peso Específico Hormigón ρ	2.4E-6	kN/mm ³

Y para el caso de hormigón de 28 MPa, su información se muestra en la *tabla 14*, a continuación.

Tabla 14: Información de Material - Hormigón de 28 MPa

Variable	Valor	Unidades
Comportamiento de Material	Elástico	-
Módulo de Elasticidad E_c	24.87	GPa
Coefficiente de Poisson η	0.15	-
Resistencia a Compresión de Hormigón f'_c	28	MPa
Peso Específico Hormigón ρ	2.4E-6	kN/mm ³

4.2.2. Condiciones de Borde.

Los apoyos del modelo se ubican en los extremos de cada viga principal, lo que representa un total de 14 puntos con parámetros de restricción. Para el planteamiento de las condiciones de borde se partió del concepto de vigas simplemente apoyadas; por lo tanto, las restricciones del modelo siguen el mismo lineamiento de un simple apoyo. Sin embargo, ya que el puente está apoyado sobre neoprenos, la rigidez en la dirección Z adopta un valor específico. Este valor entra en la categoría de parámetros con variación, aspecto que se analiza en la sección siguiente (4.2.3). En la *tabla 15* se muestran las restricciones aplicadas en los extremos de las vigas principales, y la *figura 22* muestra la dirección que responde cada eje indicado.

Tabla 15: Restricciones en Apoyos - Modelo de Puente

Apoyo	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento Z
Izquierdo	Libre	Libre	Flexible
Derecho	Rígido	Rígido	Flexible
Apoyo	Rotación X	Rotación Y	Rotación Z
Izquierdo	Libre	Libre	Libre
Derecho	Libre	Libre	Libre

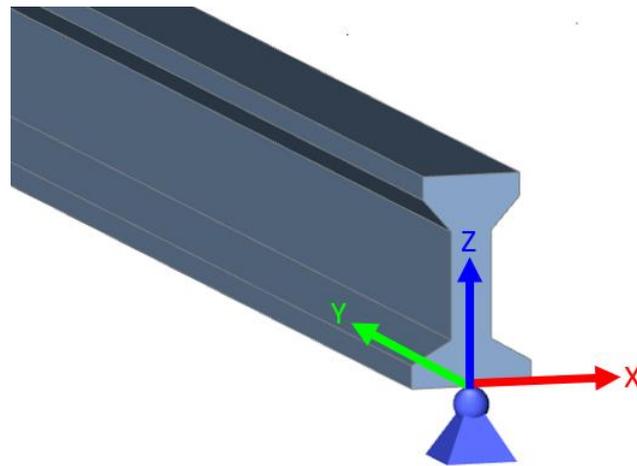


Figura 22: Eje de Coordenadas de Apoyos

En la figura anterior se observa que el *eje x* sigue la dirección transversal del puente, el *eje y* su dirección longitudinal, y el *eje z* la dirección perpendicular.

4.2.3. Parámetros de Variación.

Los parámetros con variación se consideraron a través de 3 elementos del modelo: las vigas transversales, la rigidez de los neoprenos y la posición del carril, que puede ser tomado también como parámetro del modelo.

En el caso de las vigas transversales se varió el módulo de elasticidad, para observar el comportamiento del modelo ante vigas transversales con rigidez reducida, debido a posible fisuración del hormigón, y determinar su afectación en la transmisión de cargas a las vigas principales adyacentes. El primer valor que se utilizó corresponde a las propiedades de hormigón de 28 MPa (ver *tabla 14*). El segundo valor fue una reducción aproximada del 50% del módulo de elasticidad inicial.

La rigidez de los neoprenos, reflejada en la dirección Z de los apoyos en el modelo, adoptó un total 3 valores: el valor de base corresponde a la resistencia del neopreno con 50 años de uso, igual a 475 kN/mm (Ensink, en proceso); y, los dos valores restantes corresponden a un incremento y decremento aproximado del 50% respecto al valor de base. De esta manera, se

buscó obtener un rango de valores, para reducir la incertidumbre en relación con el valor real de los neoprenos, cuya rigidez aumenta en general con el tiempo.

La posición transversal del carril fue alineada con el eje de las vigas principales, con un total de 6 líneas de carril diferentes. Para analizar el caso más crítico, que corresponde a dos carriles cargados en simultáneo, se creó una línea divisoria que simuló los dos carriles que existen en el puente analizado. Las combinaciones fueron con base en esta línea, la cual evitó que las cargas se superpongan y que dos vehículos estén en un mismo carril.

La *tabla 16* resume la información que fue utilizada para los parámetros de variación.

Tabla 16: Parámetros de Variación Cuantitativos - Modelo de Puente

Parámetro de Variación	Valor	Unidades
Módulo de Elasticidad de Vigas Transversales	24.87	GPa
	11.51	GPa
Rigidez en Dirección Z de los Apoyos	475	kN/mm
	250	kN/mm
	750	kN/mm

4.3. Modelo Final

Con base en los parámetros del modelo discutidos en la sección anterior, se construyó el modelo mostrado en la *figura 23*.

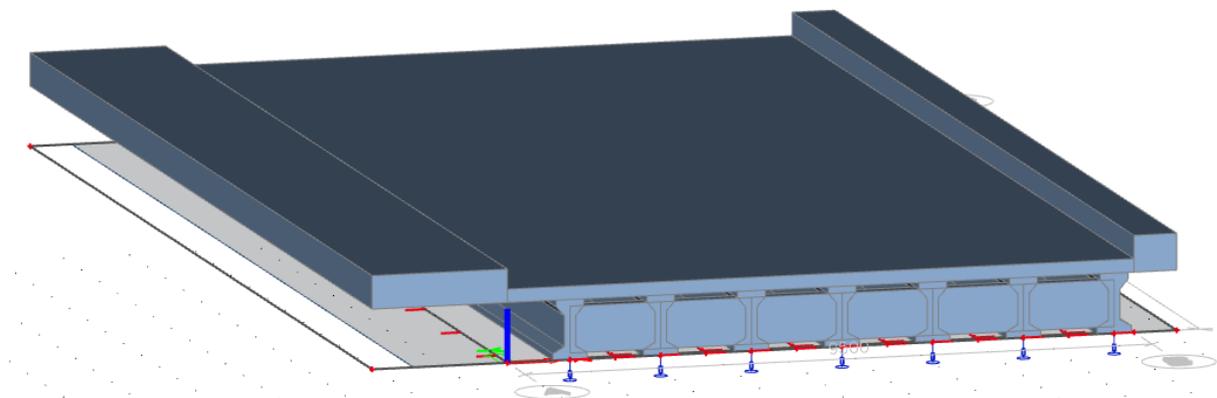


Figura 23: Modelo Final - Puente

Las vigas transversales se modelaron como vigas rectangulares que se conectan a las vigas principales en el centro del alma. Esta simplificación permitió un correcto comportamiento del modelo, en contraste con el intento de modelar las vigas transversales con su forma original, que generó complicaciones en la transmisión de esfuerzos. En el caso de las vigas cabezales, estas fueron modeladas como vigas transversales, ya que su ubicación de por sí representa un área continua de unión entre las vigas principales.

Se plantearon dos posiciones para el vehículo de diseño: una posición para generar el corte máximo, y otra para obtener el momento máximo. Para corte máximo, las cargas posteriores fueron ubicadas a una distancia d desde el inicio del puente. Esta distancia d corresponde al peralte efectivo de la viga principal, y debido a que no se conoce con certeza este valor, se hizo una aproximación del 80% de la altura total de la viga. Con el modelo se verificó la validez de la posición para generar corte máximo, y se confirmó satisfactoriamente. Para el momento máximo, se aplicó el Teorema de Barré, el cual expresa que “para un tren de cargas en una estructura simplemente apoyada, el momento es máximo bajo la carga de un eje cuando este eje y la resultante general del tren de cargas se encuentran en puntos simétricos respecto al punto medio de la luz de carga” (Torres, 2013). Por lo tanto, siguiendo lo indicado por este teorema, la posición del camión de diseño para momento máximo se muestra de manera esquemática en la figura a continuación.

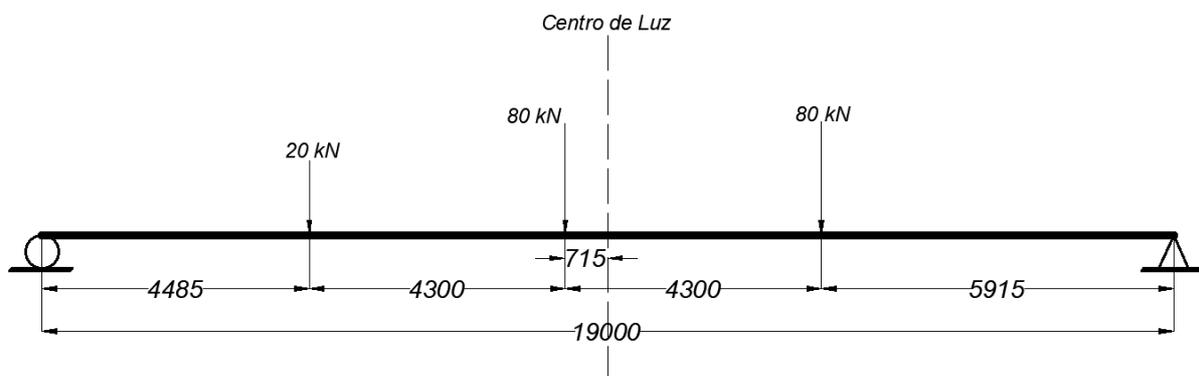


Figura 24: Posición Longitudinal de Camión de Diseño - Momento Máximo

Para optimizar el procesamiento de resultados y obtener únicamente la información más relevante, se asumieron las consideraciones siguientes:

- El análisis es únicamente para los casos en los cuales la carga vehicular se encuentra en los dos carriles;
- Las combinaciones utilizadas corresponden a los resultados más críticos, que implica que los dos vehículos estén en la misma zona a nivel longitudinal;
- La distancia entre los dos ejes posteriores del camión de diseño, que inicialmente debe ser variada en un rango especificado por el código, es fijada mediante el valor menor del rango, ya que cargas más cercanas generan los mayores efectos sobre este tipo de estructuras; y,
- Se realizan un total de 6 análisis diferentes, por vehículo de diseño, resultantes de la combinación de los parámetros de variación discutidos en la *sección 4.2.3*. A estos análisis se les refiere como *protocolos*.

En la *tabla 17* se encuentran los valores de parámetros de variación de cada protocolo.

Tabla 17: Valores de Parámetros de Variación según Protocolo

No. Protocolo	Rigidez de Neopreno [kN/mm]	Módulo de Elasticidad de Vigas Transversales [GPa]
1	475	24.87
2	250	24.87
3	750	24.87
4	475	11.50
5	250	11.50
6	750	11.50

Las posiciones de los vehículos de diseño, que varían tanto longitudinalmente como transversalmente, se encuentran en el **Anexo E**.

4.4. Resultados de Análisis de Posición Crítica

Los resultados obtenidos del análisis del puente se basan únicamente en el efecto de la carga viva del vehículo de diseño; esta consideración concuerda con la naturaleza de los datos experimentales de la prueba de carga, ya que estos también solo toman en cuenta el efecto de la carga viva aplicada.

4.4.1. Camión de Diseño.

El análisis parte del camión de diseño, el cual se espera produzca los mayores valores de momento en el puente. De los 6 protocolos, los valores máximos de corte, momento y desplazamiento se muestran en la *tabla 18*. Los informes completos de resultados se encuentran en el **Anexo F**, en donde se presenta la información crítica por viga principal y para cada combinación de efectos generada. Este anexo se complementa con el **Anexo E**, especialmente en la nomenclatura de las combinaciones y para identificar de manera visual cuales son las posiciones críticas obtenidas.

Tabla 18: Posición Crítica y Valor Máximo Asociado

CORTE [kN]				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
SHEAR11 SHEAR41	194.41	Viga Principal 1	0	m
MOMENTO [kN m]				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMENT1 MOMENT4	157.12	Viga Principal 1	9900	m
DESPLAZAMIENTO [mm]				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMENT1 MOMENT4	-9.20	Viga Principal 1	9300	m

Las combinaciones denominadas *SHEAR11 – SHEAR14* y *MOMENT1 – MOMENT4* son las correspondientes a las posiciones mostradas en las *figuras 25* y *26*. La segunda columna muestra el valor máximo obtenido para cada caso, y las siguientes tres indican la viga

principal correspondiente al valor máximo y su ubicación longitudinal. La ubicación se referencia desde sur a norte.

En los dos casos, la viga más afectada es la *viga principal 1*, que se encuentra resaltada en las figuras a continuación. Cabe mencionar que, tanto para corte como momento, los valores máximos corresponden al protocolo 6.

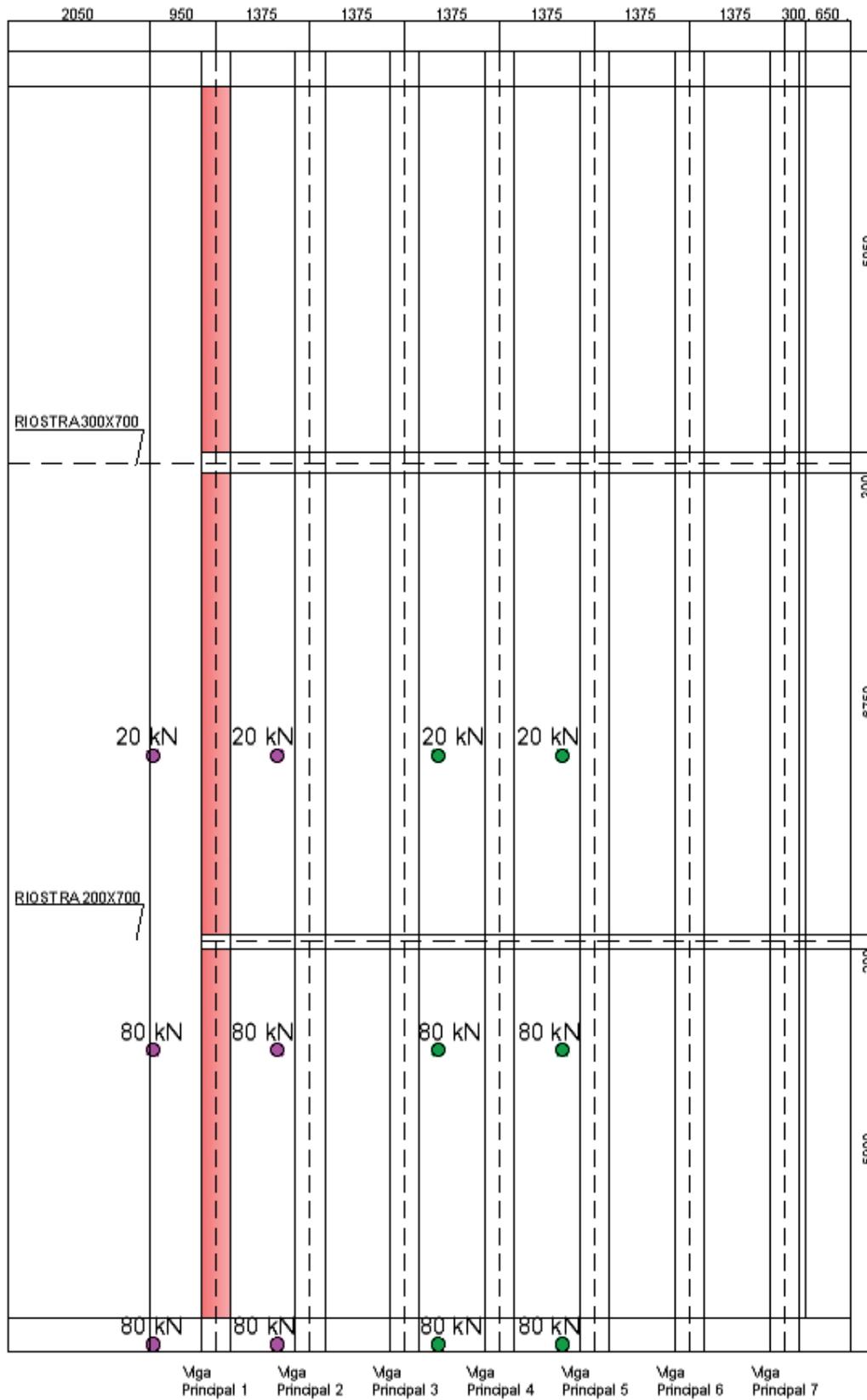


Figura 26: Posiciones para Corte Máximo

Como se indicó anteriormente, el protocolo 6 corresponde al mayor valor de rigidez de neopreno, y al menor de módulo de elasticidad de vigas transversales; en consecuencia, el hecho de que los valores más altos obtenidos del análisis corresponden a este protocolo, constituye un resultado esperado.

Para determinar el nivel de afectación que generó la variación de parámetros en el comportamiento del puente, se realizaron gráficas que muestran la influencia de los parámetros en la respuesta de corte y momento máximo.

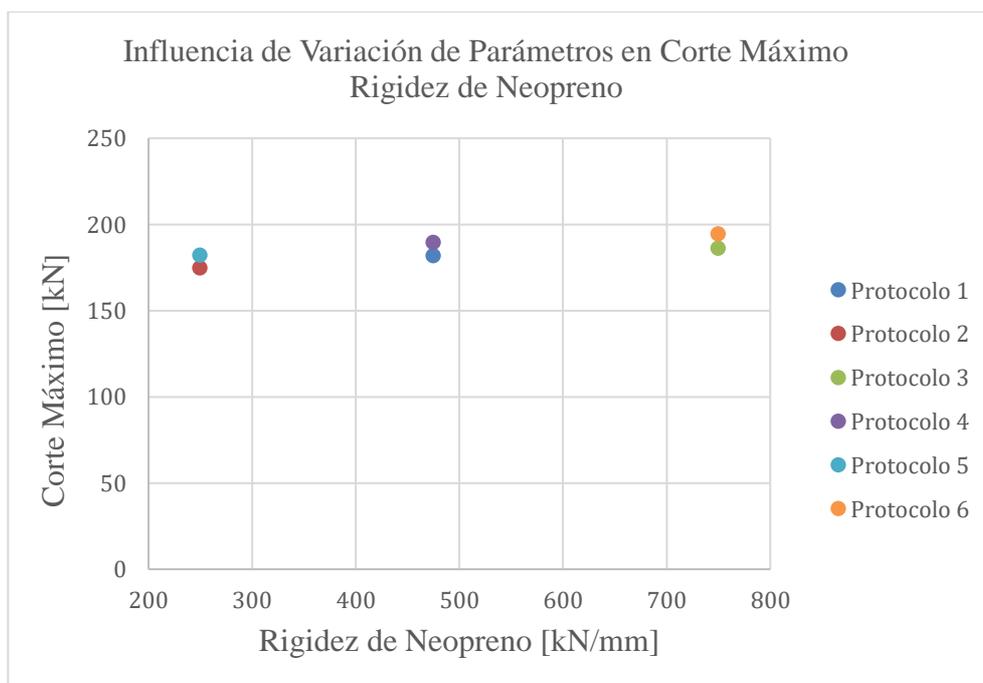


Figura 27: Parámetros en Corte Máximo - Rigidez de Neopreno

En la figura anterior se observa cómo el aumento de la rigidez del neopreno incrementa a su vez la respuesta de corte máximo en el puente, siendo un resultado esperado del análisis. El aumento del corte es un efecto que se presenta realmente en puentes, ya que la rigidez de los neoprenos tiende a aumentar en el tiempo. También se observa la influencia del cambio del módulo de elasticidad de las vigas transversales, la cual es representada por la distancia horizontal que existe entre cada set de puntos donde la rigidez del neopreno es la misma.

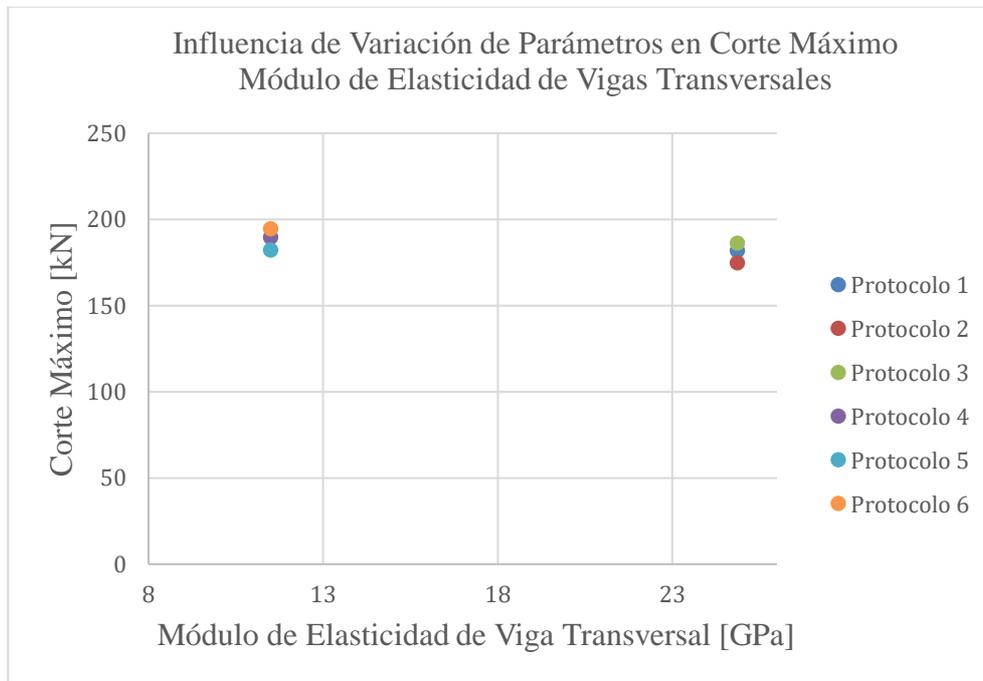


Figura 28: Parámetros en Corte Máximo - Módulo de Elasticidad Vigas Transversales

Igualmente, en la *figura 28* se aprecia que, con el aumento en el módulo de elasticidad de la viga transversal, se disminuye el corte máximo en los elementos del puente. Esto también constituye un resultado esperado, ya que la disminución del módulo de elasticidad implica que la transmisión de cargas a las vigas principales adyacentes también sufrirá una disminución; por lo tanto, la viga tendrá una respuesta mayor a las cargas aplicadas. Además, se observa la influencia de la rigidez de los neoprenos en la respuesta de cortante, representada en las distancias horizontales de los puntos con igual valor de *eje x*. Esta tendencia mostrada en las dos figuras anteriores se repite para los valores de momento máximo, obtenidos del análisis de posición crítica.

El cambio de los parámetros es útil para evaluar si su efecto es representativo en la respuesta del puente, y también para ajustar modelos analíticos en conjunto con información experimental. Sin embargo, si bien el cambio de parámetros generó un orden de magnitud, no fue posible establecer claramente un rango de variación en momento y corte máximo.

4.4.2. Tándem de Diseño.

El objetivo asociado al análisis de la posición crítica con el tándem de diseño se enfocó en dos aspectos: que los valores de corte y momento máximos generados por el tándem no superen a los obtenidos con el camión de diseño; y que la posición crítica sea generada, en ambos casos, por la misma combinación. Los dos aspectos fueron confirmados en el análisis, y los resultados se encuentran en el **Anexo F**.

La posición crítica del tándem y el camión, a nivel longitudinal, no coincide debido a su geometría. Sin embargo, se comprobó que la posición si es la misma a nivel transversal, además que la combinación más crítica también coincide junto con la viga principal más afectada. Con base en esta observación, se determina la existencia de un rango amplio, tanto en geometría como en valor de carga, para que la posición crítica del vehículo de prueba de carga también coincida con la obtenida en este análisis.

5. DISCUSIÓN

En la primera parte de este proyecto se estableció una comparación entre un modelo lineal construido a partir de ecuaciones analíticas, y la respuesta real de vigas preesforzadas antes de la presencia de deformaciones permanentes. Estas ecuaciones analíticas están sujetas a una serie de simplificaciones y suposiciones, que pueden generar dudas sobre su certeza dentro de su rango de aplicabilidad.

Al comparar la deflexión analítica con la deflexión real, lo primero que se encontró fue un amplio rango de diferencia. Este rango se refiere a la variabilidad en diferencia que existe según la viga analizada, lo que implica que en ciertos casos el modelo analítico se acercó a la información experimental, mientras que en otros no. Esta diferencia se ve justificada debido a dos aspectos fundamentales: la distancia entre las dos mediciones experimentales disponibles, y como el promedio de ambas afecta a su vez el contraste con el modelo lineal propuesto.

En el caso de la variabilidad existente en la información experimental, 2 vigas fueron las más afectadas, superando el 10% y 20% según el caso. En las 4 vigas restantes, la diferencia se mantuvo por debajo del 5%. Sin embargo, esta diferencia no generó un distanciamiento entre la medición experimental promedio y la obtenida analíticamente en todos los casos.

Existieron casos donde, a pesar de que la distancia entre mediciones experimentales era importante, al realizar el promedio de los dos potenciómetros su respuesta se acercó al modelo lineal propuesto. La existencia de diferencias entre mediciones es algo común en la experimentación, y es necesario saber discernir que información permite realizar una correcta validación de los modelos propuestos, y que otra afecta de sobremanera a la comparación.

Otro aspecto a recalcar es la presencia de deformaciones permanentes en el ciclo 3 y 4, a pesar de que teóricamente aún se trataba de ciclos dentro del rango lineal. Esto naturalmente generó que el modelo lineal ya no se ajuste correctamente a la información experimental, lo

cual es un resultado esperado; y, por lo tanto, se dejaron a estos ciclos fuera de la evaluación del modelo lineal.

Dentro del rango de aplicabilidad del modelo lineal propuesto, se encontró que para las vigas cuya diferencia entre mediciones experimentales se mantuvo por debajo del 5%, existe una diferencia máxima del 10% entre la deflexión analítica y la real. Esto es un resultado positivo, ya que a pesar de las simplificaciones y suposiciones que recoge el método aplicado, fue posible describir de manera certera el comportamiento de las vigas preesforzadas en su rango lineal.

Con base en lo aprendido en esta investigación, se destaca la necesidad de desarrollar un modelo no lineal de las vigas preesforzadas ensayadas, el cual permita describir el comportamiento de las vigas no solo dentro del rango lineal, sino también en presencia de deformaciones permanentes. Este proceso es factible debido a que se conoce la distribución de refuerzo en las vigas y los materiales utilizados en su construcción.

En la segunda parte de la presente investigación se realizó un modelo en elementos finitos del puente sobre el Río Lili, el cual será sometido a una prueba de carga de diagnóstico. Con base en el modelo, se obtuvo la posición crítica de los vehículos de diseño. Debido a que los planos del puente no están disponibles, se plantearon parámetros de variación en la rigidez de los neoprenos y el módulo de elasticidad de las vigas transversales, para medir su afectación en la respuesta global del puente.

Para los parámetros se plantearon valores que forman un cerco amplio de variación. Esto permitió observar una tendencia lógica en los cambios de la respuesta del puente, lo que incluye un incremento en corte y momento consecuente al incremento en la rigidez de los neoprenos, y una disminución en estos debido al aumento del módulo de elasticidad de las vigas transversales. Sin embargo, al cuantificar esta influencia, se encontró que no es significativa.

En relación con la posición crítica, se observó que, tanto para el camión como para el tándem de diseño, esta es igual en un sentido transversal. En el caso de corte máximo, la posición de las cargas posteriores también coincide en su punto de aplicación a nivel longitudinal; para momento, debido a la geometría de los vehículos, ya no se relacionan. También se encontró que la viga principal más afectada es la misma en ambos casos.

El hecho de que la combinación más crítica, tanto para corte como momento, de los dos vehículos de diseño coincida es un resultado positivo al aplicarlo a la prueba de carga de diagnóstico. En el caso que no se logre realizar este análisis con los vehículos de carga que serán utilizados, se conoce que existe un rango amplio, tanto en geometría como en valor de carga, para que la posición crítica de los vehículos de carga también coincida con la determinada en esta investigación.

Como se señaló anteriormente, la aplicación de modelos en elementos finitos tiene varios objetivos dentro de la preparación de las pruebas de carga, siendo una de estas la definición de la ubicación de instrumentación según posiciones de interés. Con base en la posición crítica obtenida en el análisis, se destaca la necesidad de instrumentación en la viga más afectada, y en zonas cercanas a donde se ubicarán los vehículos de carga. Sin embargo, debido a que el objetivo de la prueba de carga de diagnóstico es obtener respuestas reales que permitan a su vez ajustar modelos analíticos, es necesario que parte de la instrumentación esté uniformemente esparcida por todo el puente para obtener su distribución de esfuerzos. Con base en lo aprendido en el análisis del puente sobre el Río Lili, el siguiente paso es continuar mejorando modelos, lo que incluye modelar otros elementos secundarios y no estructurales. La razón es que se ha verificado que estos elementos aportan al comportamiento estructural de puentes. Debido a que no se conoce la distribución de acero ni los materiales utilizados en la construcción de este puente, el desarrollo de un modelo no lineal se vuelve complejo. Sin embargo, modelos lineales a detalle pueden ser un buen punto

de partida para realizar el ajuste correspondiente en función de la respuesta real del puente, la cual será obtenida en el ensayo de carga de diagnóstico.

6. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

En el análisis aislado de vigas preesforzadas, se propone ampliar la presente investigación, incorporando la modelación no lineal, lo que permitirá comparar la totalidad de los ciclos de carga aplicados en la viga. El siguiente paso será definir los parámetros que más afectan la capacidad de carga de las vigas preesforzadas, y su incertidumbre asociada.

Respecto a la preparación de la prueba de carga del puente, una vez que el vehículo de carga haya sido definido, se propone realizar un análisis de la posición crítica con las cargas referentes al vehículo, para comprobar si se mantiene la obtenida en la modelación.

Es necesario considerar otros parámetros de variación (propiedades del hormigón del tablero y de las vigas principales, del acero, etc.), cuya influencia en el modelo puede ser más relevante que los parámetros escogidos en la presente investigación. Además, es importante incluir elementos secundarios y no estructurales para medir su aporte al comportamiento del puente. Con esto se puede trabajar con varios niveles de detalle en los modelos y los parámetros asociados, para establecer comparaciones con las mediciones obtenidas en la prueba.

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente trabajo, denominado Proyecto Específico está relacionado con la investigación doctoral (Proyecto Principal) “*Cuantificación de la Incertidumbre en la Evaluación de la Capacidad de Carga de Puentes de Vigas Preesforzadas incluyendo Monitoreo de Salud Estructural*”, y se enfoca en el análisis de la respuesta estática de puentes de vigas preesforzadas.

Las principales actividades desarrolladas y los objetivos propuestos del Proyecto Específico son: el análisis seccional y estimación de la deflexión de las vigas preesforzadas; la comparación entre la estimación de deflexión con los resultados de las mediciones experimentales; la modelación de la superestructura del puente sobre el río Lili; y, la determinación de la posición crítica de la carga generada por los vehículos de diseño. En el desarrollo del trabajo se utilizó cálculos manuales, programación en Matlab y el programa SCIA Engineer.

En relación con el análisis estático de vigas preesforzadas, las conclusiones principales son las siguientes:

- El cálculo de la deflexión en el centro de la luz de las vigas preesforzadas, realizado mediante cálculos manuales y contrastado con un modelo desarrollado en el software SCIA, mostró diferencias que no exceden el 1.4%. Por lo que los dos métodos son útiles para el análisis de los resultados experimentales, dentro del rango lineal y utilizando secciones brutas.
- Para el desplazamiento, se concluye que para los 2 primeros ciclos del protocolo de carga (carga establecida en función del tiempo), el modelo lineal genera resultados muy cercanos a los valores experimentales. Este resultado es importante en la medida de que la modelación lineal, en su rango de aplicabilidad, genera resultados

razonables y permite el ahorro de recursos computacionales en comparación con modelos no lineales en elementos finitos.

- La rigidez secante sin daño, cuya comparación se realizó con base en los resultados experimentales y al cálculo manual (con un único valor para las 6 vigas), presentó un rango relativamente amplio de diferencia, variable entre 0.1% y 20%, aspecto que puede relacionarse con la diferencia entre las mediciones experimentales disponibles y la incertidumbre de los datos utilizados en el cálculo del momento de agrietamiento. Como se discutió en la *sección 3.6.3*, la diferencia en las dos mediciones experimentales es representativa en varios casos, y ya que el valor utilizado es el promedio de ambas mediciones, esto genera diferencias altas en el desplazamiento, y, en consecuencia, en la rigidez secante. Sin embargo, ocurrió que, en ciertas vigas, el valor promedio generó un mejor acercamiento al modelo lineal, y es por eso por lo que el porcentaje de diferencia se vio disminuido.

Respecto a los resultados obtenidos en el análisis estático de puentes con vigas preesforzadas, las conclusiones principales son las siguientes:

- Se determinó que la posición crítica, tanto para el camión como para el tándem de diseño, es SHEAR11 – SHEAR41 para generar el corte máximo, y MOMENT1 - MOMENT4 para el momento máximo (ver *figuras 25 y 26*). Puesto que la posición crítica es la misma a nivel transversal, para los dos vehículos de diseño, esta condición otorga un rango amplio, tanto en geometría como en valor de carga, para que la posición crítica del vehículo de prueba de carga también coincida con la obtenida en este análisis.
- Debido a la incertidumbre en las propiedades de los materiales del puente modelado, por la falta de los planos y especificaciones de diseño, se optó por variar el módulo de elasticidad de las vigas transversales y la rigidez de los neoprenos, para evaluar su

influencia en la respuesta del puente ante cargas aplicadas. Como resultado se obtuvo un orden de magnitud de momento, corte y desplazamiento constante, lo que indica que no existió un rango representativo de variación.

- Con base en el análisis del puente, se observó que las posiciones más importantes para la colocación de instrumentación serán la viga más afectada por las cargas (ver *figura 25 y 26*), y las vigas cercanas al vehículo de carga. Dependiendo de si se está midiendo corte o momento, la ubicación de los sensores a nivel longitudinal variará. También se destaca la necesidad de dispersar una serie de sensores en toda el área del puente, para poder medir la distribución de esfuerzos globalmente. Esta información es fundamental para poder ajustar modelos analíticos, que es el objetivo principal de las pruebas de carga de diagnóstico.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute. (2014). Requisitos para Reglamento para Concreto Estructural ACI 318S - 14. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS. (2014). Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14. Bogotá D.C.
- Castellanos, S. (2019). Cuantificación de la Incertidumbre en la Evaluación de la Capacidad de Carga de Puentes de Vigas Preesforzadas incluyendo Monitoreo de Salud Estructural. Propuesta de Investigación Doctoral, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- El Universo. (7 de diciembre de 2010). Puente Las Monjas colapsó durante colocación de pilotes. El Universo. Obtenido de <https://www.eluniverso.com/2010/12/07/1/1445/puente-monjas-colapso-durante-colocacion-pilotes.html>
- El Universo. (25 de abril de 2020). Alcadesa de Colimes, en Guayas, dice que hace 8 meses alertó del deterioro de puente. El Universo. Obtenido de <https://www.eluniverso.com/noticias/2020/04/25/nota/7822644/alcaldesa-colimes-guayas-dice-que-hace-8-meses-alerto-deterioro>
- Ensink, S. (en proceso). System Behavior in Prestressed Concrete T-Beam Bridges. Tesis Doctoral, Delft University of Technology, Delft.
- Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7). (s.f.). Universidad del Valle, Cali.
- Lantsoght, E. (2017). Pruebas de carga en puentes de hormigón armado. 1er Congreso Iberoamericano de Ingeniería Civil. Obtenido de <https://es.slideshare.net/elantsoght/pruebas-de-carga-en-puentes-de-hormigon-armado>
- Lantsoght, E., Koekkoek, R., Yang, Y., Veen, C. v., Boer, A. d., & Hordijk, D. (2017). Proof load testing of the viaduct de Beek. 39th IABSE Symposium - Engineering the Future. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/320024690_Proof_load_testing_of_the_viaduct_De_Beek
- MathWorks. (2020). *Matlab* (Versión R2020a). Windows. Natick: MathWorks.
- Mattock, A. (1979). Flexural Strength of Prestressed Concrete Sections by Programmable Calculator. *PCI Journal*, 24, 32 - 54.
- Muñoz, E., & Gómez, D. (2011). Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

- Nawy, E. (2010). *Prestressed Concrete - A Fundamental Approach*. New Jersey: Prentice Hall - Pearson.
- Nemetschek Group. (2019). *SCIA Engineer* (Versión 19.1). Windows. Hasselt: SCIA.
- Nilson, A. (1987). *Design of Prestressed Concrete*. John Wiley & Sons.
- Rodríguez, S. (2015). Diagramas momento-curvatura para secciones de hormigón armado. *Anales de Edificación*, 1-2. Obtenido de <http://oa.upm.es/56856/1/3101-11466-2-PB.pdf>
- Skogman, B., Tadros, M., & Grasmick, R. (1988). Flexural Strength of Prestressed Concrete Members. *PCI Journal*, 33, 96-123.
- Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A., & Jensen, J. J. (1987). Mechanical properties of high-strength concrete and applications in design. *Proc. Symp. Utilization of High-Strength Concrete*.
- Torres, E. (2013). *Diseño de Puentes - Interpretación del código AASHTO*. Quito: Abya - Yala.
- Transportation Research Board. (2019). *Primer on Bridge Load Testing*. Transportation Research Circular(E-C257). Obtenido de <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec257.pdf>
- U.S. Department of Transportation. (2016). *Deficient Bridges by Superstructure Material*. Obtenido de <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi/no10/mat16.cfm#a>
- Wang, C., & Zhang, H. (2020). A probabilistic framework to optimize the target proof load for existing bridges. *Innovative Infrastructure Solutions*. doi:<https://doi.org/10.1007/s41062-020-0261-9>

9. ANEXOS

9.1. ANEXO A: Tablas

9.2. ANEXO B: Figuras

9.3. ANEXO C: Plano de Vigas Preesforzadas

9.4. ANEXO D: Plano de Levantamiento de Puente sobre río Lili

9.5. ANEXO E: Plano de Posiciones para Análisis de Posición Crítica

9.6. ANEXO F: Informe de Resultados de Análisis de Posición Crítica

9.7. ANEXO G: Recomendaciones para Modelación en SCIA Engineer

ANEXO A

TABLAS

Contenido

Cuadro 19: Cargas Aplicadas - Viga Tipo I # 2.....	78
Cuadro 20: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo I # 2.....	78
Cuadro 21: Cargas Aplicadas - Viga Tipo II # 1	78
Cuadro 22: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo II # 1	78
Cuadro 23: Cargas Aplicadas - Viga Tipo II # 2	78
Cuadro 24: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo II # 2	79
Cuadro 25: Cargas Aplicadas - Viga Tipo III # 1	79
Cuadro 26: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo III # 1	79
Cuadro 27: Cargas Aplicadas - Viga Tipo III # 2.....	79
Cuadro 28: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo III # 2.....	79
Cuadro 29: Rigidez Secante Experimental	80

Cuadro 19: Cargas Aplicadas - Viga Tipo I # 2

Variable	Valor	Unidades
Carga Viva	39.240	kN
Fuerza Efectiva de Postensado	351.00	kN

Cuadro 20: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo I # 2

Carga	Desplazamiento	Unidades
Carga Muerta	1.505	mm
Carga de Postensado	-3.472	mm
Carga Viva	8.606	mm
Carga Total	6.638	mm

Cuadro 21: Cargas Aplicadas - Viga Tipo II # 1

Variable	Valor	Unidades
Carga Viva	29.626	kN
Fuerza Efectiva de Postensado	262.81	kN

Cuadro 22: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo II # 1

Carga	Desplazamiento	Unidades
Carga Muerta	1.505	mm
Carga de Postensado	-2.496	mm
Carga Viva	6.498	mm
Carga Total	5.506	mm

Cuadro 23: Cargas Aplicadas - Viga Tipo II # 2

Variable	Valor	Unidades
Carga Viva	29.724	kN
Fuerza Efectiva de Postensado	264.38	kN

Cuadro 24: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo II # 2

Carga	Desplazamiento	Unidades
Carga Muerta	1.505	mm
Carga de Postensado	-2.511	mm
Carga Viva	6.519	mm
Carga Total	5.513	mm

Cuadro 25: Cargas Aplicadas - Viga Tipo III # 1

Variable	Valor	Unidades
Carga Viva	19.130	kN
Fuerza Efectiva de Postensado	244.27	kN

Cuadro 26: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo III # 1

Carga	Desplazamiento	Unidades
Carga Muerta	1.505	mm
Carga de Postensado	0.000	mm
Carga Viva	4.196	mm
Carga Total	5.700	mm

Cuadro 27: Cargas Aplicadas - Viga Tipo III # 2

Variable	Valor	Unidades
Carga Viva	19.620	kN
Fuerza Efectiva de Postensado	264.38	kN

Cuadro 28: Desplazamiento por Tipo de Carga - Viga Tipo III # 2

Carga	Desplazamiento	Unidades
Carga Muerta	1.505	mm
Carga de Postensado	0.000	mm
Carga Viva	4.303	mm
Carga Total	5.808	mm

Cuadro 29: Rigidez Secante Experimental

Viga	Viga I # 1		Viga I # 2		Viga II # 1		Viga II # 2		Viga III # 1		Viga III # 2	
Ciclo	kN/mm	%	kN/mm	%	kN/mm	%	kN/mm	%	kN/mm	%	kN/mm	%
1	9.27	100	9.52	100	8.40	100	8.47	100	9.10	100	7.42	100
2	8.99	97	9.19	96	8.32	99	8.22	97	9.06	100	7.42	100
3	8.38	90	7.63	80	7.42	88	7.76	92	8.36	92	7.11	96
4	8.57	92	8.01	84	7.55	90	7.91	93	8.04	88	7.13	96
5	7.13	77	6.23	65	6.09	73	5.61	66	7.59	83	6.12	82
6	7.37	80	6.14	64	6.33	75	5.81	69	7.71	85	6.19	83
7	5.41	58	4.08	43	4.22	50	3.31	39	5.57	61	4.12	56

ANEXO B

FIGURAS

Contenido

Figura 29: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo I # 2	82
Figura 30: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo II # 1	82
Figura 31: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo II # 2	83
Figura 32: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo III # 1	83
Figura 33: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo III # 2	84
Figura 34: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo I # 2	84
Figura 35: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo II # 1	85
Figura 36: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo II # 2	85
Figura 37: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo III # 1	86
Figura 38: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo III # 2	86
Figura 39: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo I # 2	87
Figura 40: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo II # 1	87
Figura 41: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo II # 2	88
Figura 42: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo III # 1	88
Figura 43: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo III # 2	89
Figura 44: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo I # 2	89
Figura 45: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo II # 1	90
Figura 46: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo II # 2	90
Figura 47: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo III # 1	91
Figura 48: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo III # 2	92

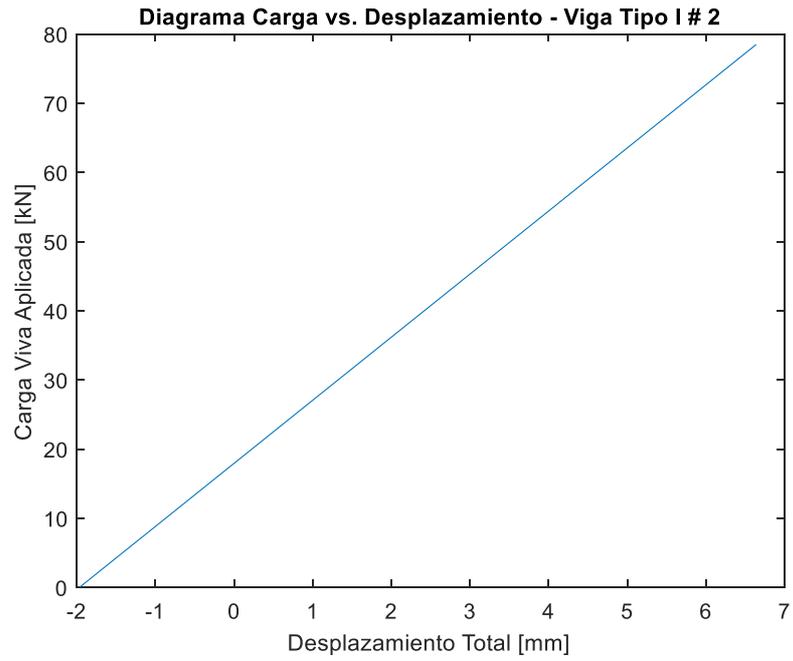


Figura 29: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo I # 2

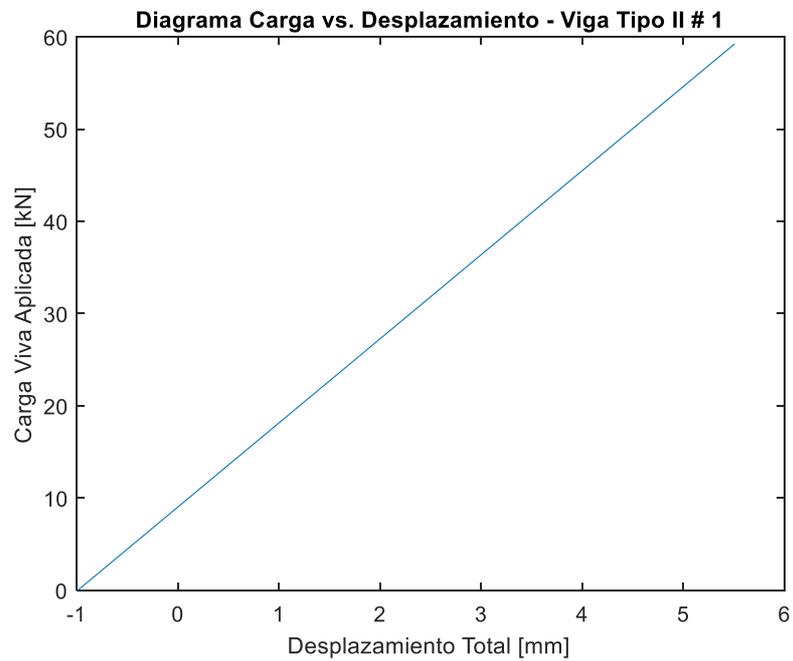


Figura 30: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo II # 1

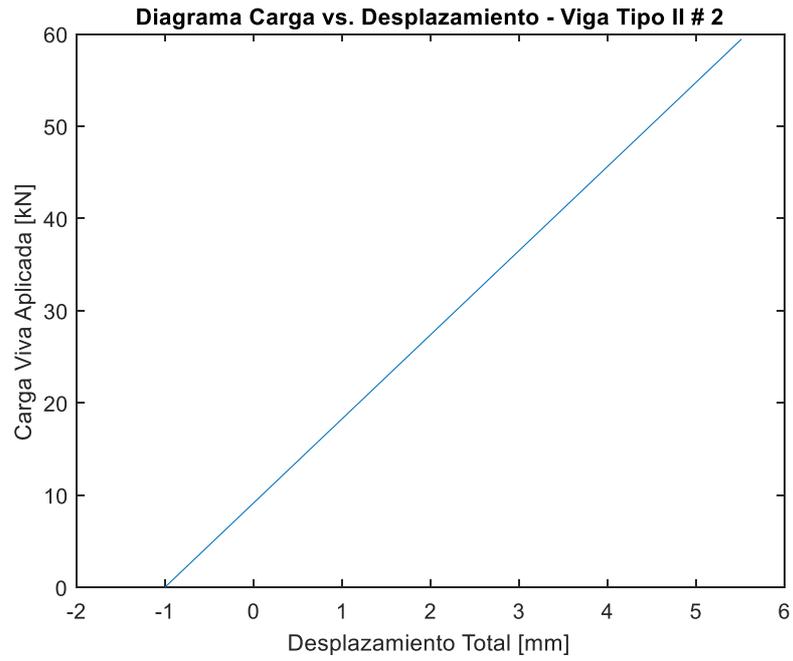


Figura 31: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo II # 2

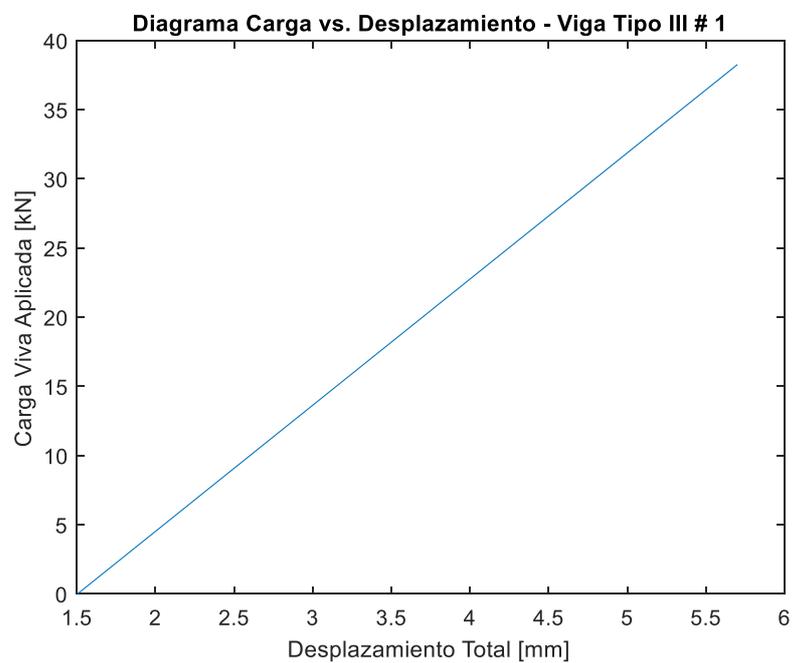


Figura 32: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo III # 1

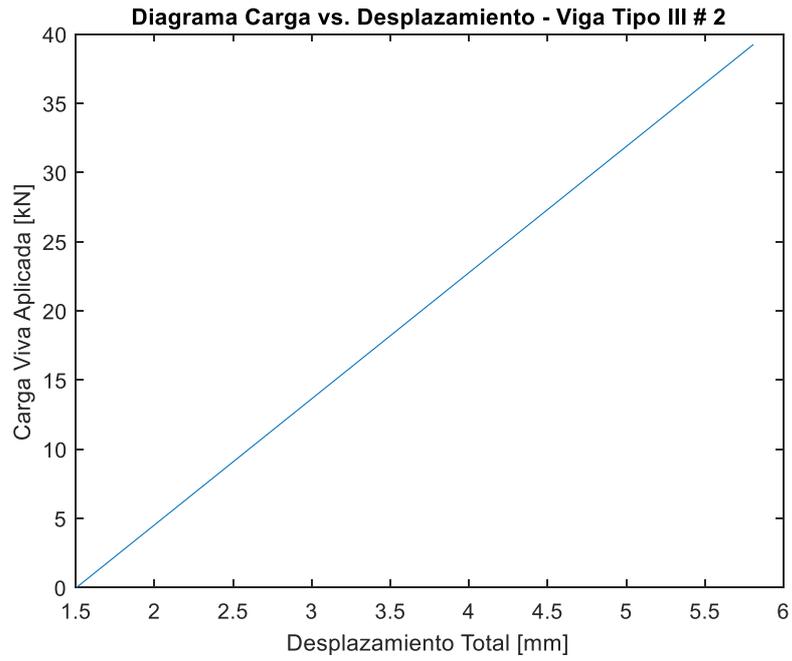


Figura 33: Diagrama Carga vs. Desplazamiento - Viga Tipo III # 2

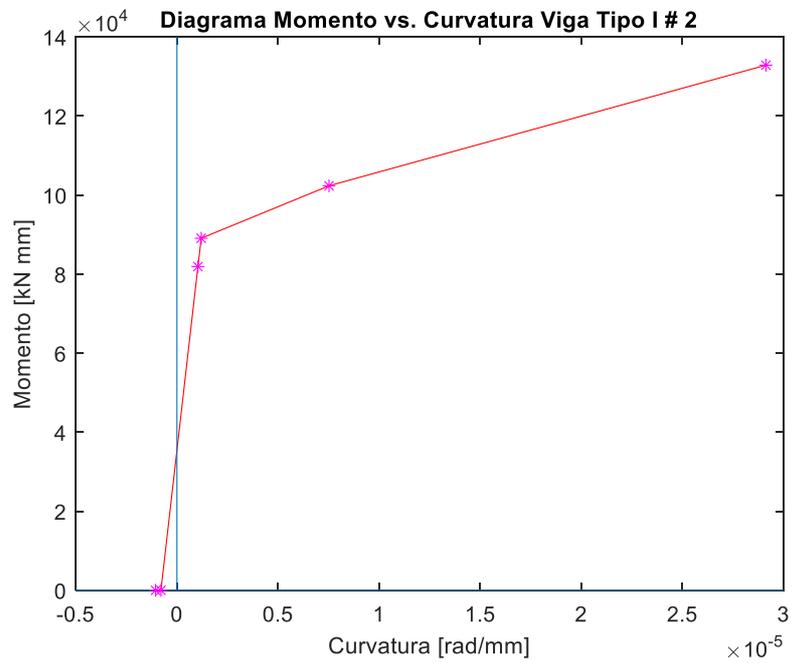


Figura 34: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo I # 2

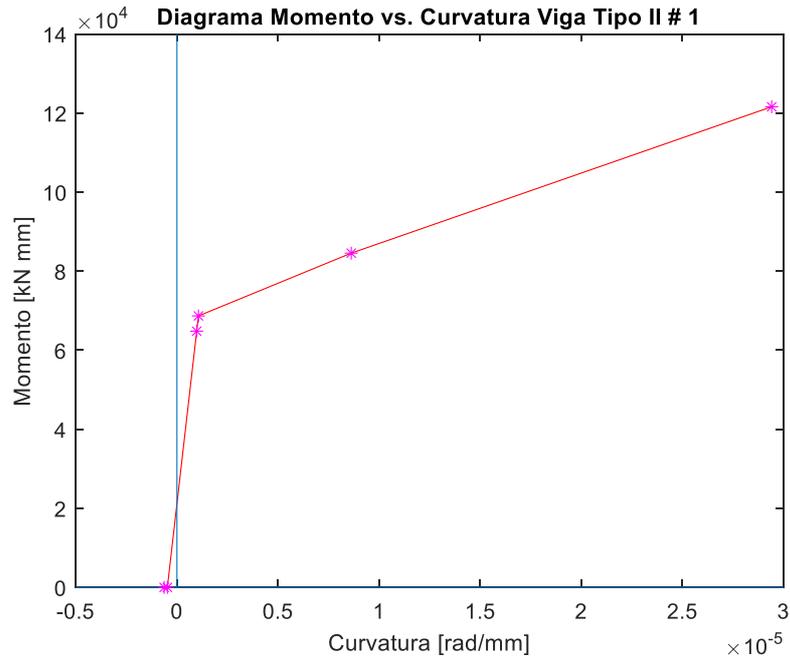


Figura 35: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo II # 1

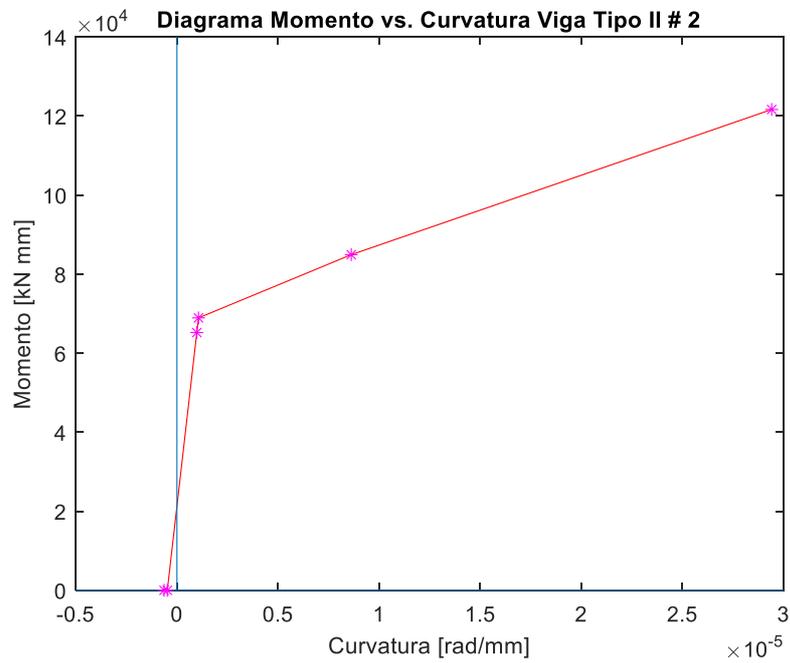


Figura 36: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo II # 2

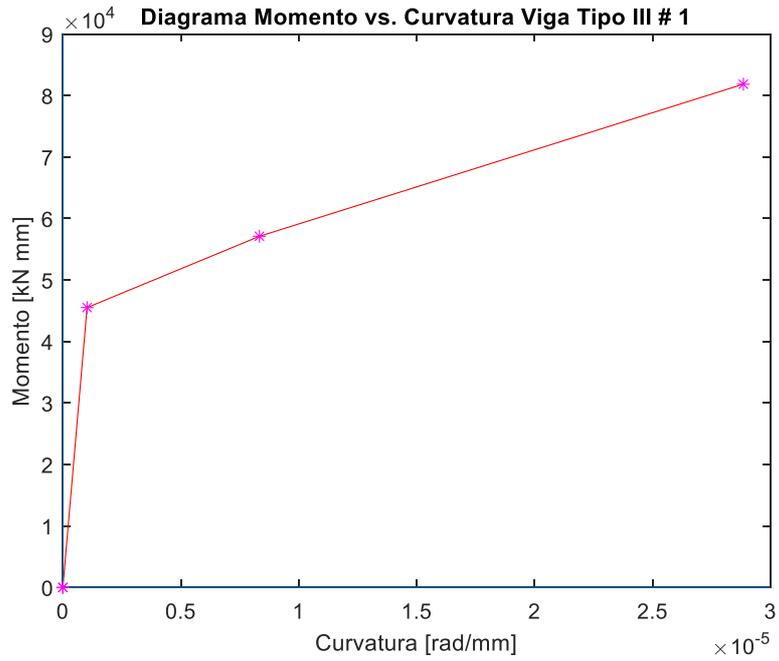


Figura 37: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo III # 1

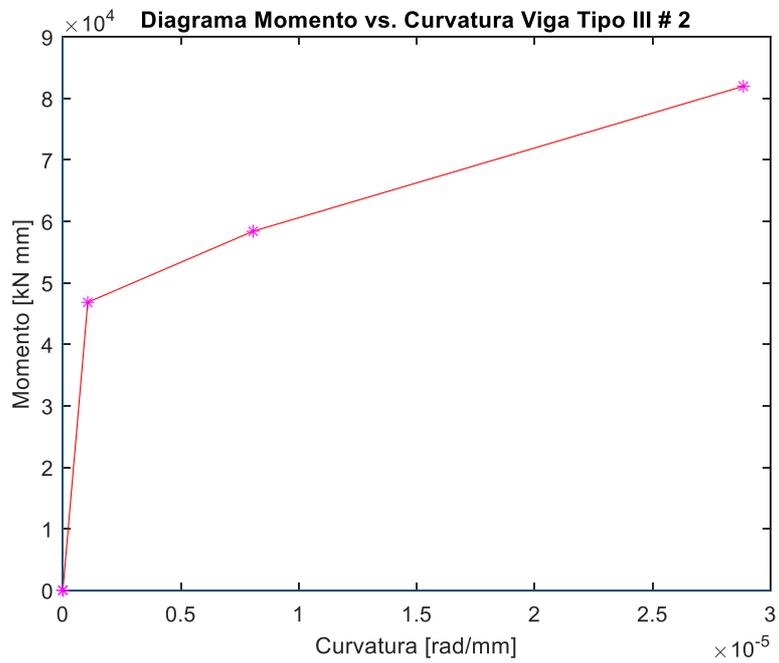


Figura 38: Diagrama Momento vs. Curvatura - Viga Tipo III # 2

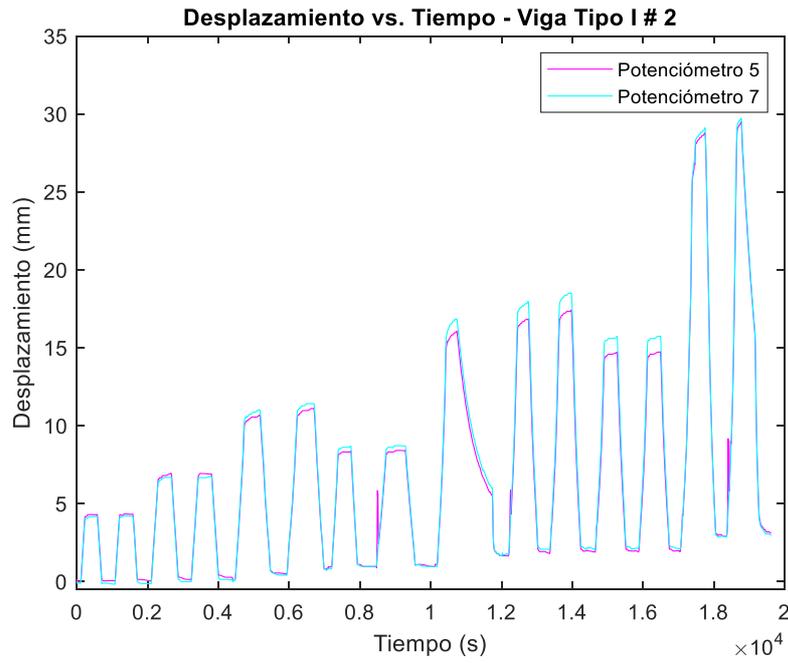


Figura 39: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo I # 2

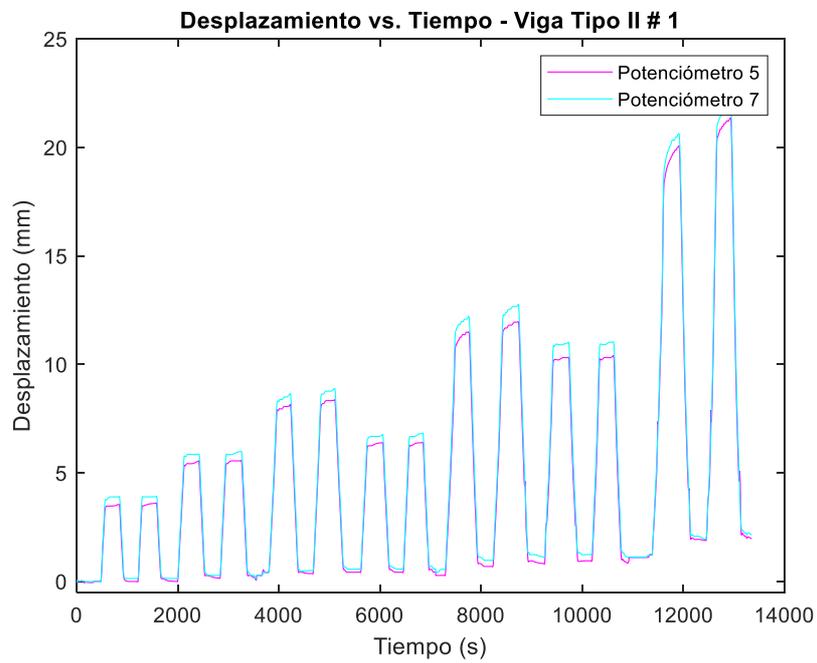


Figura 40: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo II # 1

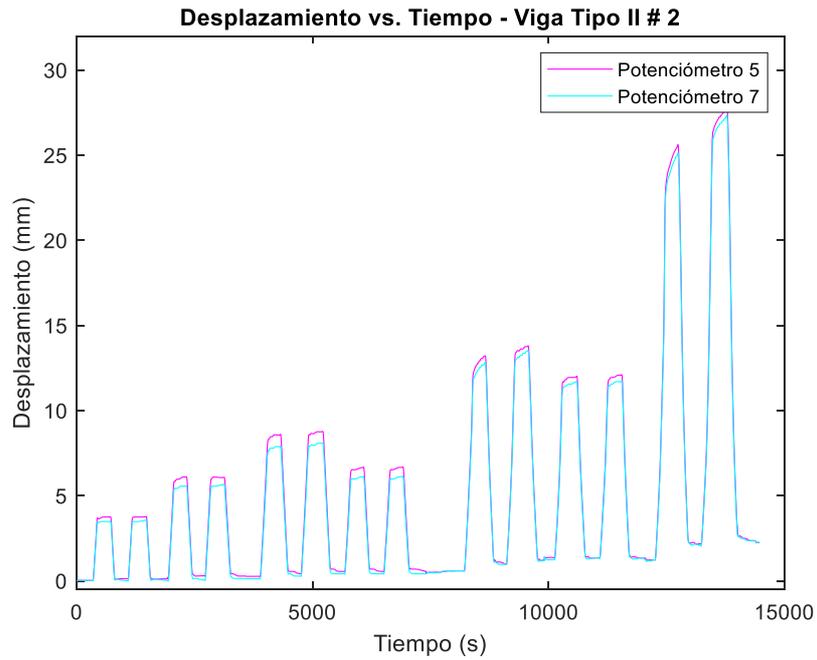


Figura 41: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo II # 2

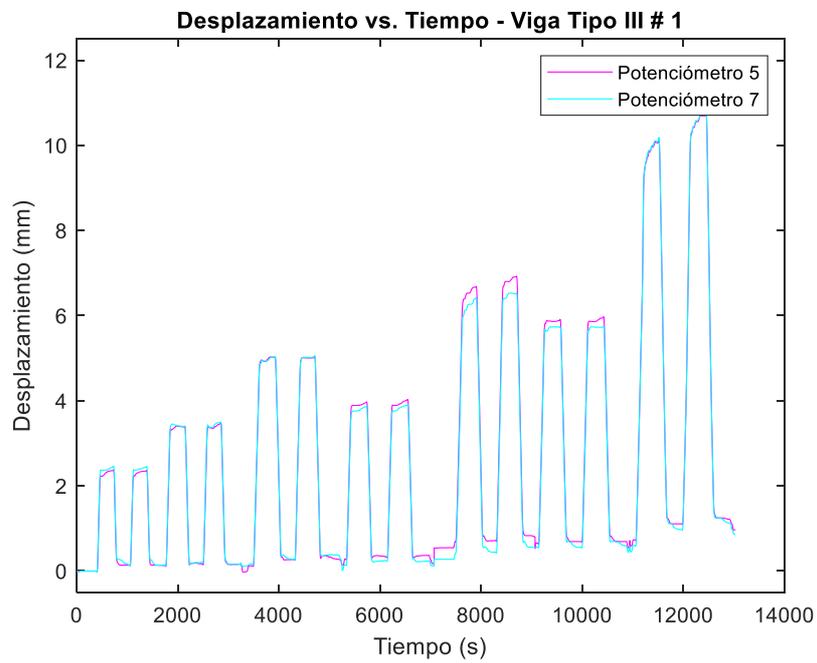


Figura 42: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo III # 1

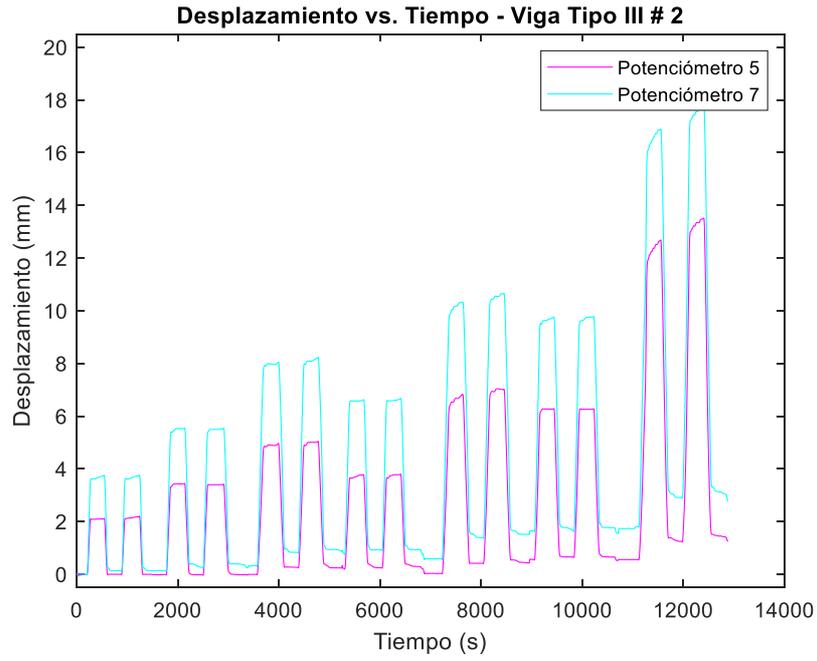


Figura 43: Resultados Experimentales Desplazamiento vs. Tiempo - Viga Tipo III # 2

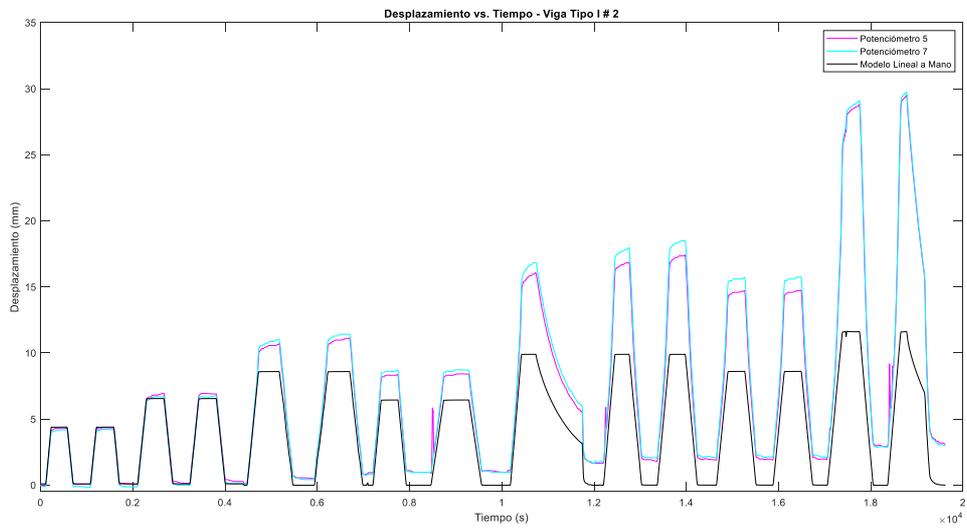


Figura 44: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo I # 2

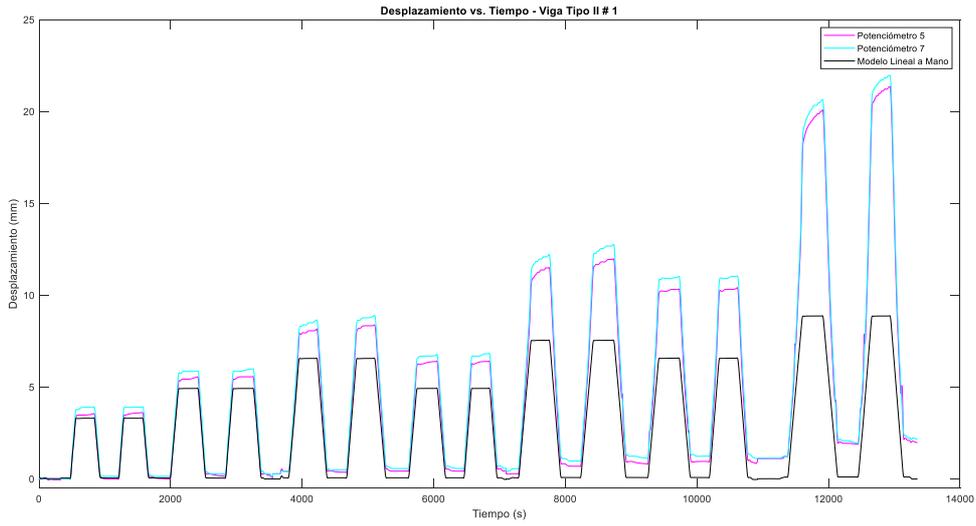


Figura 45: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo II # 1

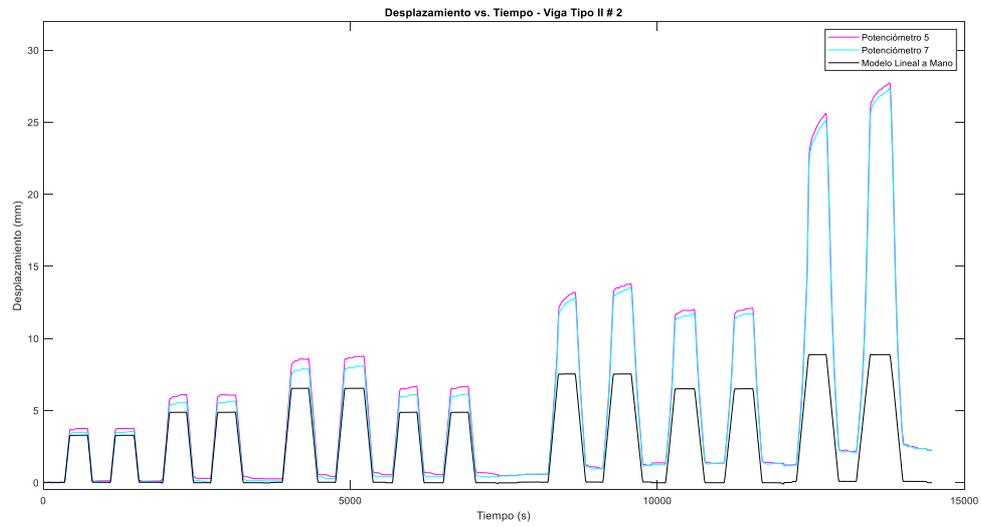


Figura 46: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo II # 2

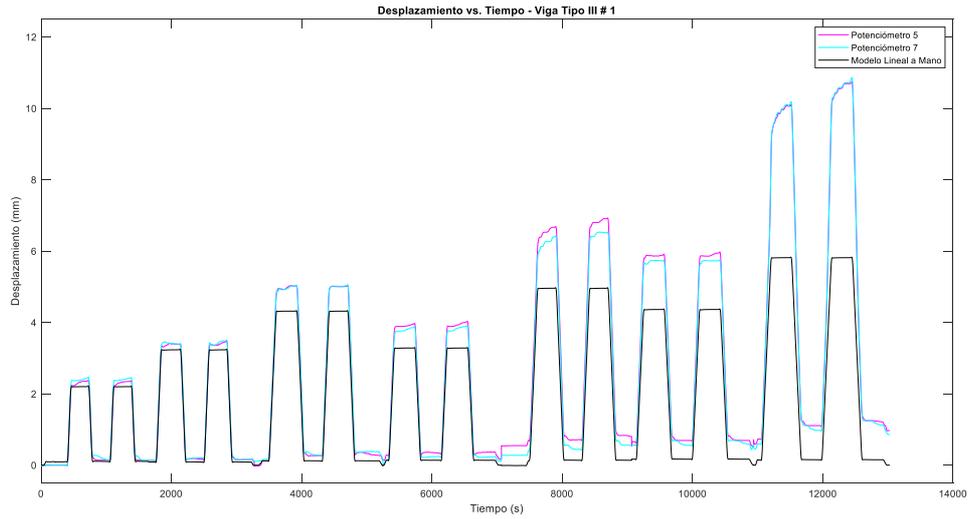


Figura 47: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo III # 1

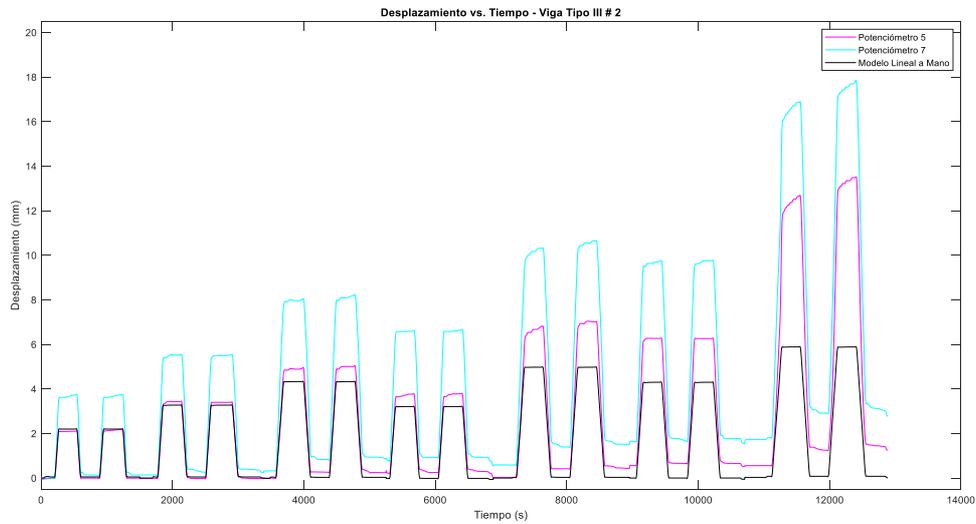


Figura 48: Diagrama Desplazamiento vs. Tiempo – Viga Tipo III # 2

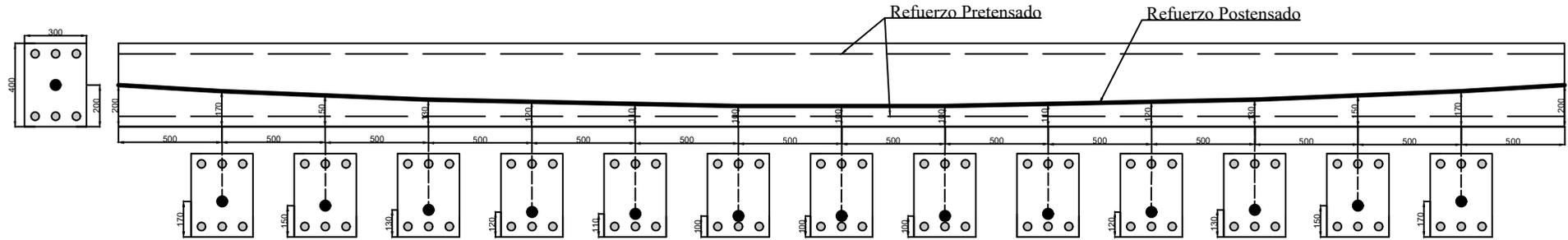
ANEXO C

PLANO DE VIGAS PREESFORZADAS

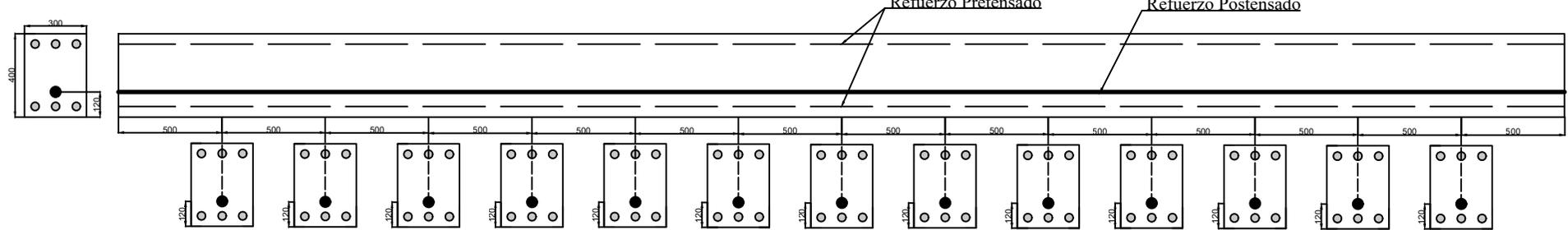
Contenido

1. Plano de Vigas Preesforzadas ensayadas en la Universidad del Valle, Colombia

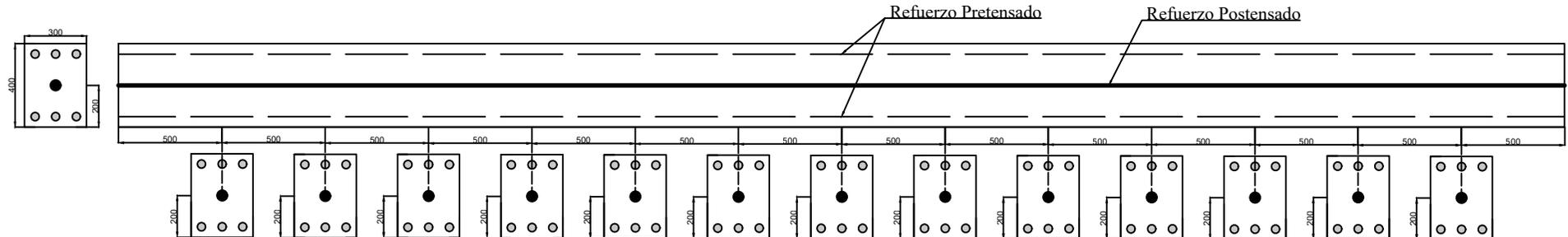
VIGA TIPO 1



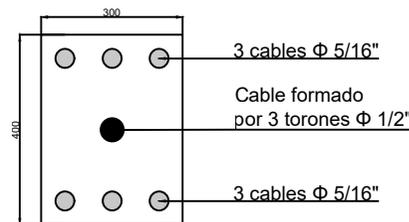
VIGA TIPO 2



VIGA TIPO 3



DETALLE DE REFUERZO



Notas:

- Las medidas indicadas en el presente plano están en milímetros [mm].
- La longitud total de las vigas es de 7000 milímetros.
- La longitud entre apoyos es de 6500 milímetros, que corresponde a la longitud efectiva para cálculos.

Materiales:

- Resistencia de hormigón de viga ($f'c$): 35 E -3 kN/mm².
- Resistencia última de acero de pretensado (fpu): 1.72 kN/mm².
- Resistencia última de acero de postensado (fpu): 1.86 kN/mm².

Nota:
El presente plano está basado en información proporcionada por el Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7), de la Universidad del Valle.

Item#	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Filename
Sebastián Castellanos	-	-	-
Emilia Andrade			Vigas Preesforzadas
1			Scale 1:30
Edition 1			Sheet 1/1

ANEXO D

PLANO DE LEVANTAMIENTO DE PUENTE SOBRE RIO

LILI

Contenido

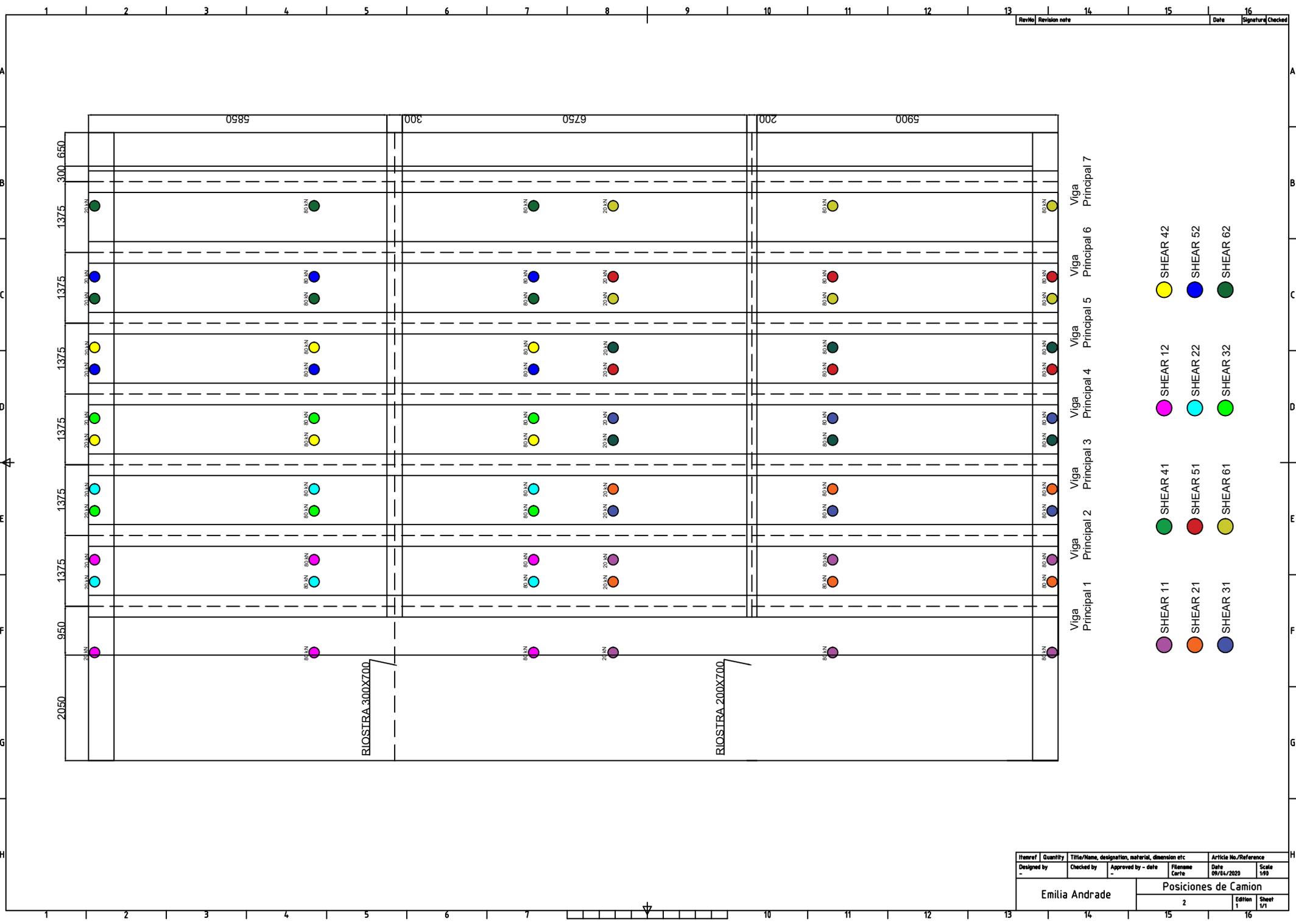
1. Plano de Levantamiento realizado al puente sobre el río Lili, Colombia

ANEXO E

PLANOS DE POSICIONES PARA ANÁLISIS DE POSICIÓN CRÍTICA – CAMIÓN Y TÁNDEM DE DISEÑO

Contenido

1. Posiciones de Corte Máximo – Camión de Diseño
2. Posiciones de Momento Máximo – Camión de Diseño
3. Posiciones de Corte y Momento Máximo – Tándem de Diseño

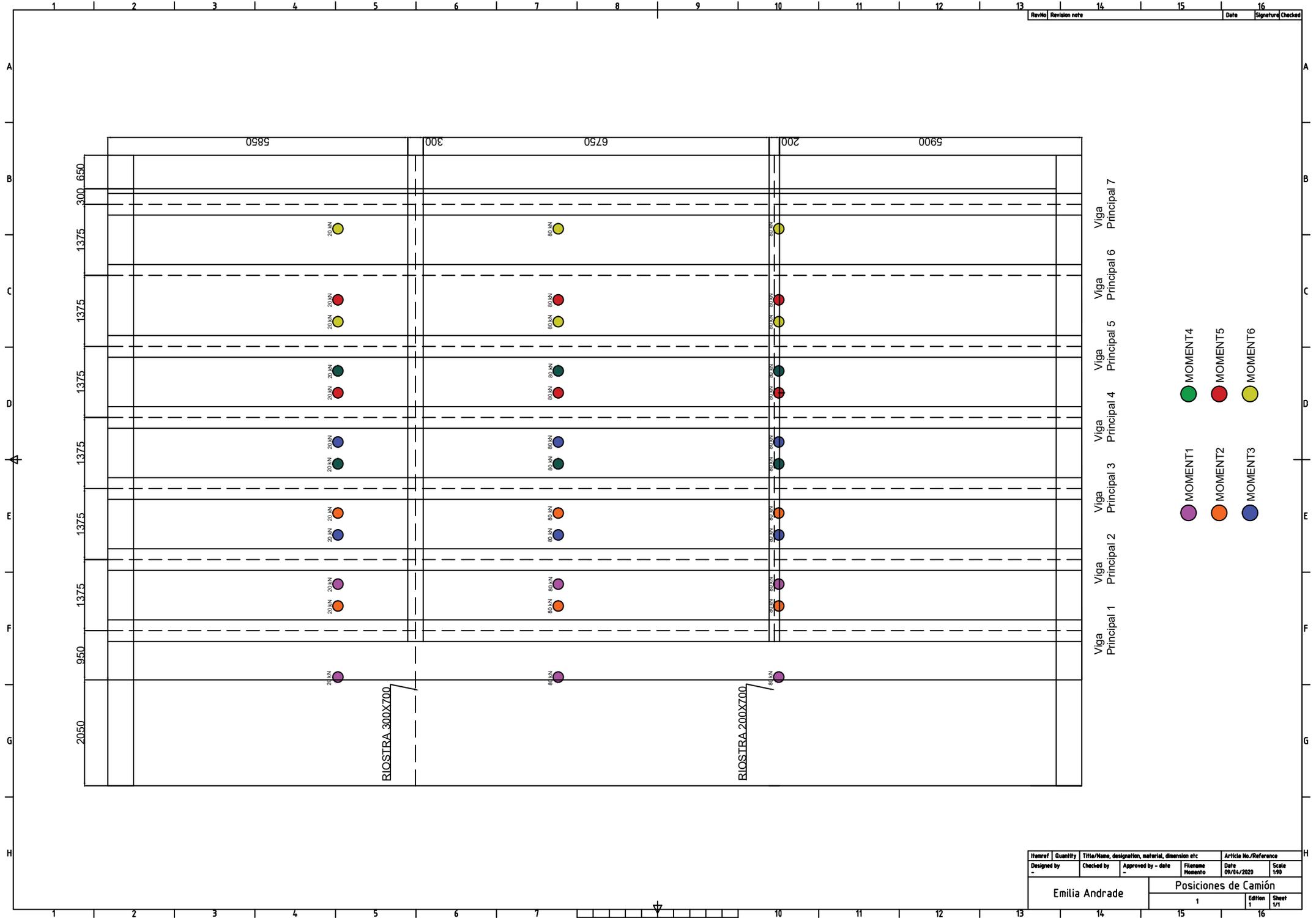


Rev/No	Revision note	Date	Signature	Checked
--------	---------------	------	-----------	---------

- SHEAR 11
- SHEAR 21
- SHEAR 31
- SHEAR 41
- SHEAR 51
- SHEAR 61
- SHEAR 12
- SHEAR 22
- SHEAR 32
- SHEAR 42
- SHEAR 52
- SHEAR 62

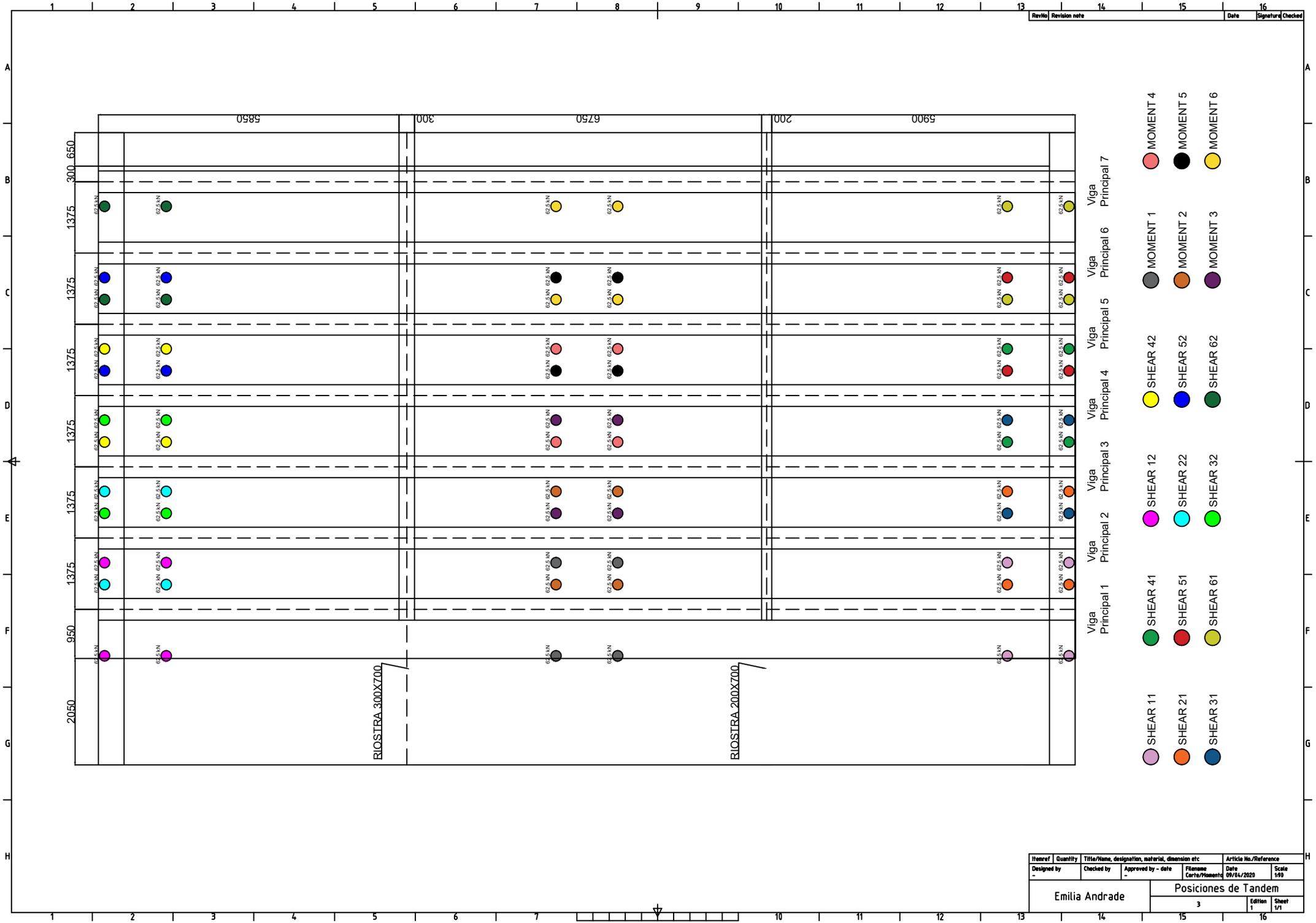
Item/Ref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Filename
-	-	-	Corre
Emilia Andrade			Date
2			09/14/2020
Edition			Scale
1			1:90
Sheet			
1/1			

Posiciones de Camion



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Filename
-	-	-	Momento
Emilia Andrade			Date
			09/14/2020
			Scale
			1:90
			Edition
			1
			Sheet
			1/1

Posiciones de Camión



ANEXO F

INFORMES DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE POSICIÓN CRÍTICA – CAMIÓN Y TÁNDEM DE DISEÑO

Contenido

1. Protocolo 1 – Camión de Diseño
2. Protocolo 2 – Camión de Diseño
3. Protocolo 3 – Camión de Diseño
4. Protocolo 4 – Camión de Diseño
5. Protocolo 5 – Camión de Diseño
6. Protocolo 6 – Camión de Diseño
7. Protocolo 1 – Tándem de Diseño

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	1	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			475	No.	1
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Camión

CORTANTE MÁXIMO [kN]				
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR41</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR41</u>
Viga Princ. 1	181.28	170.77	165.20	100.84
Viga Princ. 2	111.20	91.72	82.04	112.24
Viga Princ. 3	84.45	53.28	34.27	118.67
Viga Princ. 4	74.73	62.08	30.24	97.03
Viga Princ. 5	56.43	69.90	56.71	67.65
Viga Princ. 6	23.23	56.98	75.82	29.67
Viga Princ. 7	-8.00	18.64	79.42	9.46
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR61</u>
Viga Princ. 1	90.32	84.76	30.86	24.30
Viga Princ. 2	92.76	83.08	73.56	63.88
Viga Princ. 3	87.50	68.49	100.57	81.56
Viga Princ. 4	84.38	52.54	116.30	84.46
Viga Princ. 5	81.12	67.93	100.17	86.98
Viga Princ. 6	63.43	82.26	73.01	91.84
Viga Princ. 7	24.07	84.86	29.56	90.35
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR42</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR42</u>
Viga Princ. 1	-162.34	-149.68	-141.63	-92.86
Viga Princ. 2	-99.16	-84.23	-74.85	-92.11
Viga Princ. 3	-79.33	-62.54	-53.01	-91.50
Viga Princ. 4	-64.22	-57.37	-50.26	-77.45
Viga Princ. 5	-45.70	-52.95	-63.37	-56.80
Viga Princ. 6	-20.31	-40.43	-70.11	-29.60
Viga Princ. 7	13.28	-28.68	-72.15	-15.12
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR62</u>
Viga Princ. 1	-80.20	-72.15	-42.57	-34.66
Viga Princ. 2	-77.18	-67.81	-61.45	-52.07
Viga Princ. 3	-74.70	-65.18	-78.47	-68.94
Viga Princ. 4	-70.59	-50.26	-86.43	-79.32
Viga Princ. 5	-64.06	-74.47	-77.82	-88.24
Viga Princ. 6	-49.73	-79.40	-60.67	-90.35
Viga Princ. 7	-32.46	-76.55	-38.48	-86.33

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	1	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			475	No.	1
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Camión

MOMENTO MÁXIMO [kN mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	156490	139547	124442	131997
Viga Princ. 2	140663	124825	112001	134307
Viga Princ. 3	125321	105929	94426	140891
Viga Princ. 4	109375	105743	88169	117898
Viga Princ. 5	88249	98580	100307	98378
Viga Princ. 6	54544	84445	101385	69079
Viga Princ. 7	35168	59670	95663	50814
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	113387	98248	84078	66526
Viga Princ. 2	118364	105501	103383	90559
Viga Princ. 3	117132	105913	117641	106242
Viga Princ. 4	114066	97410	135127	115919
Viga Princ. 5	108775	110436	122006	123486
Viga Princ. 6	97603	114558	112429	129425
Viga Princ. 7	75137	111522	92700	129267
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	-9.2	-8.1	-7.0	-7.7
Viga Princ. 2	-8.1	-7.1	-6.3	-7.5
Viga Princ. 3	-7.0	-6.3	-5.7	-7.0
Viga Princ. 4	-5.8	-5.7	-5.4	-6.3
Viga Princ. 5	-4.6	-5.1	-5.4	-5.3
Viga Princ. 6	-3.2	-4.3	-5.3	-4.1
Viga Princ. 7	-2.0	-3.5	-5.2	-3.0
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	-6.5	-5.5	-5.0	-3.9
Viga Princ. 2	-6.5	-5.7	-5.7	-4.9
Viga Princ. 3	-6.4	-5.8	-6.3	-5.7
Viga Princ. 4	-6.2	-5.8	-6.6	-6.3
Viga Princ. 5	-5.8	-6.0	-6.5	-6.8
Viga Princ. 6	-5.2	-6.2	-6.2	-7.1
Viga Princ. 7	-4.5	-6.2	-5.7	-7.4

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	1	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			475	No.	1
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Camión

TABLA RESUMEN - RESULTADOS CRÍTICOS				
CORTE				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
SHEAR11 SHEAR41	181.28	VIGA PRINC. 1	0	m
MOMENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	156490	VIGA PRINC. 1	9900	m
DESPLAZAMIENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	-9.2	VIGA PRINC. 1	9300	m

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	2	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			250	No.	2
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Camión

CORTANTE MÁXIMO [kN]				
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR41</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR41</u>
Viga Princ. 1	174.79	161.21	154.04	105.33
Viga Princ. 2	117.66	97.98	86.08	111.91
Viga Princ. 3	86.64	63.06	43.52	113.75
Viga Princ. 4	73.02	62.47	36.09	94.84
Viga Princ. 5	52.97	64.26	54.28	66.89
Viga Princ. 6	23.06	51.97	71.10	31.73
Viga Princ. 7	-6.90	22.33	78.37	9.91
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR61</u>
Viga Princ. 1	91.75	84.58	35.98	28.82
Viga Princ. 2	92.23	80.33	72.85	60.95
Viga Princ. 3	88.17	68.63	98.02	78.48
Viga Princ. 4	84.29	57.91	110.67	84.30
Viga Princ. 5	78.19	68.20	97.75	87.86
Viga Princ. 6	60.63	79.77	72.48	91.62
Viga Princ. 7	28.43	84.48	35.50	91.54
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR42</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR42</u>
Viga Princ. 1	-161.66	-148.43	-139.67	-95.57
Viga Princ. 2	-102.19	-87.10	-76.66	-91.96
Viga Princ. 3	-81.15	-67.21	-59.34	-87.47
Viga Princ. 4	-63.44	-58.41	-55.45	-73.67
Viga Princ. 5	-43.47	-50.56	-62.87	-54.20
Viga Princ. 6	-19.57	-37.35	-66.80	-29.71
Viga Princ. 7	-13.37	-28.94	-71.55	-15.88
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR62</u>
Viga Princ. 1	-80.97	-72.21	-44.57	-35.81
Viga Princ. 2	-76.87	-66.42	-61.00	-50.55
Viga Princ. 3	-73.33	-65.66	-74.18	-66.31
Viga Princ. 4	-68.64	-65.88	-80.14	-77.18
Viga Princ. 5	-61.29	-73.60	-73.80	-86.11
Viga Princ. 6	-48.27	-77.71	-60.57	-90.02
Viga Princ. 7	-33.66	-76.74	-41.17	-90.21

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	2	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]				250	No. 2
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]				24.87	Vehículo Camión

MOMENTO MÁXIMO [kN mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	156421	139449	124266	132025
Viga Princ. 2	140699	124844	111990	134338
Viga Princ. 3	125420	106171	94732	140877
Viga Princ. 4	109442	105843	88528	117844
Viga Princ. 5	88236	98607	100413	98313
Viga Princ. 6	54440	84398	101345	69019
Viga Princ. 7	35114	59573	95499	50874
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	113414	98167	84221	66548
Viga Princ. 2	118378	105485	103399	90545
Viga Princ. 3	117127	105947	117569	106209
Viga Princ. 4	114045	97501	135028	115907
Viga Princ. 5	108749	110490	121942	123502
Viga Princ. 6	97596	114558	112445	129448
Viga Princ. 7	75159	111465	92794	129278
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	-9.4	-8.2	-7.2	-7.9
Viga Princ. 2	-8.2	-7.3	-6.4	-7.6
Viga Princ. 3	-7.1	-6.4	-5.8	-7.2
Viga Princ. 4	-5.9	-5.8	-5.5	-6.4
Viga Princ. 5	-4.7	-5.2	-5.5	-5.3
Viga Princ. 6	-3.2	-4.4	-5.4	-4.1
Viga Princ. 7	-2.0	-3.5	-5.3	-3.0
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	-6.7	-5.6	-5.1	-4.0
Viga Princ. 2	-6.7	-5.8	-5.8	-4.9
Viga Princ. 3	-6.5	-5.9	-6.4	-5.7
Viga Princ. 4	-6.3	-5.9	-6.7	-6.4
Viga Princ. 5	-5.9	-6.1	-6.6	-6.9
Viga Princ. 6	-5.3	-6.3	-6.3	-7.3
Viga Princ. 7	-4.6	-6.3	-5.8	-7.5

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	2	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			250	No.	2
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Camión

TABLA RESUMEN - RESULTADOS CRÍTICOS				
CORTE				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
SHEAR11 SHEAR41	174.79	VIGA PRINC. 1	0	m
MOMENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	156421	VIGA PRINC. 1	9900	m
DESPLAZAMIENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	-9.4	VIGA PRINC. 1	9300	m

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	3	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			750	No.	3
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Camión

CORTANTE MÁXIMO [kN]				
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR41</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR41</u>
Viga Princ. 1	185.96	177.07	171.83	98.40
Viga Princ. 2	105.82	87.04	78.89	112.32
Viga Princ. 3	81.91	46.88	28.79	121.97
Viga Princ. 4	76.50	62.66	27.13	97.67
Viga Princ. 5	58.97	73.86	59.22	67.99
Viga Princ. 6	22.85	60.45	79.02	28.19
Viga Princ. 7	-8.65	16.25	78.93	9.26
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR61</u>
Viga Princ. 1	89.51	89.51	29.87	22.91
Viga Princ. 2	93.33	93.33	74.49	66.35
Viga Princ. 3	86.74	86.74	101.29	83.41
Viga Princ. 4	83.83	83.83	119.48	83.96
Viga Princ. 5	82.88	82.88	100.82	86.17
Viga Princ. 6	65.78	65.78	73.77	92.35
Viga Princ. 7	22.08	22.08	28.22	89.72
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR42</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR42</u>
Viga Princ. 1	-162.88	-150.63	-143.04	-91.90
Viga Princ. 2	-96.38	-81.65	-73.09	-92.45
Viga Princ. 3	-77.91	-58.86	-48.39	-94.37
Viga Princ. 4	-64.88	-56.82	-46.70	-79.64
Viga Princ. 5	-47.43	-54.97	-64.33	-58.43
Viga Princ. 6	-21.63	-43.06	-72.77	-29.81
Viga Princ. 7	15.00	-28.42	-72.42	-14.64
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR62</u>
Viga Princ. 1	-79.65	-72.06	-41.19	-33.97
Viga Princ. 2	-77.72	-69.16	-62.28	-53.72
Viga Princ. 3	-75.32	-64.85	-81.16	-64.85
Viga Princ. 4	-71.58	-61.47	-90.45	-80.34
Viga Princ. 5	-65.97	-75.33	-80.31	-89.66
Viga Princ. 6	-51.24	-80.94	-61.15	-90.85
Viga Princ. 7	-31.60	-76.35	-37.12	-83.60

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	3	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			750	No.	3
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Camión

MOMENTO MÁXIMO [kN mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	156526	139600	124538	131981
Viga Princ. 2	140634	124807	112003	134286
Viga Princ. 3	125258	105792	94262	140897
Viga Princ. 4	109343	105692	87992	117930
Viga Princ. 5	88271	98577	100256	98422
Viga Princ. 6	54620	84478	101411	69124
Viga Princ. 7	35191	59718	95750	50775
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	113368	98272	83997	66506
Viga Princ. 2	118355	105512	103375	90572
Viga Princ. 3	117135	105898	117684	106268
Viga Princ. 4	114080	97364	135183	115927
Viga Princ. 5	108794	110407	122042	123473
Viga Princ. 6	97610	114556	112420	129408
Viga Princ. 7	75120	111550	92644	129258
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	-9.2	-8.0	-7.0	-7.6
Viga Princ. 2	-8.0	-7.1	-6.3	-7.4
Viga Princ. 3	-6.9	-6.3	-5.7	-7.0
Viga Princ. 4	-5.8	-5.7	-5.4	-6.2
Viga Princ. 5	-4.6	-5.1	-5.3	-5.2
Viga Princ. 6	-3.2	-4.3	-5.3	-4.1
Viga Princ. 7	-2.0	-3.5	-5.2	-3.0
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	-6.5	-5.4	-4.9	-3.9
Viga Princ. 2	-6.5	-5.7	-5.7	-4.8
Viga Princ. 3	-6.4	-5.7	-6.2	-5.6
Viga Princ. 4	-6.1	-5.8	-6.6	-6.2
Viga Princ. 5	-5.7	-6.0	-6.5	-6.7
Viga Princ. 6	-5.2	-6.1	-6.1	-7.1
Viga Princ. 7	-4.5	-6.2	-5.6	-7.3

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	3	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			750	No.	3
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Camión

TABLA RESUMEN - RESULTADOS CRÍTICOS				
CORTE				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
SHEAR11 SHEAR41	185.96	VIGA PRINC. 1	0	m
MOMENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	156526	VIGA PRINC. 1	9900	m
DESPLAZAMIENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	-9.2	VIGA PRINC. 1	9300	m

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	4	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			475	No.	4
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			11.50	Vehículo	Camión

CORTANTE MÁXIMO [kN]				
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR41</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR41</u>
Viga Princ. 1	189.46	181.24	177.32	97.45
Viga Princ. 2	100.68	82.22	74.61	108.70
Viga Princ. 3	78.24	43.12	24.98	119.92
Viga Princ. 4	74.68	60.71	24.62	97.01
Viga Princ. 5	58.32	72.82	57.25	67.62
Viga Princ. 6	22.95	60.03	77.68	27.64
Viga Princ. 7	-7.20	17.06	81.33	7.91
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR61</u>
Viga Princ. 1	89.23	85.31	26.21	21.15
Viga Princ. 2	90.25	82.64	72.30	64.69
Viga Princ. 3	84.79	66.66	100.36	82.22
Viga Princ. 4	83.04	46.94	119.30	83.20
Viga Princ. 5	82.11	66.55	100.40	84.83
Viga Princ. 6	64.72	82.38	72.35	90.00
Viga Princ. 7	20.64	84.91	24.67	88.45
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR42</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR42</u>
Viga Princ. 1	-159.48	-149.49	-144.69	-85.09
Viga Princ. 2	-93.50	-78.74	-70.40	-90.00
Viga Princ. 3	-76.10	-56.47	-45.01	-94.47
Viga Princ. 4	-64.18	-55.57	-44.11	-81.06
Viga Princ. 5	-46.88	-54.37	-62.77	-58.88
Viga Princ. 6	-20.98	-42.60	-72.15	-28.63
Viga Princ. 7	13.14	-25.57	-72.21	-9.78
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR62</u>
Viga Princ. 1	-73.20	-68.40	-29.88	-26.60
Viga Princ. 2	-75.24	-66.90	-60.21	-51.87
Viga Princ. 3	-74.85	-63.38	-82.09	-70.62
Viga Princ. 4	-72.45	-60.99	-92.94	-81.49
Viga Princ. 5	-66.37	-74.77	-81.84	-90.24
Viga Princ. 6	-50.25	-79.80	-59.92	-89.46
Viga Princ. 7	-23.86	-75.29	-26.19	-81.75

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	4	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			475	No.	4
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			11.50	Vehículo	Camión

MOMENTO MÁXIMO [kN mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	157069	140131	125711	129340
Viga Princ. 2	141910	125302	111891	135851
Viga Princ. 3	126873	104350	89970	144446
Viga Princ. 4	110750	106251	85875	121853
Viga Princ. 5	88845	99036	99375	100536
Viga Princ. 6	53640	84244	101414	66964
Viga Princ. 7	33025	59632	96609	47295
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	112421	97941	76569	61835
Viga Princ. 2	119133	105687	104213	90803
Viga Princ. 3	119740	106678	121672	108400
Viga Princ. 4	117119	98390	139885	118787
Viga Princ. 5	110796	111065	125621	125680
Viga Princ. 6	97416	114590	112553	129763
Viga Princ. 7	72619	111120	89183	127929
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	-9.3	-8.1	-7.2	-7.6
Viga Princ. 2	-8.1	-7.2	-6.3	-7.6
Viga Princ. 3	-7.1	-6.3	-5.6	-7.3
Viga Princ. 4	-6.0	-5.8	-5.3	-6.5
Viga Princ. 5	-4.7	-5.2	-5.3	-5.4
Viga Princ. 6	-3.2	-4.4	-5.4	-4.0
Viga Princ. 7	-1.9	-3.4	-5.3	-2.8
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	-6.4	-5.5	-4.8	-3.8
Viga Princ. 2	-6.6	-5.7	-5.8	-4.9
Viga Princ. 3	-6.6	-5.8	-6.6	-5.8
Viga Princ. 4	-6.4	-5.9	-7.0	-6.5
Viga Princ. 5	-5.9	-6.1	-6.8	-6.9
Viga Princ. 6	-5.2	-6.2	-6.2	-7.2
Viga Princ. 7	-4.3	-6.2	-5.4	-7.3

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	4	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			475	No.	4
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			11.50	Vehículo	Camión

TABLA RESUMEN - RESULTADOS CRÍTICOS				
CORTE				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
SHEAR11 SHEAR41	189.46	VIGA PRINC. 1	0	m
MOMENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	157069	VIGA PRINC. 1	9900	m
DESPLAZAMIENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	-9.30	VIGA PRINC. 1	9300	m

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	5	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			250	No.	5
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			11.50	Vehículo	Camión

CORTANTE MÁXIMO [kN]				
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR41</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR41</u>
Viga Princ. 1	182.04	171.41	166.86	100.66
Viga Princ. 2	108.96	89.65	79.85	109.09
Viga Princ. 3	82.13	52.71	33.14	115.28
Viga Princ. 4	72.12	59.86	28.97	95.75
Viga Princ. 5	54.58	67.06	53.77	66.99
Viga Princ. 6	23.42	55.20	73.44	29.76
Viga Princ. 7	-6.20	21.20	81.55	8.26
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR61</u>
Viga Princ. 1	90.03	85.48	29.80	25.25
Viga Princ. 2	89.78	79.97	71.34	61.53
Viga Princ. 3	85.86	66.29	99.12	79.55
Viga Princ. 4	83.49	52.60	114.50	83.61
Viga Princ. 5	79.47	66.19	99.18	85.89
Viga Princ. 6	61.54	79.78	71.36	89.59
Viga Princ. 7	24.69	85.04	28.87	89.22
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR42</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR42</u>
Viga Princ. 1	-158.08	-147.16	-141.26	-90.79
Viga Princ. 2	-97.83	-82.91	-73.42	-90.15
Viga Princ. 3	-78.36	-62.12	-52.42	-90.02
Viga Princ. 4	-63.20	-56.53	-49.76	-77.02
Viga Princ. 5	-44.41	-51.56	-61.88	-56.14
Viga Princ. 6	-19.52	-39.11	-68.59	-28.79
Viga Princ. 7	11.05	-25.96	-71.39	12.08
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR62</u>
Viga Princ. 1	-75.90	-68.38	-34.60	-27.76
Viga Princ. 2	-75.22	-65.73	-59.72	-50.24
Viga Princ. 3	-73.78	-64.07	-77.60	-67.89
Viga Princ. 4	-70.35	-63.58	-86.01	-79.24
Viga Princ. 5	-63.28	-73.61	-77.46	-87.79
Viga Princ. 6	-48.47	-77.95	-59.59	-89.07
Viga Princ. 7	-25.69	-76.26	-33.38	-85.99

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	5	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			250	No.	5
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			11.50	Vehículo	Camión

MOMENTO MÁXIMO [kN mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	156960	139982	125453	129410
Viga Princ. 2	141998	125369	111913	135906
Viga Princ. 3	127059	104614	90292	144441
Viga Princ. 4	110857	106405	86194	121778
Viga Princ. 5	88812	99055	99520	100436
Viga Princ. 6	53520	84157	101345	66899
Viga Princ. 7	32946	58500	96367	47375
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	112451	97862	76763	61868
Viga Princ. 2	119167	105675	104239	90784
Viga Princ. 3	119752	106745	121566	108350
Viga Princ. 4	117092	98517	139731	118764
Viga Princ. 5	110748	111144	125513	125700
Viga Princ. 6	97395	114588	112569	129798
Viga Princ. 7	72651	111031	89325	127947
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	-9.5	-8.3	-7.3	-7.8
Viga Princ. 2	-8.3	-7.3	-6.4	-7.7
Viga Princ. 3	-7.2	-6.4	-5.7	-7.5
Viga Princ. 4	-6.1	-5.9	-5.4	-6.6
Viga Princ. 5	-4.7	-5.3	-5.4	-5.5
Viga Princ. 6	-3.2	-4.4	-5.4	-4.1
Viga Princ. 7	-1.8	-3.4	-5.3	-2.8
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	-6.6	-5.6	-4.9	-3.8
Viga Princ. 2	-6.7	-5.8	-5.9	-5.0
Viga Princ. 3	-6.7	-5.9	-6.7	-5.9
Viga Princ. 4	-6.5	-6.0	-7.1	-6.6
Viga Princ. 5	-6.0	-6.2	-6.9	-7.0
Viga Princ. 6	-5.3	-6.3	-6.3	-7.3
Viga Princ. 7	-4.4	-6.3	-5.5	-7.4

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	5	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			250	No.	5
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			11.50	Vehículo	Camión

TABLA RESUMEN - RESULTADOS CRÍTICOS				
CORTE				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
SHEAR11 SHEAR41	182.04	VIGA PRINC. 1	0	m
MOMENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	156960	VIGA PRINC. 1	9900	m
DESPLAZAMIENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	-9.5	VIGA PRINC. 1	9300	m

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	6	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			750	No.	6
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			11.50	Vehículo	Camión

CORTANTE MÁXIMO [kN]				
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR41</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR41</u>
Viga Princ. 1	194.41	187.22	183.21	95.95
Viga Princ. 2	94.38	77.16	70.88	108.11
Viga Princ. 3	76.39	37.34	23.24	123.01
Viga Princ. 4	76.82	62.07	22.44	97.06
Viga Princ. 5	60.71	76.16	59.91	68.08
Viga Princ. 6	22.07	63.01	80.19	26.17
Viga Princ. 7	-7.58	15.24	80.51	7.76
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR61</u>
Viga Princ. 1	88.77	84.75	25.43	20.44
Viga Princ. 2	90.90	84.61	73.55	67.07
Viga Princ. 3	83.96	67.38	100.25	83.66
Viga Princ. 4	82.31	42.68	122.13	82.50
Viga Princ. 5	83.53	67.28	100.27	84.02
Viga Princ. 6	67.11	84.30	73.41	90.59
Viga Princ. 7	19.14	84.38	23.62	88.01
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR42</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR42</u>
Viga Princ. 1	-160.57	-151.20	-147.05	-81.89
Viga Princ. 2	-89.76	-75.22	-67.68	-90.05
Viga Princ. 3	-74.58	-52.45	-40.09	-97.47
Viga Princ. 4	-65.00	-55.23	-40.61	-83.20
Viga Princ. 5	-48.65	-59.52	-64.01	-60.47
Viga Princ. 6	-22.19	-45.33	-74.71	-28.81
Viga Princ. 7	14.67	-25.21	-72.33	12.00
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR62</u>
Viga Princ. 1	-72.51	-68.36	-27.91	-25.82
Viga Princ. 2	-75.51	-67.67	-61.08	-53.54
Viga Princ. 3	-75.34	-62.98	-84.63	-72.27
Viga Princ. 4	-73.43	-58.81	-97.08	-82.45
Viga Princ. 5	-68.34	-75.83	-84.29	-91.78
Viga Princ. 6	-51.94	-81.32	-60.64	-90.02
Viga Princ. 7	-23.46	-74.36	-24.79	-78.95

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	6	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			750	No.	6
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			11.50	Vehículo	Camión

MOMENTO MÁXIMO [kN mm]				
<u>Combinación</u>	<u>MOMEN. 1</u>	<u>MOMEN. 1</u>	<u>MOMEN. 1</u>	<u>MOMEN. 2</u>
	<u>MOMEN. 4</u>	<u>MOMEN. 5</u>	<u>MOMEN. 6</u>	<u>MOMEN. 4</u>
Viga Princ. 1	157124	140208	125845	129298
Viga Princ. 2	141848	125253	111871	135818
Viga Princ. 3	126765	104206	89805	144445
Viga Princ. 4	110702	106179	85724	121893
Viga Princ. 5	88883	99046	99313	100597
Viga Princ. 6	53716	84301	101455	67033
Viga Princ. 7	33058	58693	96730	47248
<u>Combinación</u>	<u>MOMEN. 2</u>	<u>MOMEN. 2</u>	<u>MOMEN. 3</u>	<u>MOMEN. 3</u>
	<u>MOMEN. 5</u>	<u>MOMEN. 6</u>	<u>MOMEN. 5</u>	<u>MOMEN. 6</u>
Viga Princ. 1	112401	97978	76468	61814
Viga Princ. 2	119113	105694	104201	90819
Viga Princ. 3	119732	106647	121729	108434
Viga Princ. 4	117135	98332	139965	118801
Viga Princ. 5	110829	111027	125678	125666
Viga Princ. 6	97431	114590	112546	129740
Viga Princ. 7	72597	111162	89105	127917
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [mm]				
<u>Combinación</u>	<u>MOMEN. 1</u>	<u>MOMEN. 1</u>	<u>MOMEN. 1</u>	<u>MOMEN. 2</u>
	<u>MOMEN. 4</u>	<u>MOMEN. 5</u>	<u>MOMEN. 6</u>	<u>MOMEN. 4</u>
Viga Princ. 1	-9.2	-8.1	-7.1	-7.5
Viga Princ. 2	-8.1	-7.1	-6.2	-7.5
Viga Princ. 3	-7.0	-6.3	-5.5	-7.3
Viga Princ. 4	-5.9	-5.7	-5.2	-6.5
Viga Princ. 5	-4.6	-5.2	-5.3	-5.4
Viga Princ. 6	-3.2	-4.3	-5.3	-4.0
Viga Princ. 7	-1.9	-3.4	-5.2	-2.8
<u>Combinación</u>	<u>MOMEN. 2</u>	<u>MOMEN. 2</u>	<u>MOMEN. 3</u>	<u>MOMEN. 3</u>
	<u>MOMEN. 5</u>	<u>MOMEN. 6</u>	<u>MOMEN. 5</u>	<u>MOMEN. 6</u>
Viga Princ. 1	-6.4	-5.4	-4.7	-3.8
Viga Princ. 2	-6.6	-5.7	-5.7	-4.9
Viga Princ. 3	-6.5	-5.8	-6.5	-5.8
Viga Princ. 4	-6.3	-5.8	-6.9	-6.4
Viga Princ. 5	-5.9	-6.0	-6.7	-6.9
Viga Princ. 6	-5.2	-6.2	-6.2	-7.1
Viga Princ. 7	-4.3	-6.2	-5.4	-7.2

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	6	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			750	No.	6
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			11.50	Vehículo	Camión

TABLA RESUMEN - RESULTADOS CRÍTICOS				
CORTE				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
SHEAR11 SHEAR41	194.41	VIGA PRINC. 1	0	m
MOMENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	157124	VIGA PRINC. 1	9900	m
DESPLAZAMIENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	-9.2	VIGA PRINC. 1	9300	m

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	7	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			475	No.	1
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Tándem

CORTANTE MÁXIMO [kN]				
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR41</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR11</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR41</u>
Viga Princ. 1	144.50	141.44	141.70	70.31
Viga Princ. 2	83.91	67.96	62.74	89.10
Viga Princ. 3	65.88	33.09	16.44	103.86
Viga Princ. 4	62.88	49.73	15.63	83.72
Viga Princ. 5	48.21	61.55	46.65	55.98
Viga Princ. 6	15.91	49.50	65.33	18.49
Viga Princ. 7	-6.55	11.53	65.87	-5.53
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR21</u> <u>SHEAR61</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR51</u>	<u>SHEAR31</u> <u>SHEAR61</u>
Viga Princ. 1	67.25	67.51	12.57	12.83
Viga Princ. 2	73.15	67.93	57.22	51.99
Viga Princ. 3	71.08	54.43	85.94	69.29
Viga Princ. 4	70.57	36.47	104.67	70.57
Viga Princ. 5	69.33	54.42	85.99	71.09
Viga Princ. 6	52.08	67.90	57.29	73.12
Viga Princ. 7	12.55	66.88	12.24	66.58
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR42</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR12</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR42</u>
Viga Princ. 1	-137.67	-129.95	-124.62	-78.87
Viga Princ. 2	-88.46	-74.43	-67.68	-86.68
Viga Princ. 3	-71.81	-43.71	-29.78	-98.25
Viga Princ. 4	-63.54	-53.63	-25.55	-78.18
Viga Princ. 5	-46.87	-57.26	-48.61	-54.51
Viga Princ. 6	-14.64	-44.63	-60.47	-20.07
Viga Princ. 7	7.67	-11.64	-58.27	-2.65
<u>Combinación</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR22</u> <u>SHEAR62</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR52</u>	<u>SHEAR32</u> <u>SHEAR62</u>
Viga Princ. 1	-71.15	-65.81	-24.22	-18.88
Viga Princ. 2	-72.65	-65.90	-56.68	-49.93
Viga Princ. 3	-70.15	-56.21	-78.73	-64.79
Viga Princ. 4	-68.27	-40.19	-96.31	-68.23
Viga Princ. 5	-64.90	-56.25	-78.83	-70.18
Viga Princ. 6	-50.05	-65.89	-56.84	-72.68
Viga Princ. 7	-18.53	-65.15	-23.85	-70.48

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	7	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			475	No.	1
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Tándem

MOMENTO MÁXIMO [kN mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	138387	125014	113339	111982
Viga Princ. 2	122899	108028	97737	122769
Viga Princ. 3	111484	84558	73230	132365
Viga Princ. 4	101349	93881	70460	110461
Viga Princ. 5	80152	92705	89186	88318
Viga Princ. 6	44239	77004	94010	54267
Viga Princ. 7	27684	48210	84255	39725
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	98575	86877	66357	51421
Viga Princ. 2	107858	97565	91926	81635
Viga Princ. 3	105286	93851	110269	98840
Viga Princ. 4	103030	79480	128158	104466
Viga Princ. 5	100824	97293	113683	110160
Viga Princ. 6	87011	104034	98853	115890
Viga Princ. 7	60147	96059	73898	109794
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [mm]				
Combinación	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 1	MOMEN. 2
	MOMEN. 4	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 4
Viga Princ. 1	-7.30	-6.40	-5.50	-6.10
Viga Princ. 2	-6.30	-5.60	-5.00	-5.90
Viga Princ. 3	-5.50	-4.90	-4.40	-5.70
Viga Princ. 4	-4.70	-4.60	-4.20	-5.00
Viga Princ. 5	-3.70	-4.10	-4.30	-4.20
Viga Princ. 6	-2.50	-3.50	-4.30	-3.20
Viga Princ. 7	-1.60	-2.70	-4.10	-2.30
Combinación	MOMEN. 2	MOMEN. 2	MOMEN. 3	MOMEN. 3
	MOMEN. 5	MOMEN. 6	MOMEN. 5	MOMEN. 6
Viga Princ. 1	-5.20	-4.30	-3.90	-3.10
Viga Princ. 2	-5.20	-4.50	-4.50	-3.90
Viga Princ. 3	-5.10	-4.60	-5.00	-4.50
Viga Princ. 4	-4.90	-4.50	-5.30	-5.00
Viga Princ. 5	-4.60	-4.80	-5.20	-5.30
Viga Princ. 6	-4.10	-4.90	-4.90	-5.70
Viga Princ. 7	-3.50	-4.90	-4.90	-5.80

ANÁLISIS ESTÁTICO DE PUENTES DE VIGAS PREESFORZADAS					
Análisis de Posición Crítica en Puente					
Informe de Tablas de Resultados - Valores Máximos					
No. Informe	7	Fecha	8/04/2020	Autor	Emilia Andrade Borges
Parámetros de Variación en Modelo				Protocolo	
Rigidez de Neopreno [kN/mm]			475	No.	1
Módulo de Elasticidad de Vigas Secund. [kN/mm ²]			24.87	Vehículo	Tándem

TABLA RESUMEN - RESULTADOS CRÍTICOS				
CORTE				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
SHEAR11 SHEAR41	144.50	VIGA PRINC. 1	0	m
MOMENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	138387	VIGA PRINC. 1	9500	m
DESPLAZAMIENTO				
Combinación	Valor	Posición Longitudinal de Valor		
MOMEN. 1 MOMEN. 4	-7.30	VIGA PRINC. 1	9500	m

ANEXO G

RECOMENDACIONES PARA MODELACIÓN EN SCIA

ENGINEER

Contenido

1. Documento que reúne recomendaciones para la modelación de puentes similares al desarrollado en el proyecto presentado, mediante el software SCIA Engineer

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

ANÁLISIS DE PUENTES CON VIGAS PREESFORZADAS

ANEXO G: Recomendaciones en el uso de SCIA Engineer para modelación de puentes con vigas preesforzadas

Realizado por: Emilia Andrade Borges

El programa de análisis y diseño estructural SCIA Engineer es un software intuitivo y de fácil aprendizaje; sin embargo, existen dudas y dificultades que solo pueden ser resueltas con la experiencia ganada en el uso del programa. En el presente anexo, se reúnen recomendaciones obtenidas del uso de SCIA Engineer, para las personas interesadas en realizar futuros modelos similares al realizado en el presente proyecto.

a) Pasos Preliminares

A pesar de que es posible modificar las unidades del proyecto en cualquier momento, una recomendación preliminar es definir las unidades con las cuales se trabajará, y mantenerlas durante todo el proyecto. Esta recomendación nace del hecho que las unidades de SCIA están divididas según categorías y valores que representan. Esto implica que, por ejemplo, la longitud se puede medir en metros y la fuerza en kN, pero eso no implica que el esfuerzo será en kPa; por lo contrario, puedo mantener las medidas de longitud y fuerza en las unidades anteriores, y medir el esfuerzo en kN/mm². Por lo tanto, puede llegar a generar errores no mantener un mismo set de unidades en todos los casos. Lo recomendable es, desde el inicio del proyecto, crear un conjunto de unidades que sean coherentes entre sí, y guardarlo para poder cargarlo en otros archivos relacionados.

b) Materiales

El paso preliminar al definir y utilizar materiales en un modelo es conocer que información será relevante para el análisis. Sin importar si la información utilizada será la proporcionada por SCIA, o será sobrescrita por el usuario, las variables de interés deben estar bien definidas.

Hablando específicamente del hormigón, SCIA tiene un módulo interno de cálculo que obtiene información como el módulo de elasticidad según la resistencia a la compresión del hormigón ingresada. Sin embargo, es posible desactivar este cálculo, para poder editar el módulo de elasticidad manualmente. Esto se realiza desactivando el recuadro señalado por la flecha en la *figura 1*.

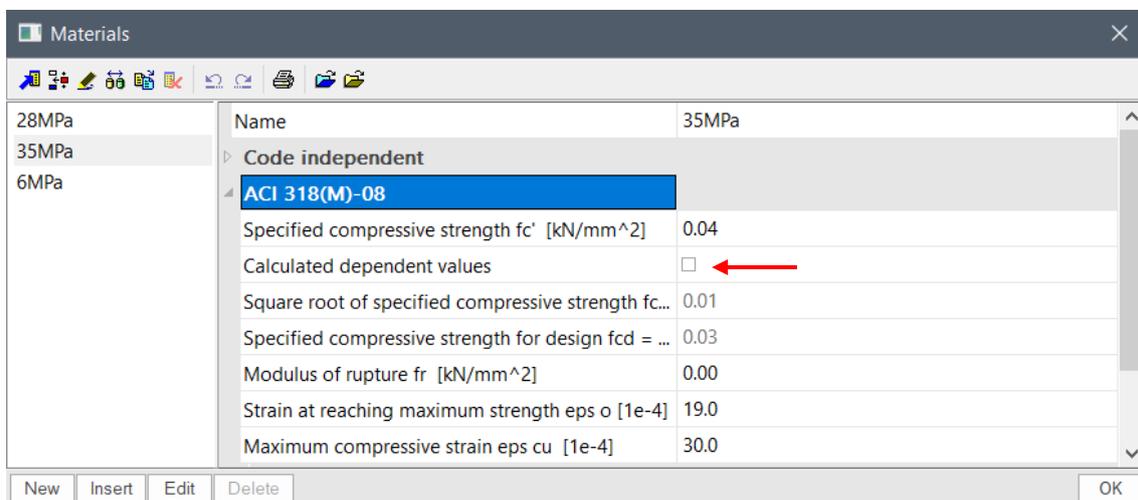


Figura 1: Desactivación de Cálculo de Valores Dependientes

c) Modelación

Como recomendación preliminar es importante desarrollar modelos más simples, para comprender el comportamiento del sistema de una manera simplificada. De esa forma, es posible identificar errores en el comportamiento y respuesta general una vez se construyan modelos más complejos.

Otro paso fundamental, dentro de la primera recomendación, es comparar los resultados de modelos con y sin elementos estructurales, para medir su afectación y así verificar que están siendo correctamente incluidos en el modelo. Un ejemplo de esto es analizar la afectación del puente con y sin vigas secundarias; con la presencia de las vigas, se verán saltos en los diagramas de corte y momento, debido a su accionar como apoyos intermedios.

Ya dentro de la modelación en sí, la primera recomendación se relaciona con la unión de las vigas principales con la losa. La unión de elementos 2D con elementos 1D no es automática, y para que el programa entienda que existe una transmisión de esfuerzos entre elementos, existen dos posibilidades. La primera se logra con los pasos indicados a continuación:

1. Ingresar a estructura (*structure*).
2. Seleccionar elementos 2D (*2D members*) y a continuación elegir componentes de elemento 2D (*2D member components*).
3. Escoger la opción borde interno (*internal edge*).
4. Seleccionar el elemento 2D, que en este caso es la losa.
5. Crear una línea que siga el eje longitudinal de la viga principal, y que esté ubicado en la superficie de contacto entre los dos elementos.

Se debe repetir el procedimiento con todas las vigas principales para que la conexión sea completa.

Otra opción, que simplemente representa un modo más automático de generar estos bordes internos, se puede lograr con los pasos a continuación:

1. Ir a conectar elementos (*Connect Members*) en la pestaña cálculos y malla (*calculation, mesh*).
2. Seleccionar el casillero con la opción conectar elementos 1D como nervios (*connect 1D elements as ribs*) y presionar aceptar.

Automáticamente las vigas principales se conectarán a la losa. Es importante que, en caso de seleccionar la segunda opción, se realice esta unión antes de modelar las vigas secundarias, ya que estas también se incluirán en la modificación. Una vez que la unión sea completada, es posible seguir modelando más elementos y utilizar el comando *connect members* ya con la casilla desmarcada.

Para la modelación de las vigas secundarias, el principio fundamental es su ubicación, el cual debe tener una línea en común con las vigas principales. Este concepto se aplica específicamente en el caso de que no existan áreas de intersección entre las vigas principales y secundarias, como se muestra en la *figura 1*.

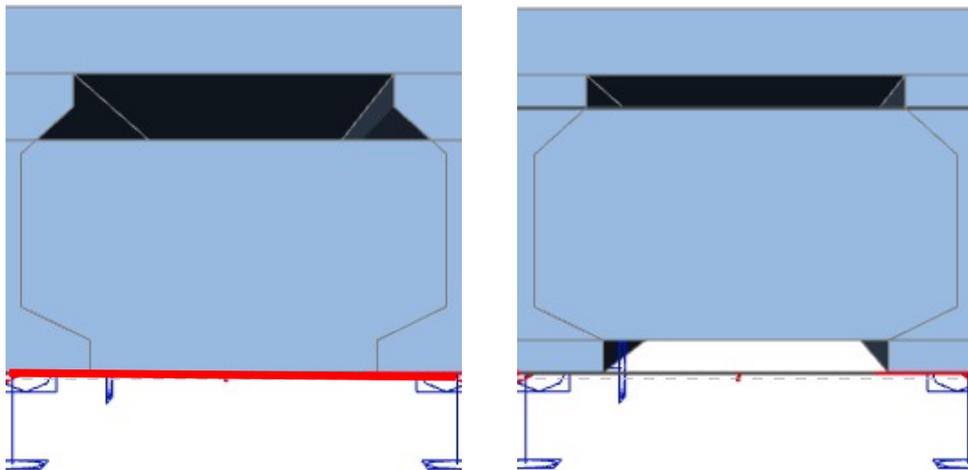


Figura 2: Línea para Ubicación de Vigas Secundarias

Como se muestra en la primera parte de la *figura 1*, es necesario ubicar a las vigas secundarias de tal forma que su base coincida con la base de las vigas principales. A continuación, se puede aplicar una excentricidad para colocarla en su posición final, como

se muestra en la segunda parte de la *figura 1*. De esta forma, se evita la existencia de inestabilidades en el modelo.

d) Aplicación de Cargas

Para la aplicación de cargas en la losa, ya sean móviles o dentro de otras categorías, es posible utilizar cargas libres (*free loads*). Estas cargas pueden ser insertadas con coordenadas para coincidir con la cara superior de la losa. Un dato importante es que al insertar una carga, la coordenada en Z no se verá aplicada; sin embargo, una vez creada la carga su posición en el eje Z se puede modificar para ubicarla en su posición final.

La carga aplicadas a vigas (*beam loads*), incluso si tienen una excentricidad que las ubica en la cara superior de la losa, no tendrán una afectación en este elemento. Solo afectará a la viga donde se aplicó, y las vigas adyacentes por transmisión de esfuerzos de las vigas secundarias.

e) Resultados

Existen algunos procedimientos que se pueden realizar para verificar un correcto funcionamiento del modelo, dentro del análisis de resultados. Una buena práctica es verificar todos los procesos que se detallarán a continuación, con el peso propio del modelo, antes de hacerlo con cargas externas aplicadas.

Primero, se pueden verificar las reacciones que generan las cargas aplicadas. Ya que la suma de las reacciones debe dar como resultado la carga aplicada, es un paso importante para determinar si las cargas han sido aplicadas correctamente al modelo.

Para verificar que todos los elementos están conectados y las fuerzas se están transmitiendo, se puede observar el esfuerzo en 3D siguiendo estos pasos:

1. En el módulo de resultados (*results*), elegir esfuerzo en 3D (*3D Stress*).
2. Seleccionar en valor (*value*) la opción de σ_x (*1D/2D*).
3. Seleccionar Actualizar (*refresh*) para observar el esfuerzo en el modelo.

De esta manera, se puede ver la distribución del esfuerzo en todo el modelo, e identificar si es que existen elementos que no están correctamente conectados al puente.

Otra forma de verificar que los elementos están conectados y las cargas están correctamente aplicadas es obteniendo la *malla deformada* del puente. Esto se obtiene con los pasos a continuación:

1. En el módulo de resultados (*results*), elegir elementos 2D (*2D members*).
2. Seleccionar desplazamiento de nodos (*displacement of nodes*).
3. En valores (*values*) seleccionar malla deformada (*deformed mesh*).

Las líneas en rojo son elementos 1D, mientras que la malla corresponde al elemento 2D (losa). Es una manera visual de verificar el comportamiento del modelo, y la correcta aplicación de las cargas en él.

Todas las recomendaciones de este documento fueron reunidas a partir de la modelación del puente de vigas preesforzadas mostrado en el presente proyecto.