



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“DESEMPEÑO DE LOSAS DE ENLACE EN CONTINUIDAD PARCIAL”

PREVIO OBTENCIÓN DEL TÍTULO

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

11341084 CARLO PAOLO GALICIA GONZÁLEZ

ASESOR METODOLÓGICO: ING. JUAN CARLOS REYES ZÚNIGA

ASESOR TEMÁTICO: ING. MARCO TULIO CANALES CHÁVEZ

UNITEC, CAMPUS TEGUCIGALPA; JULIO, 2020.

DEDICATORIA

Yo, Carlo Paolo Galicia, dedico este proyecto a Dios, que todo mi trabajo sea para honrarle y agradecerle siempre. A mis padres Carlo Paolo Galicia y Eva Carolina González, abuelos Oswaldo López Mejía y Corina Dalila López, que sin su apoyo y amor no sería el hombre que hoy soy. A mis hermanos Alex, Ariel, Lorenzo y Samuel, que siempre han creído en mí y me han dado ánimos en los momentos de adversidad.

Paolo Galicia

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco al asesor temático y autor de la investigación original de esta extensión, el Doctor Marco Tulio Canales Chávez por haber compartido de sus conocimientos, recomendaciones, consejos y apoyo en general, con toda paciencia y disposición posible.

En segundo lugar, al asesor metodológico, el ingeniero Juan Carlos Reyes Zúniga, por haber asistido con la calidad necesaria para presentar el proyecto en cada avance.

En tercer lugar, a UNITEC porque a pesar de todas las adversidades actuales en el país y en el mundo (2020), mantuvo la postura y responsabilidad para ayudar a los estudiantes a avanzar en sus estudios.

Finalmente, les agradezco a todos mis compañeros y amigos con los que a lo largo de mi vida universitaria he coincidido, estudiado y trabajado. Agradezco el compañerismo y amistad que compartimos.

RESUMEN EJECUTIVO

Las losas de enlace en puentes pueden ser una solución rentable para aumentar la vida útil de las estructuras de puentes. Sin embargo, la condición de continuidad parcial en los puentes de losa de enlace puede ser difícil de cuantificar. En este trabajo, el rendimiento de las losas de enlace se estudia mediante un estudio paramétrico cuyos resultados fueron graficados para tener un panorama más preciso de su desempeño. El principal enfoque de esta investigación consiste en conocer la influencia de las longitudes de tramos y segmentos en su desempeño. El estudio paramétrico se realizó utilizando un modelo matemático y un modelo de elementos finitos de dos dimensiones. El estudio considera los factores de diseño del puente, como el número de tramos, la longitud del tramo, la relación de la longitud del tramo, la separación de la viga y la configuración de temperatura, junto con las características de la viga y el soporte correspondientes para explorar la relación entre los diferentes factores que también afectan el rendimiento de la losa de enlace como también desarrollar una expresión simplificada para representar el comportamiento de la losa de enlaces dentro de un sistema. Se tomaron en cuenta los efectos de la carga viva y el gradiente de temperatura durante el análisis y se hicieron las recomendaciones de diseño para los apoyos elastoméricos.

Las recomendaciones de diseño para los apoyos fueron de suma relevancia ya que los resultados obtenidos evidenciarían una relación directa entre la rigidez de estos con los esfuerzos generados en las losas de enlace. La rigidez de los apoyos se determinó mediante una fórmula, la cual será explicada posteriormente en la investigación; pero si involucró las dimensiones de estos, por lo que su diseño es de vital consideración si se pretende utilizar este sistema. Las cargas que se consideraron fueron la viva y la del gradiente de temperatura, estas fueron aplicadas a modelos generados mediante un software estructural donde sus resultados fueron los que evaluaron el desempeño de las losas sometidas a distintas variables.

Estas variables consistieron en número de tramos, longitud de tramos, espaciado de vigas y temperatura. Las variables fueron modeladas para posteriormente la obtención y graficación de los resultados finales.

Basándose en los resultados obtenidos se concluyó que existe una correspondencia directa con la reacción y rigidez en los apoyos y los esfuerzos generados en la losa de enlace según las longitudes de los tramos, y de los segmentos involucrados.

ABSTRACT

Bridge bonding slabs can be a cost-effective solution to increase the useful life of bridge structures. However, the condition of partial continuity at the link slab bridges can be difficult to quantify. In this work, the performance of the link slabs is studied through a parametric study whose results were graphed to have a more accurate picture of their performance. The main focus of this research is to learn the influence of segment and segment lengths on their performance.

The parametric study was performed using a mathematical model and a two-dimensional finite element model. The study considers the design factors of the bridge, such as the number of spans, the length of the span, the ratio of the length of the span, the spacing of the beam and the temperature configuration, along with the characteristics of the beam and the support corresponding to explore the relationship between the different factors that also affect the performance of the bonding slab as well as developing a simplified expression to represent the behavior of the bonding slab within a system.

The effects of live load and temperature gradient were taken into account during the analysis and design recommendations for elastomeric supports were made. The design recommendations for the supports were highly relevant, since the results obtained would demonstrate a direct relationship between their stiffness and the efforts generated in the link slabs. The stiffness of the supports was determined using a formula, which will be explained later in the investigation, but it involved the dimensions of these, so its design is of vital consideration if it is intended to use this system.

The loads that were considered were the live and the temperature gradient, these were applied to models generated by structural software where their results were those that evaluated the performance of the slabs subjected to different variables. These variables consisted of number of sections, length of sections, spacing of beams and temperature. The variables were modeled to later obtain and graph the final results.

Based on the results obtained, it was concluded that there is a direct correspondence with the reaction and stiffness of the supports and the stresses generated in the connecting slab according to the lengths of the sections, and of the segments involved.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción	1
II.	Planteamiento del problema	2
2.1	Precedentes	2
2.2	Definición del Problema	3
2.3	Justificación	4
2.4	Preguntas de investigación	4
2.1	Objetivos.....	5
2.1.1	Objetivo General.....	5
2.1.2	Objetivos Específicos	5
III.	Marco Teórico.....	6
3.1	Puentes.....	6
3.1.1	Definición y Tipología.....	6
3.1.2	Composición	6
3.1.3	Materiales.....	7
3.1.4	Estructuración	8
3.1.5	Elementos estructurales relacionados a la continuidad del puente	12
3.1.6	Inspecciones en puentes	27
3.2	Losas.....	32
3.2.1	Losas de enlace en puentes	32
3.2.2	Clasificación.....	35
3.2.3	Fisuración	35
3.3	Continuidad en puentes	39
3.3.1	Continuidad completa.....	40
3.3.2	Continuidad parcial	43
IV.	Metodología.....	48

4.1	Enfoque	48
4.2	Variables de investigación	48
4.2.1	Variables independientes	48
4.2.2	Variables dependientes.....	49
4.3	Técnicas e instrumentos aplicados	50
4.3.1	Técnicas Aplicadas	50
4.3.2	Instrumentos aplicados.....	51
4.4	Metodología de estudio	52
4.5	Metodología de validación.....	53
4.6	Cronograma de actividades	54
4.7	Diagrama de GANTT	54
V.	Resultados y análisis.....	55
5.1	Diseño de Modelos STAAD	55
5.1.1	Diseño de vigas y losa	56
5.1.2	Diseño de apoyos.....	62
5.1.3	Generación de modelos.....	66
5.2	Interpretación de datos.....	70
5.2.1	Gradiente de temperatura	70
5.2.2	Cargas vivas.....	77
VI.	Conclusiones	85
VII.	Recomendaciones.....	86
VIII.	Implementación	86
IX.	Trabajo Futuro	87
X.	Bibliografía.....	88

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Puente presforzado	2
Ilustración 2. Junta de dilatación con fallas en sus elementos.	3
Ilustración 3. Componentes estructurales de puentes.....	6
Ilustración 4. Esquema (Puente de losa).....	9
Ilustración 5. Proceso constructivo (Puente Losa)	9
Ilustración 6. Proceso constructivo (Puente losa y vigas).....	10
Ilustración 7. Componentes estructurales de puentes de viga y losa.....	11
Ilustración 8. Superficie de rodadura.....	12
Ilustración 9. Tipología de superficie de rodadura.....	12
Ilustración 10. Juntas de expansión en puente.....	13
Ilustración 11. Tipos de juntas de expansión.....	14
Ilustración 12. Junta enterrada.....	14
Ilustración 13. Junta asfáltica	15
Ilustración 14. Junta con tira de sellado de acero	15
Ilustración 15. Junta con pernos.....	15
Ilustración 16. Junta con tira celular de sellado y metal	16
Ilustración 17. Junta con tipo de sellado en "v".	16
Ilustración 18. Junta dentada con capacidad de largos movimientos.....	16
Ilustración 19. Junta tipo modular para largo movimiento.....	17
Ilustración 20. Empozamiento e infiltración en juntas.....	18
Ilustración 21. Daño estructural en junta de expansión.....	19
Ilustración 22. Obstrucción de movimientos en junta de expansión	19
Ilustración 23. Reparación de juntas varias	20
Ilustración 24. Esquema de cambio de junta.....	22
Ilustración 25. Apoyos en puentes	23
Ilustración 26. Tipos de apoyos de puentes	23
Ilustración 27. Líneas de influencia de momento continuo en un puente de doble tramo.....	24
Ilustración 28. Momento positivo	25
Ilustración 29. Diagrama de configuración rodillo-bisagra-bisagra-rodillo (RHHR).....	25
Ilustración 30. Diagrama de configuración bisagra-rodillo-rodillo-bisagra (HRRH).....	26
Ilustración 31. Apoyos Elastoméricos	27
Ilustración 32. Elementos constituyentes de la celda de corrosión	31
Ilustración 33. Continuidad causada por la losa de enlace del puente	32
Ilustración 34. Longitud losa de enlace	33
Ilustración 35. Puente con juntas de expansión (sin continuidad).....	39
Ilustración 36. Puente con vigas integradas (continuidad completa).....	39
Ilustración 37. Puente con vigas separadas (continuidad parcial).....	40
Ilustración 38. Momento positivo en diafragma.....	41

Ilustración 39. Ejemplo Continuidad Completa	42
Ilustración 40. Continuidad parcial (Alternativa 1)	45
Ilustración 41. Continuidad parcial (Alternativa 2)	46
Ilustración 42. Continuidad Parcial en puente (Tramos independientes).....	47
Ilustración 43. Dimensiones Transversales de vigas AASHTO (SI).....	57
Ilustración 44. Dimensiones Transversales de viga AASHTO tipo 5 (SI).....	58
Ilustración 45. Modelaje de apoyos	63
Ilustración 46. Composición de apoyo.....	63
Ilustración 47. Camión de diseño HL93	64
Ilustración 48. Modelo Estructural	69
Ilustración 49. Modelo utilizado para análisis de datos	70

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Efecto de incremento de la temperatura y del aire del hormigón	38
Gráfico 2. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 450 ft.....	71
Gráfico 3. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 600 ft.....	71
Gráfico 4. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 740 ft.....	72
Gráfico 5. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 450 ft.....	72
Gráfico 6. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 450 ft.....	73
Gráfico 7. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 740 ft.....	73
Gráfico 8. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 450 ft.....	74
Gráfico 9. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 600 ft.....	74
Gráfico 10. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 740 ft.....	75
Gráfico 11. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 450 ft.....	75
Gráfico 12. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 600 ft.....	76
Gráfico 13. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 740 ft.....	76
Gráfico 14. Compresión generada en T1, Carga Viva. 450 ft.....	77
Gráfico 15. Compresión generada en T1, Carga Viva. 600 ft.....	78
Gráfico 16. Compresión generada en T1, Carga Viva. 740 ft.....	78
Gráfico 17. Compresión generada en T2, Carga Viva. 450 ft.....	79
Gráfico 18. Compresión generada en T2, Carga Viva. 600 ft.....	79
Gráfico 19. Compresión generada en T2, Carga Viva. 740 ft.....	80
Gráfico 20. Compresión generada en T1, Carga Viva. 450 ft.....	81
Gráfico 21. Compresión generada en T1, Carga Viva. 600 ft.....	81
Gráfico 22. Compresión generada en T1, Carga Viva. 740 ft.....	82
Gráfico 23. Compresión generada en T2, Carga Viva. 450 ft.....	82
Gráfico 24. Compresión generada en T2, Carga Viva. 600 ft.....	83
Gráfico 25. Compresión generada en T2, Carga Viva. 740 ft.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Daños más frecuentes en juntas de expansión (Colombia, 2008).....	17
Tabla 2. Tipos de inspecciones especiales en puentes de concreto.....	29
Tabla 3. Tipos de inspecciones especiales en puentes de acero	30
Tabla 4. Clasificación de fisuras en losas.....	36
Tabla 5. Fisuras a partir de colocación de hormigón	36
Tabla 6. Tramos y longitudes por segmento	49
Tabla 7. Cronograma.....	54
Tabla 8. Diagrama de GANTT	54
Tabla 9. Esquematización de datos para cada modelo	56
Tabla 10. Longitud del tramo de viga	56
Tabla 11. Propiedades de Vigas AASHTO.....	57
Tabla 12. Propiedades de viga AASHTO tipo 5	58
Tabla 13. Datos de vigas.....	59
Tabla 14. Propiedades de secc. compuesta	62
Tabla 15. Dimensiones de apoyos	65
Tabla 16. Parámetros de ingreso en STAAD	66
Tabla 17. Separación mínima entre camiones	67
Tabla 18. Momento debido a gradiente de temperatura.....	68

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Longitud losa de enlace.....	33
Ecuación 2. Longitud zona de desgaste	33
Ecuación 3. Angulo de rotación.....	34
Ecuación 4. Momento de inercia no fisurado.....	34
Ecuación 5. Momento de flexión en losa de enlace	35
Ecuación 6. Momento actuante debido a rotaciones.....	43
Ecuación 7. Momento actuante debido a rotaciones (Revisada).....	44
Ecuación 8. Factor de ajuste.....	44
Ecuación 9. Centroides losa.....	59
Ecuación 10. Área de losa	60
Ecuación 11. Sumatoria de áreas.....	60
Ecuación 12. Sumatoria de áreas multiplicadas por centroides.....	60
Ecuación 13. Centroides sección compuesta.....	60
Ecuación 14. Teorema de ejes paralelos (Losa)	61
Ecuación 15. Teorema de ejes paralelos (Viga).....	61
Ecuación 16. Inercia de losa	61
Ecuación 17. Inercia secc. Compuesta.....	61
Ecuación 18. Área de losa	64

Ecuación 19. Peso de losa	64
Ecuación 20. Carga muerta.....	65
Ecuación 21. Reacción en apoyo.....	65
Ecuación 22. Tren de carga.....	67
Ecuación 23. Espacio libre.....	67
Ecuación 24. Rigidez de apoyo.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo FL_0_6_19 (3 tramos)	90
Figura 2. Modelo FL_0_6_20 (4 tramos)	90
Figura 3. Modelo FL_0_6_21 (5 tramos)	91
Figura 4. Modelo FL_0_6_22 (6 tramos)	91
Figura 5. Modelo FL_0_6_23 (7 tramos)	91
Figura 6. Modelo FL_0_6_24 (8 tramos)	92
Figura 7. Modelo FL_0_6_25 (9 tramos)	92
Figura 8. Modelo FL_0_6_26 (10 tramos).....	92

LISTA DE SIGLAS Y GLOSARIO

- **AASHTO:** "American Association of State Highway Transportation Officials"; "Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Transporte por Carretera".
- **ACI:** "American Concrete Institute"; "Instituto Americano del Concreto".
- **Centroide:** El centroide es un punto que define el centro geométrico de un objeto. Su localización puede determinarse a partir de fórmulas semejantes a las utilizadas para determinar el centro de gravedad o el centro de masa del cuerpo.
- **Continuidad:** Unión entre las partes que forman un todo que se desarrolla en el tiempo.
- **Elastoméricos:** Material compuesto que incluye no-metales en su composición y que muestra un comportamiento elástico.
- **Fisuración:** Fenómeno físico que aparece en elementos estructurales de hormigón consistente en la aparición de micro fisuras de unas pocas décimas de milímetro.
- **HRRH:** Hinge-Roller-Roller-Hinge support ; Bisagra-Rodillo-Rodillo-Bisagra (composición de apoyos).

- **Inercia:** Propiedad que tienen los cuerpos de permanecer en su estado de reposo o movimiento relativo.
- **LADOTD:** "Louisiana Department of Transportation and Development"; "Departamento de Transporte y Desarrollo del estado de Louisiana".
- **Presforzados:** El presfuerzo significa la creación intencional de esfuerzos permanentes en una estructura o conjunto de piezas, con el propósito de mejorar su comportamiento y resistencia bajo condiciones de servicio y de resistencia.
- **Reología:** Ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales.
- **RHHR:** Roller-Hinge-Hinge-Roller support ; Rodillo-Bisagra-Bisagra-Rodillo (composición de apoyos).
- **Rigidez:** Capacidad de resistencia de un cuerpo a doblarse o torcerse por la acción de fuerzas exteriores que actúan sobre una superficie.
- **Tramos:** Parte comprendida entre dos puntos que forman parte de una línea o de algo que se desarrolla linealmente, especialmente un camino o una vía.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo será una ampliación de una publicación previa donde el asesor temático es el autor principal. La ampliación corresponde a solicitudes realizadas por el Departamento de Transporte y Desarrollo del Estado de Luisiana (LADOTD), institución que fue el patrocinador principal del trabajo original.

La investigación se llevará a cabo analizando puentes de gran magnitud en condiciones de continuidad parcial producida por la presencia de losas de enlace.

Puntualmente se desarrollará comparando los resultados brindados por un estudio paramétrico solicitado por el Departamento de Transporte y Desarrollo del Estado de Luisiana. Adicionalmente, este trabajo se complementará considerando un estudio de monitoreo a largo plazo de un puente en el estado de Luisiana. De esta manera se pretende obtener una mejor comprensión de los parámetros principales involucrados en el análisis de las principales variables.

El estado de Luisiana se caracteriza por sus históricos puentes los cuales tienen alta incidencia en las industrias del estado como la pesca y refinación de petróleo. Esta investigación tiene el potencial de ser de gran importancia para el diseño de puentes de concreto. Uno de los factores principales afectantes a la durabilidad de los puentes es la presencia de las juntas de expansión en las locaciones de los apoyos. La inhabilidad de los sistemas de juntas de proveer confianza, fiabilidad, longevidad, e impermeabilidad repercute directamente con el deterioro de las estructuras de apoyo causando corrosión prematura y otras patologías.

La presente investigación se plantea demostrar la existencia de una alternativa más viable en términos estructurales. Las losas de enlace se encargan de unir los tramos independientes de los puentes y de esta forma brindar continuidad.

Se estudiarán los conceptos de continuidad en puentes y se realizarán modelos en software especializado en el análisis de estructuras y esfuerzos con el fin de analizar el desempeño de las losas como juntas de enlace entre tramos y apoyos sometidos a distintas variables.

El principal enfoque de esta investigación consiste en conocer la afectación de las variables en el desempeño de las losas de enlace y conocer la influencia que las longitudes de tramos y segmentos tienen en su desempeño.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 PRECEDENTES

Muchos puentes están diseñados como estructuras de múltiples tramos simples hechos de vigas concreto presforzado o de acero. Cada tramo, típicamente, necesita de una junta de dilatación al final de cada segmento para brindar la movilidad necesaria debido a los desplazamientos involucrados en la estructura como la temperatura, contracciones y los efectos de fluencia (Caner & Zia, 1998).

Las juntas de dilatación son un problema de mantenimiento constante. Todo el costo de construcción y mantenimiento a un puente puede ser reducido de manera significativa si el número de juntas en tramos múltiples puede ser minimizado (Caner & Zia, 1998).



Ilustración 1. Puente presforzado

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

A lo largo de los años los departamentos de transporte de múltiples estados (Luisiana, Ontario, New York, entre otras...) han realizado investigaciones y estudios sobre la continuidad en los puentes, ya sea parcial o completa mediante losas de enlace; con el fin de disminuir u omitir la cantidad de juntas de expansión.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Desde la década de los 60 se construyen puentes de múltiples tramos con juntas de expansión en sus apoyos. Las juntas simplifican los diseños y brindan espacios suficientes para la acomodación de los elementos estructurales debido a la temperatura y otros desplazamientos involucrados causados por encogimiento, arrastre, humedad, tráfico y otras cargas. Sin embargo, con el tiempo estas juntas son propensas a volverse fuentes de deterioro hacia las estructuras que soportan las súper-estructura. En la ilustración 2 se logra apreciar un problema común en los componentes estructurales de junta de dilatación debido a falta de mantenimiento o fallos en su implementación, lo que en la eventualidad consuce a los fallos estructurales. La mayoría de los problemas de esta naturaleza pueden omitirse mediante la implementación de un sistema de losa continua en los puentes (Canales, 2019).



Ilustración 2. Junta de dilatación con fallas en sus elementos.

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

Un sistema continuo reduciría o eliminaría la necesidad de utilizar las juntas de expansión por lo que sería posible ahorrarse costos de mantenimiento y construcción. Para la implementación de un sistema continuo en un puente existen diversas alternativas.

La presente investigación pretende analizar el desempeño de las losas de enlace como reemplazo de juntas de expansión, mediante un análisis paramétrico incluyendo las variables de mucha relevancia como la longitud del tramo, el número de tramos, espaciado entre vigas, condiciones de continuidad, tipos de apoyos y temperatura del ambiente.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Las juntas de expansión en puentes sirven para acomodar los desplazamientos necesarios para diferentes tipos de movimientos que surgen durante la vida útil de la superestructura del puente sin exponer la subestructura del puente a grandes demandas. Sin embargo, en muchos casos, estas uniones pueden fallar en lograr su propósito diseñado a través de su degradación prematura o implementación incorrecta.

La acumulación de escombros, el descongelamiento de productos químicos, la selección inadecuada de materiales o la instalación incorrecta pueden causar el deterioro de las juntas de expansión en los puentes. Este deterioro a su vez puede conducir a la corrosión por fugas de agua y deterioro de la viga y el pilote, especialmente cuando están involucrados agentes deshielo.

Las losas de enlace en los puentes pueden ser una solución efectiva para incrementar la vida útil de las estructuras involucradas.

Esta investigación pretende estudiar el desempeño de las losas de enlace mediante un estudio paramétrico que incluye las variables principales, y la modelación de las variables mediante un software estructural.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- 1) ¿De qué manera será completado el estudio paramétrico originalmente realizado en la presente extensión investigativa?
- 2) ¿Cómo se ven afectadas las losas de enlace en términos de esfuerzos debido a las variables contempladas en la investigación y como se medirán sus resultados?
- 3) ¿Cuáles son las variantes que se presentan en los esfuerzos generados en las losas de enlace y a consecuencia de que?
- 4) ¿Qué beneficios se encuentran en los esfuerzos totales generados en los puentes con la presencia de las losas de enlace y como demostrarlo?
- 5) ¿La incidencia que tienen los apoyos y condiciones de extremo de las vigas en la continuidad parcial o completa de un puente es un factor determinante?

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 OBJETIVO GENERAL

Comprender las interacciones que tienen las losas de enlace en un puente sin juntas, tomando en consideración los distintos grados rigidez acorde a las condiciones en las que el puente se encuentre y los efectos de las diversas cargas involucradas.

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Realizar el diseño de las variantes del puente solicitadas para complementar el estudio paramétrico.
- 2) Realizar un estudio paramétrico y graficar sus resultados para investigar la influencia de los efectos de diferentes variables en la fuerza a la que la losa está sometida.
- 3) Determinar las variables principales a las que las losas de enlace están expuestas para reconocer los esfuerzos afectados y por qué.
- 4) Realizar los modelos analíticos necesarios para la validación del estudio con sus variables mediante la utilización de software y verificar las condiciones evaluadas en el estudio paramétrico mediante la graficación de los resultados para así validar si la presencia de las losas de enlace es estructuralmente conveniente.
- 5) Analizar los distintos tipos de apoyos y condiciones de carga de la estructura para determinar su incidencia en la continuidad de los puentes.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 PUENTES

3.1.1 DEFINICIÓN Y TIPOLOGÍA

Un puente se define como una estructura destinada a salvar los obstáculos naturales y artificiales, como vías carreteras o férreas, con el fin de unir caminos viajeros y propiciar transporte de automóviles, peatones o animales. Debido a la funcionalidad que los puentes ofrecen estas resultan ser estructuras indispensables para el flujo de una ciudad, por ende son obras en constante construcción (Muñoz Díaz, 2011).

3.1.2 COMPOSICIÓN

Es indispensable conocer sobre sus diferentes componentes y tipología. Las partes principales de un puente se clasifican en superestructura y subestructura y dichos componentes se esquematizan en la ilustración 3. La superestructura incluye todos aquellos componentes que hacen parte de su tablero, tales como: losas, vigas, armaduras, cables, juntas de dilatación, apoyos y pavimento. La subestructura abarca las pilas, pilones, estribos, cimentaciones y aletas (Muñoz Díaz, 2011).

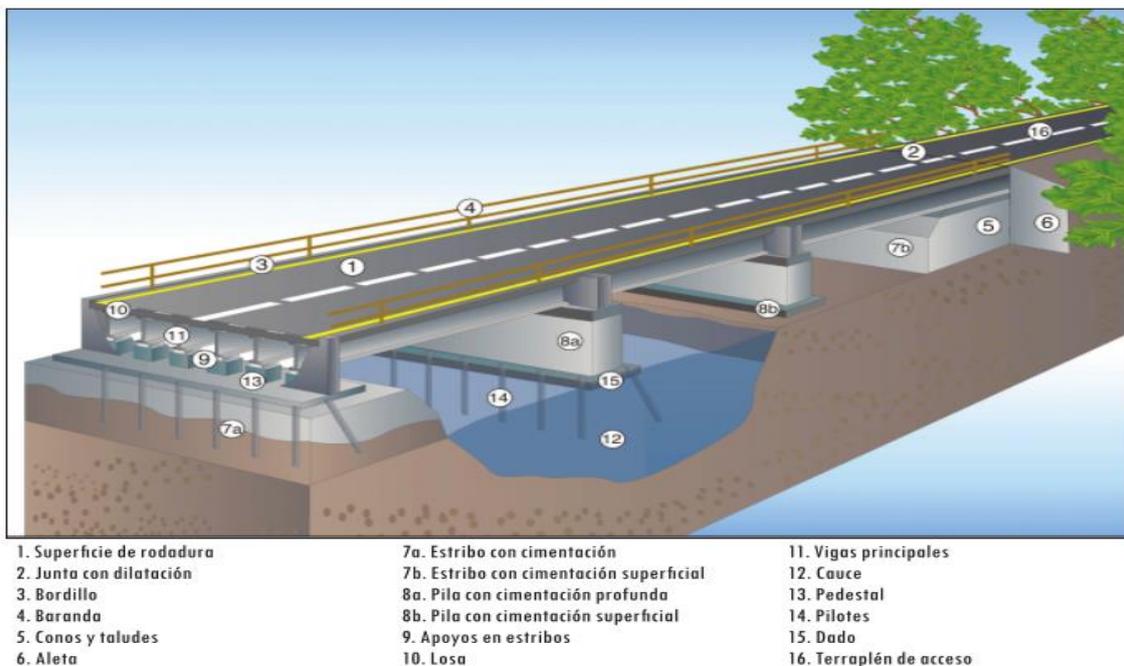


Ilustración 3. Componentes estructurales de puentes.

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

3.1.3 MATERIALES

Palacios Otero (2012) menciona que los conocimientos hacia los materiales han hecho que se puedan optimizar las secciones de la estructura, lo cual sumado al resultado de análisis y al uso de criterios técnicos, ha logrado el desarrollo de nuevos tipos de puentes, que se adaptan mejor a la función estructural del conjunto. El tipo de material a ser utilizado en la estructura representa un factor limitante en cuanto a las longitudes de los claros y por ende a la ubicación de los apoyos. Los materiales más utilizados en la elaboración de un puente son el concreto y el acero.

3.1.3.1 CONCRETO

- Concreto ciclópeo: El uso de este tipo de concreto se ve limitado por su baja capacidad hacia los esfuerzos de tensión, lo cual reduce la capacidad a flexión de este tipo de estructura, esta condición limita su empleo a elementos secundarios de poca importancia o para elementos masivos que reduzcan los efectos de flexión.
- Concreto armado: El uso de concreto armado en puentes es muy variado, se emplea como elemento principal así como en elementos secundarios. También es utilizado para las distintas estructuras que conforman la subestructura, como estribos, pilares, muros de contención, zapatas superficiales y pilotes.
- Concreto presforzado: El concreto presforzado es ampliamente utilizado en elementos principales. Su comportamiento a la acción de cargas es más eficiente que la del concreto armado, mediante este se logran elementos de menores dimensiones y por lo tanto, menor peso propio lo cual resulta beneficioso (Palacios Otero, 2012).

3.1.3.2 ACERO

Además del concreto, el acero es el otro material más utilizado en la construcción de un puente. A medida que la longitud de los elementos de la estructura es mayor, el peso propio de estos aumenta en función de las dimensiones necesarias para el buen comportamiento de la estructura, de modo que es necesario utilizar materiales con mayor relación resistencia/peso propio que el concreto (Palacios Otero, 2012).

3.1.4 ESTRUCTURACIÓN

3.1.4.1 PUENTES DE LOSA

Este tipo de cubierta se utiliza generalmente para luces menores o iguales a 15 metros, cuando es concreto reforzado, dado que para este intervalo de luces resulta ser una solución competitiva desde el punto de vista económico comparado con los puentes de viga y losa. Transversalmente puede ser construido mediante una losa con sección maciza o aligerada y en el sentido longitudinal los posibles tipos son de una luz simplemente apoyada, luces simples simplemente apoyadas, luces continuas y pórtico continuo (Muñoz Díaz, 2011).

Este sistema estructural incluye vigas de borde en sus extremos, donde se apoyan las barandas. Las luces continuas se utilizan cuando hay buenas condiciones del suelo de fundación y se tienen cimentaciones adecuadas de cada uno de los soportes, de tal forma que no se produzcan asentamientos que puedan generar solicitaciones muy grandes en el elemento continuo (Muñoz Díaz, 2011).

Las ventajas que este sistema brinda son las siguientes:

- No tienen necesidad de juntas de dilatación intermedias.
- Disminuye el refuerzo longitudinal superior e inferior y también el refuerzo transversal.
- Logran elementos con menor altura sobre todo en el centro de la luz, que son convenientes desde el punto de vista estético y económico.
- Disminuyen la altura de los apoyos por tener menor altura la losa.

Para las losas con esviajamiento, la estructura se diseña normalmente para refuerzo perpendicular al tráfico con una longitud que corresponde al eje de la cubierta del puente. En las ilustración 4 y 5 se muestra un esquema de un puente losa con condición de continuidad completa y el proceso constructivo de un puente losa, donde se aprecia su la cantidad de refuerzo requerido para puentes de gran magnitud.

Cuando el ángulo es muy grande se debe utilizar como luz de diseño la distancia entre los soportes y se debe tener especial cuidado en refuerzo de las esquinas (Muñoz Díaz, 2011).

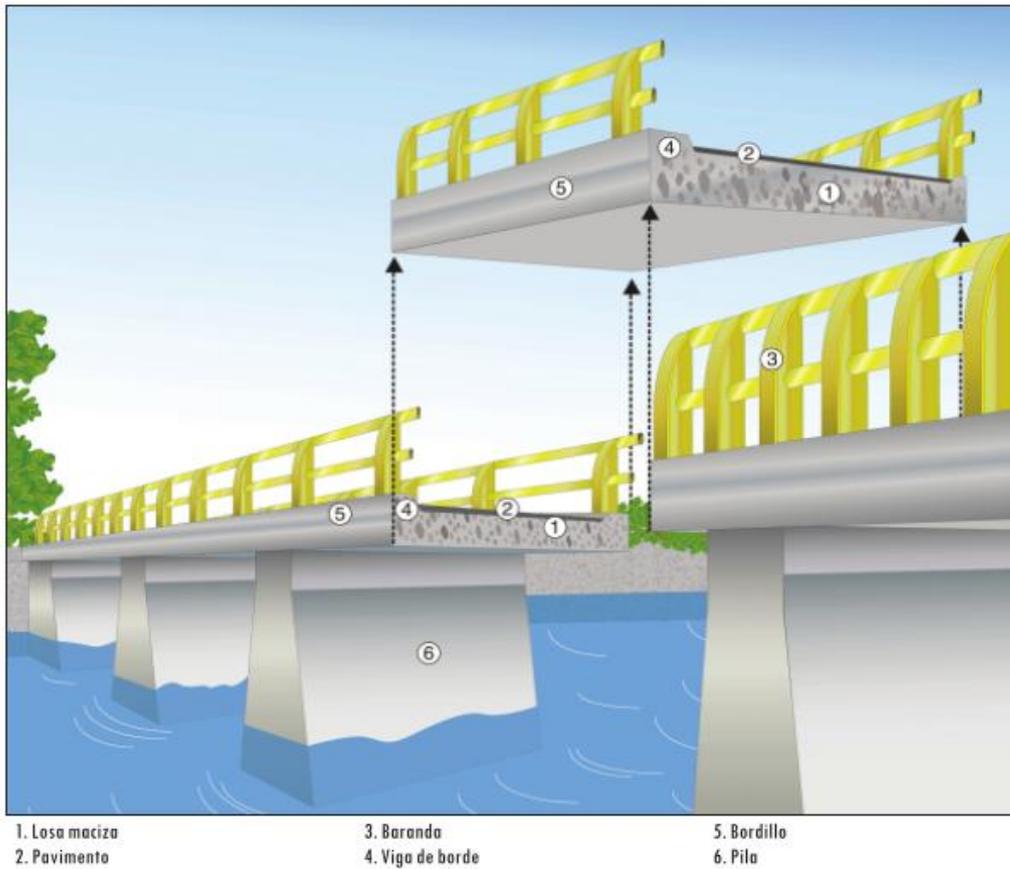


Ilustración 4. Esquema (Puente de losa)

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).



Ilustración 5. Proceso constructivo (Puente Losa)

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

3.1.4.2 LOSA Y VIGAS

La mayoría de los puentes (dentro de esta tipología) cuentan con un entrepiso el cual consiste en losas de concreto reforzado con refuerzo principal perpendicular al tráfico, apoyadas en vigas longitudinales y riostras, las cuales pueden ser de concreto postensado, de concreto reforzado o acero armado (Suarez et al., 2013).

En el sentido longitudinal pueden ser simplemente apoyadas, simplemente apoyadas múltiples o continuas. Generalmente este tipo de entrepiso tiene vigas transversales o riostras distribuidas simétricamente en la longitud del puente, que tienen la función de ayudar en la distribución de cargas en el sentido transversal y de suministrar rigidez de torsión a la cubierta o tablero (Muñoz Díaz, 2011).

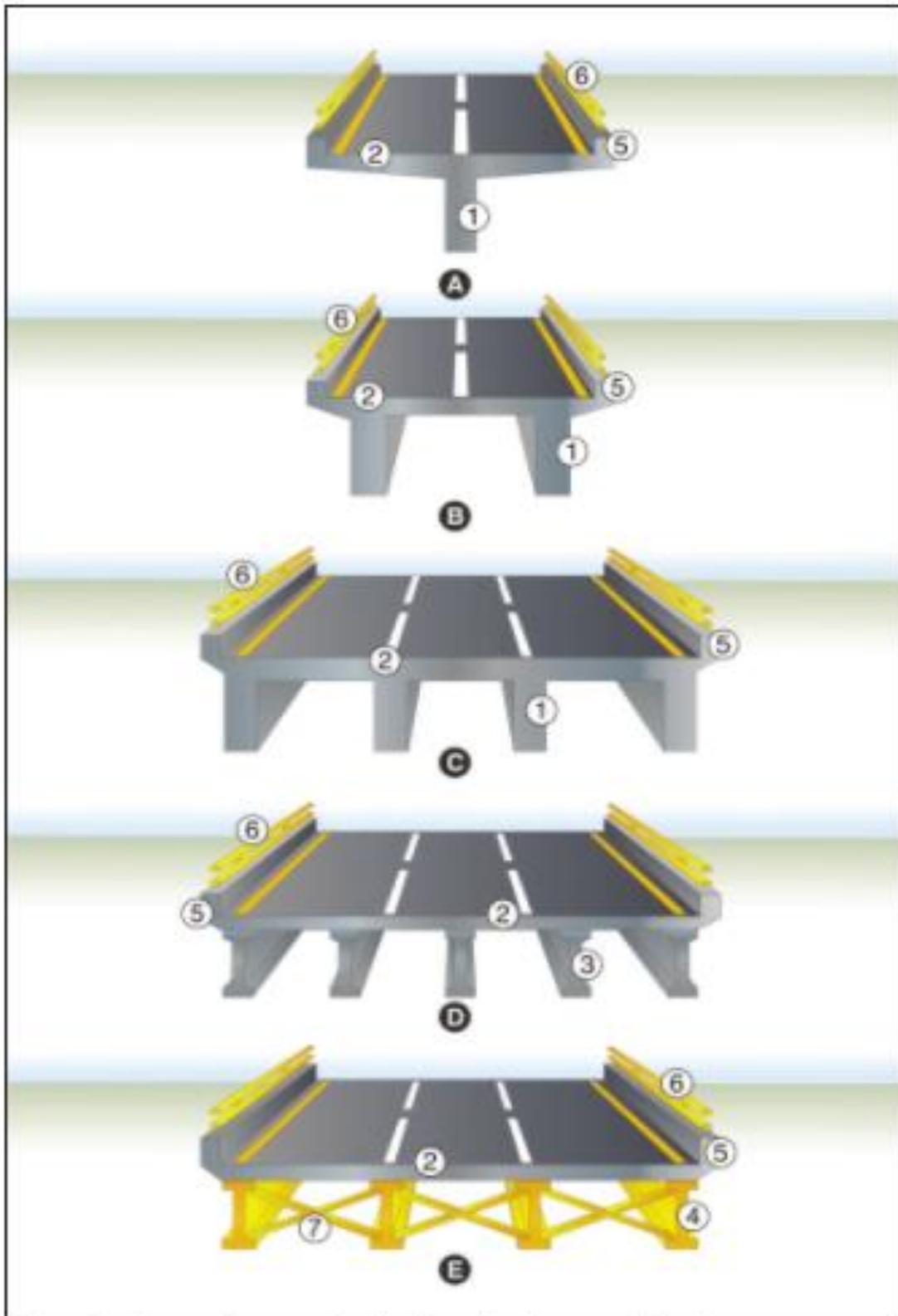


Ilustración 6. Proceso constructivo (Puente losa y vigas)

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

En la ilustración 6 se observa la construcción de losa y posteriormente la finalización de vigas y riostras de apoyo. Debido a que esta tipología suele ser de las más comunes para regiones locales, se recomienda documentarse sobre los siguientes aspectos al momento de su diseño.

- Resistencia del concreto y acero.
- Carga viva utilizada en su diseño.
- Tipo de refuerzo a flexión (reforzado y/o presforzado).
- Tipo de refuerzo a cortante.
- Proceso constructivo.



- | | | |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------|
| 1. Viga rectangular en concreto | (generalmente pretensado) | 6. Barandas |
| 2. Losa en concreto | 4. Viga "I" en acero | 7. Arriostamientos |
| 3. Viga "I" en concreto | 5. Bordillo | 8. Viga rastro |

Ilustración 7. Componentes estructurales de puentes de viga y losa.

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

3.1.5 ELEMENTOS ESTRUCTURALES RELACIONADOS A LA CONTINUIDAD DEL PUENTE

3.1.5.1 SUPERFICIE DE RODADURA

La superficie de rodadura con una rugosidad adecuada permite el paso de vehículos y camiones por esta zona del puente. Dicho componente debe estar siempre en buen estado para que no afecte componentes del puente. Las ilustraciones 8 y 9 muestran los distintos tipos de superficie de rodadura para determinar o evaluar condición de continuidad en puentes y su esquema. La superficie puede ser de mezcla asfáltica, concreto, acero (con dispositivo de fricción), madera u otro material. La continuidad de este elemento depende de la utilización o exclusión de las juntas de expansión (Muñoz Díaz, 2011).

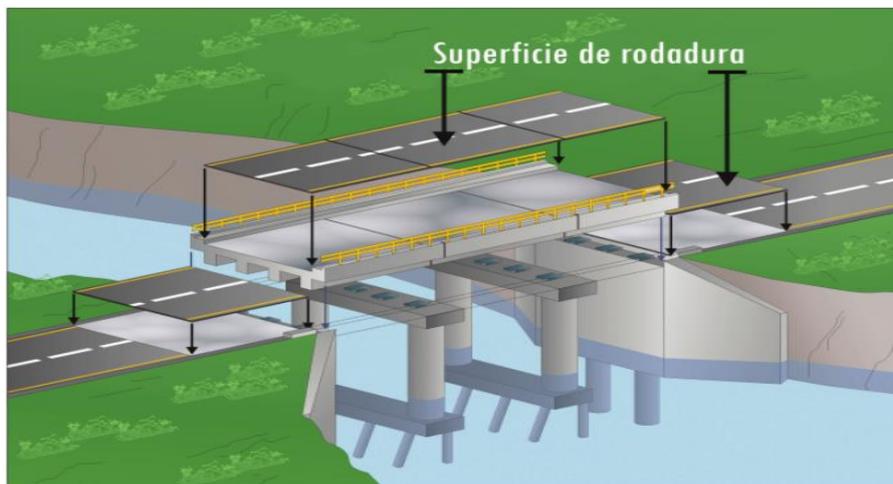


Ilustración 8. Superficie de rodadura

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).



Ilustración 9. Tipología de superficie de rodadura

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

3.1.5.2 JUNTAS DE EXPANSIÓN

Durante toda la vida útil, el hormigón sufre cambios de volumen. El fraguado causa retracción durante toda la vida del hormigón, pero mayor durante el fraguado y en los primeros meses de edad del hormigón. Por otro lado, los cambios de temperatura provocan retracciones y dilataciones constantes. Cuanto mayor sea el cambio de temperatura del aire, mayores son los cambios de volumen, y las tensiones que éstos generan, la ilustración 10 muestra un esquema de un tipo de juntas de expansión comúnmente utilizadas (dentadas).

Las juntas de expansión o dilatación son los elementos responsables de permitir los movimientos relativos como desplazamientos y rotaciones entre dos partes en el puente, las cuales pueden ser la zona de acceso y el tablero (losa, vigas, etc.) del puentes, generalmente los estribos y las dos partes del tablero lo cual se presentan generalmente en las pilas. Este apartado de la investigación tendrá un especial enfoque debido al involucramiento del componente estructural con la alternativa propuesta.

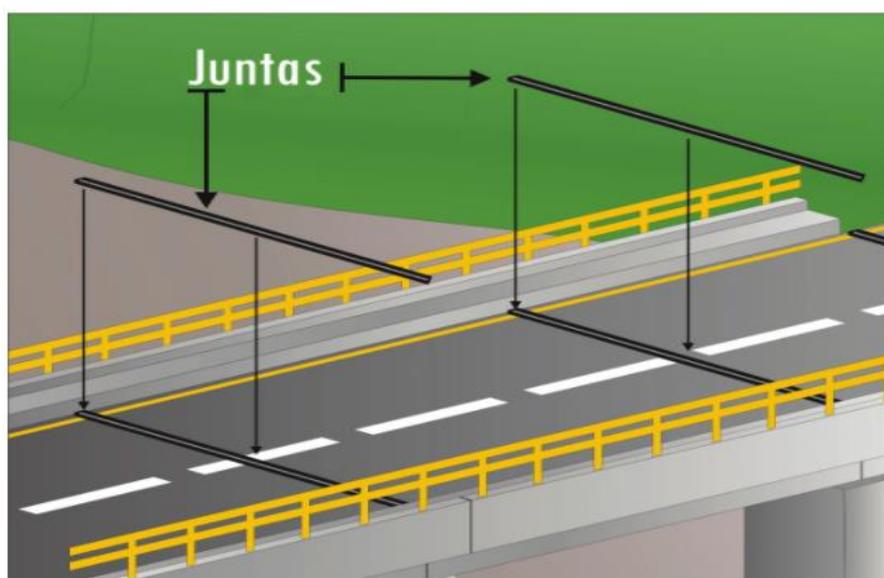


Ilustración 10. Juntas de expansión en puente

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

Las juntas de expansión son un componente que debe asegurar que los movimientos horizontales que se generan en el puente no afecten los elementos estructurales adyacentes. Es diseñado para dar continuidad a la capa de rodadura y debe ser impermeable, de tal forma que el agua de escorrentía de la vía no afecte los apoyos, estribos y pilas. No debe ser fuente de ruidos y vibraciones al soportar las cargas de tráfico (Muñoz Díaz, 2011).

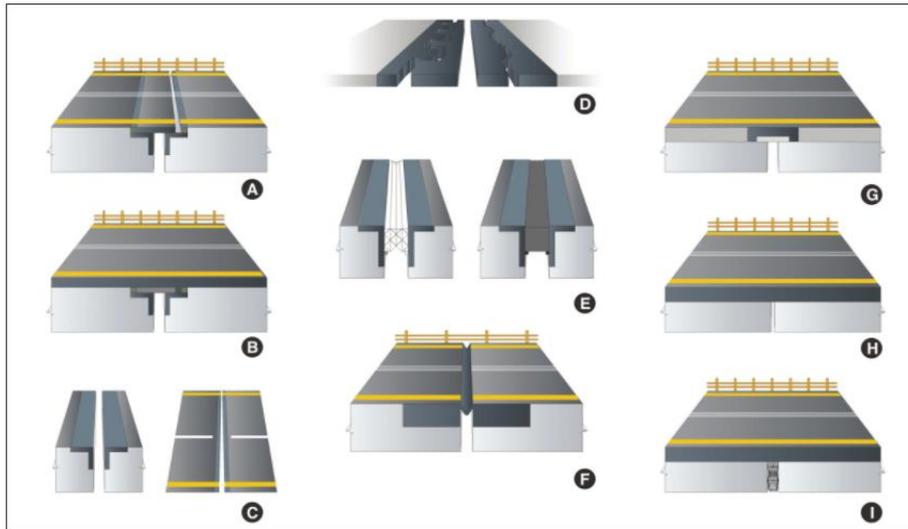


Ilustración 11. Tipos de juntas de expansión

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

La ilustración 11 expone las tipologías de juntas utilizadas en los puentes donde: (A) Placas de acero con ángulos. (B) Placa de acero más ángulos de asfalto. (C) Ángulos sin placa de acero. (D) Dentada. (E) Acero con sello de neopreno comprimido. (F) Bloque de neopreno. (G) Goma asfáltica. (H) No dispositivo de junta (losa de enlace) (I) Cartón asfáltico.

Muñoz Díaz (2011) afirma que las juntas se deben de seleccionar con base en tres criterios: nivel de movimiento horizontal que debe soportar transmitido por la superestructura, tipo de construcción y los requisitos de impermeabilización. Sugiere diferentes tipos de juntas basados en el movimiento horizontal que deben soportar. Las que permiten soportar movimientos pequeños de 10mm (ilustración 12), movimientos medios de 15mm a 80mm debido a la composición flexible de sus materiales (ilustraciones 13 a 17) y largos movimientos por su composición estructural de 100 a 120mm (ilustraciones 18 y 19).

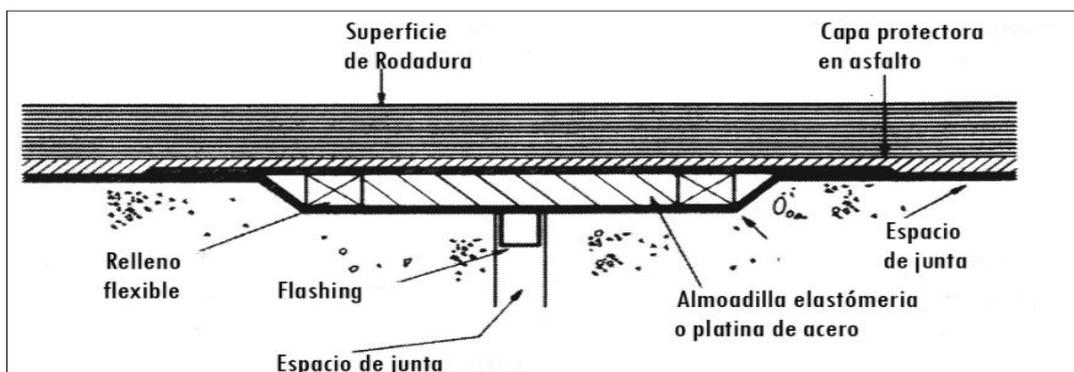


Ilustración 12. Junta enterrada

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

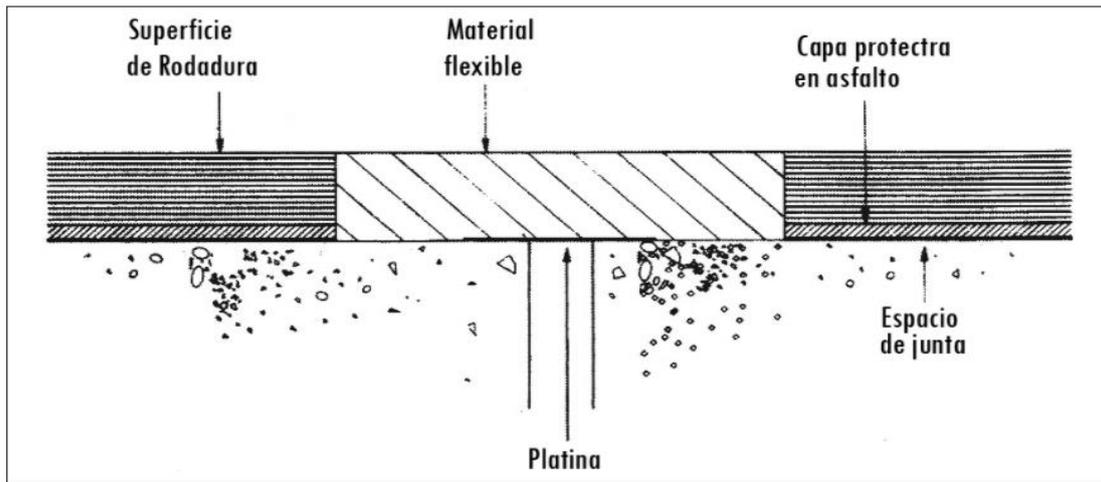


Ilustración 13. Junta asfáltica

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

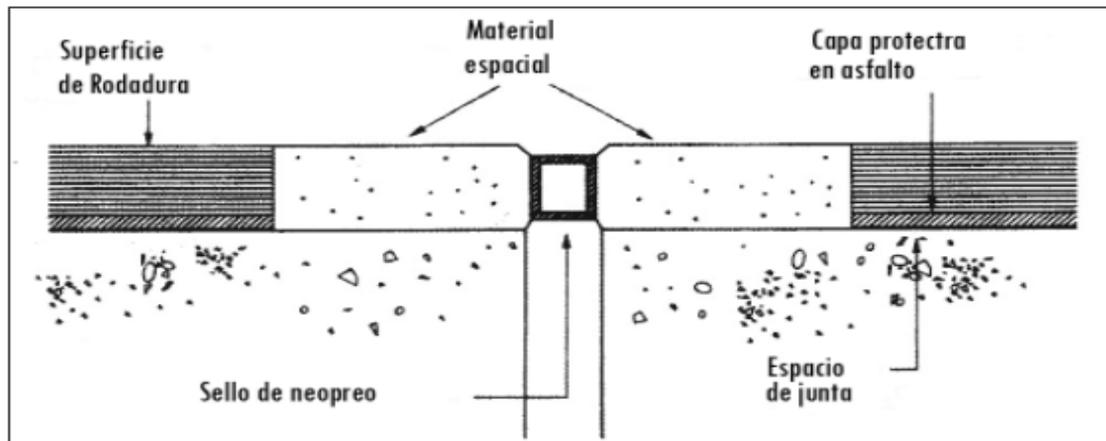


Ilustración 14. Junta con tira de sellado de acero

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

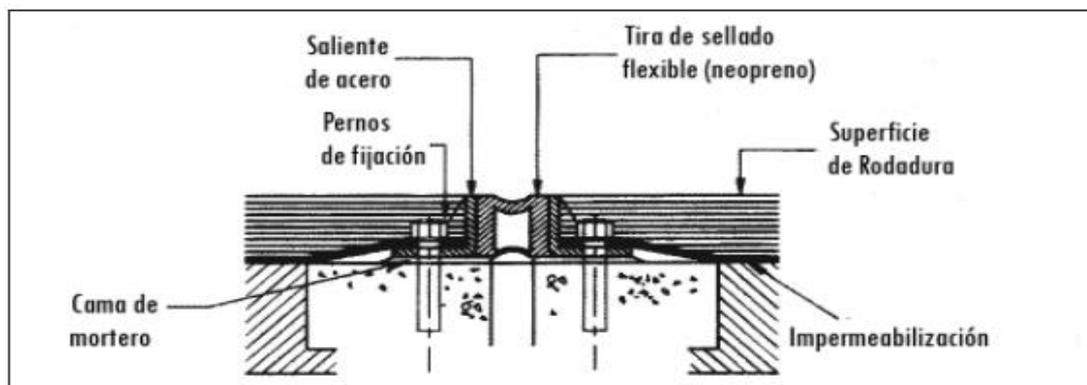


Ilustración 15. Junta con pernos

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

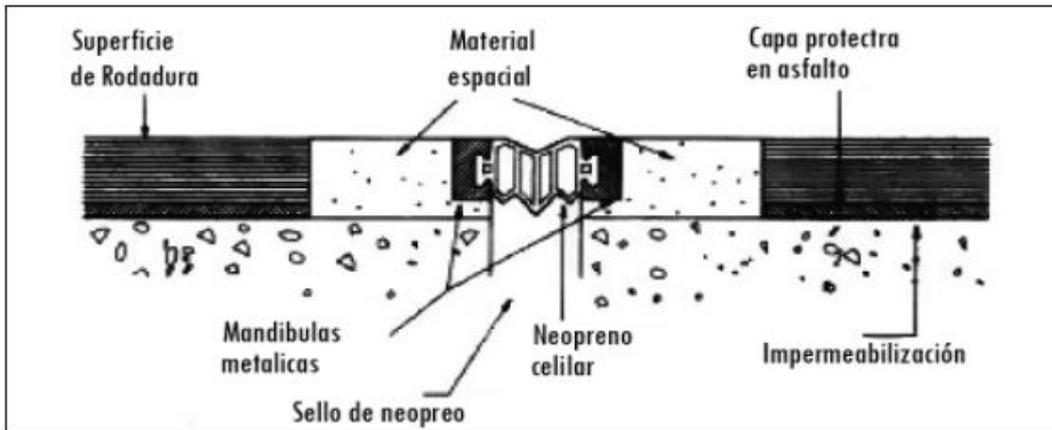


Ilustración 16. Junta con tira celular de sellado y metal

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

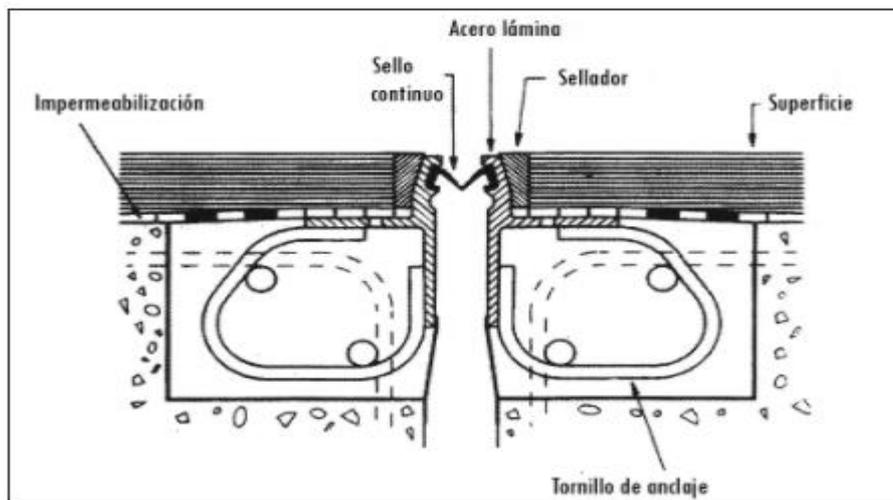


Ilustración 17. Junta con tipo de sellado en "v".

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

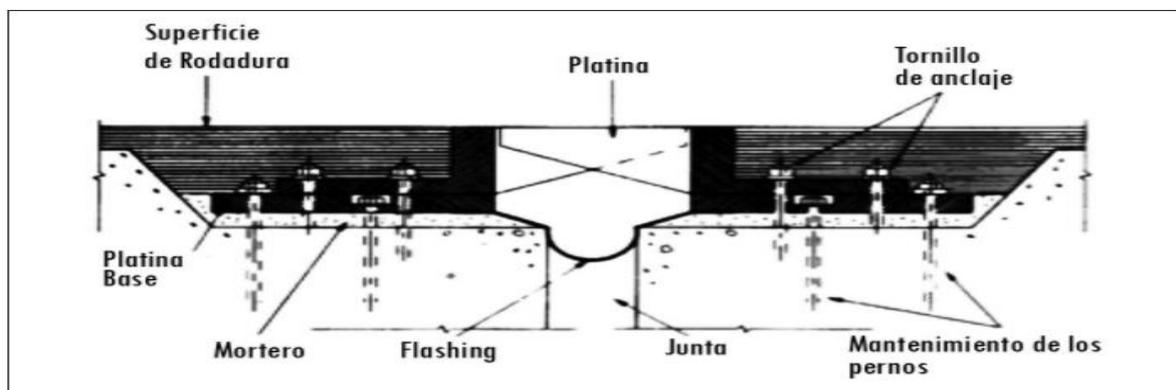


Ilustración 18. Junta dentada con capacidad de largos movimientos

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

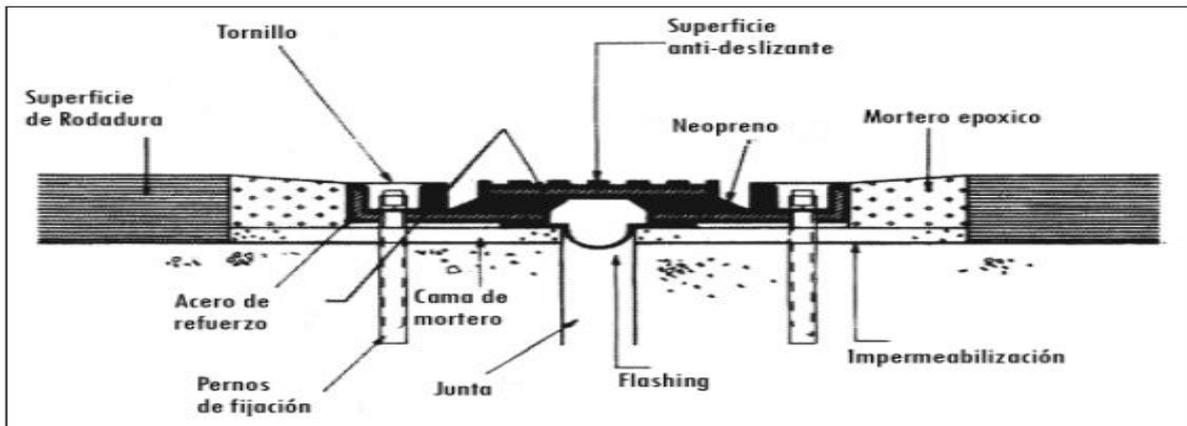


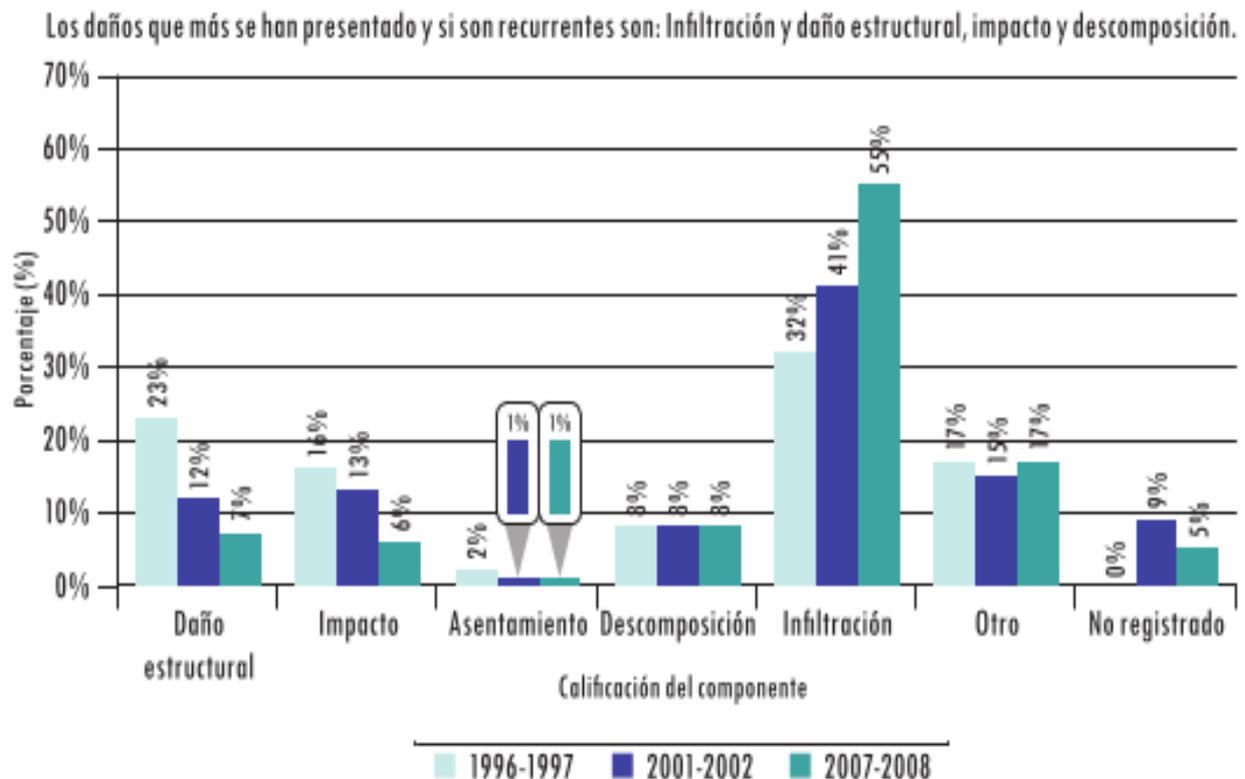
Ilustración 19. Junta tipo modular para largo movimiento

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

- Tipos de daño

La tabla 1 demuestra la cantidad de daños estructurales a los que el sistema de juntas es propenso a sufrir. Los daños más frecuentes detectados en las inspecciones de las juntas son la infiltración y el daño estructural.

Tabla 1. Daños más frecuentes en juntas de expansión (Colombia, 2008)



Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

La infiltración se presenta debido al inadecuado diseño de la zona alrededor de las juntas en donde se generan problemas de empozamiento de agua y posterior afectación de los componentes de la estructura como se observa en la ilustración 20. A causa de ello se generan problemas de infiltración que aceleran la degradación y deterioro de los componentes del puente adyacentes (apoyos, losa en concreto reforzado, etc...) así mismo, se presenta corrosión en ángulos y platinas que hacen parte de los tipos de juntas de acero (Matteo, 2015).



Ilustración 20. Empozamiento e infiltración en juntas

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

Muñoz Díaz (2011) Asegura que el daño estructural se presenta debido a las deficiencias en el diseño. Esto implica que la junta no tenga la capacidad de absorber las deformaciones verticales y horizontales entre la zona de acceso y el tablero de puente como se logra apreciar en la ilustración 21. Esto sucede cuando el tipo de junta seleccionado no es el adecuado, lo cual depende del tipo de puente, su tipología y longitud. Inadecuada conexión soldada entre los ángulos y las platinas. Falla de los anclajes que unen los componentes del dispositivo de las juntas con las partes adyacentes del puente (losa, diafragma, etc...). Así mismo, el aumento de las cargas legales previstas y la inadecuada construcción de los guardacantos, por falta de adherencia y mala calidad del concreto. Inadecuada conexión

soldada entre los ángulos y las platinas, la cual es generalmente intermitente con diversos defectos de fabricación que generan una concentración de esfuerzos y posterior deterioro, desprendimiento y falla de los elementos de la junta.



Ilustración 21. Daño estructural en junta de expansión

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

Los asentamientos en los terraplenes de acceso producen un desnivel con el tablero de la superestructura del puente, lo cual genera un aumento del impacto vehicular.

Obstrucción, esto se debe a todos los desperdicios acumulados en la junta. Esto afecta los movimientos horizontales y verticales que se deben de soportar. La ilustración 22 muestra un ejemplo de obstrucción en junta debido a escombros que limita los movimientos.



Ilustración 22. Obstrucción de movimientos en junta de expansión

Fuente: (Chang & Lee, 2002).

- Mantenimiento y rehabilitación

Para el mantenimiento de este componente se sugiere limpiar la junta de manera rutinaria. Reparación y/o reposición de los sellos de junta, reparación y sujeción de pernos, pintura de componentes de acero de manera periódica. Estas obras se recomienda realizarlas dependiendo del tipo junta involucrada, tipo de daño y severidad que la inspección estructural demuestre (Matteo, 2015).

Las obras de rehabilitación más sugeridas son las de cambio a junta de goma asfáltica y reparación de la junta.

1) Rehabilitación de junta

Esta labor incluye la limpieza y el mejoramiento de cada una de las partes del componente con daños relevantes. Esta obra se cataloga de rehabilitación y no de mantenimiento periódico, cuando su nivel de seriedad es alto. Para estos casos se sugiere emplear el procedimiento de mantenimiento periódico determinado acompañado con inspecciones especiales (dependiendo del tipo de daño). La ilustración 23 muestra las diversas reparaciones y mantenimientos necesarios a realizarse en distintos tipos de juntas para lograr un óptimo funcionamiento estructural en el puente.

En el diseño de reparación de juntas para puentes de varias luces se sugiere estudiar la eliminación de las juntas intermedias para mejorar las exteriores. También verificar si el tipo de junta corresponde al más apropiado, lo cual depende del tipo de puente y la longitud del mismo (Muñoz Díaz, 2011).



Ilustración 23. Reparación de juntas varias

Fuente: (Chang & Lee, 2002).

2) Cambio de junta de acero

En esta actividad se debe de asegurar que el componente cumpla con su función estructural mediante la remoción de juntas metálicas que se encuentren tanto desprendidas como en mal estado como se esquematiza en la ilustración 24. Evitando la obstrucción de la junta y el consiguiente deterioro en los elementos adyacentes a ella, lo que le permita absorber tanto las deformaciones verticales como horizontales para las que está diseñada (Muñoz Díaz, 2011).

- Para la ejecución de la actividad de cambio de juntas es necesario definir el manejo del tráfico con la entidad responsable. Para esto se recomienda tener en consideración las variables: tipo de puente, tránsito promedio semanal, tipo de vía, labores de socialización con los municipios cercanos y conceptos de la policía de carreteras. En estos casos se debe de optar por la opción de reemplazar las juntas por cada calzada, para no afectar en forma total el paso del tráfico.
- Establecer el tipo de junta, lo cual depende de la tipología del puente y su longitud, que debe estar acompañado de un diseño estructural especializado utilizando las especificaciones pertinentes.
- Delimitar sobre la superficie de rodadura del puente las juntas que se encuentran en mal estado y que requieren reemplazo.
- Retirar las juntas que se van a cambiar, que son las que presentan deterioro. Estas juntas deberán ser removidas mediante procedimientos que aseguren que no se producirán daños a los concretos adyacentes a la zona ni a las armaduras de acero de los mismos. Para retirar la junta deberá formarse un cajón dentro del concreto que la rodea, para lo cual el área por remover deberá marcarse antes de iniciar los trabajos, para luego cortarse con una sierra por su perímetro, hasta una profundidad mínima de 50mm, salvo que existan armaduras de refuerzo a menor profundidad, en cuyo caso el corte deberá ser menos profundos para evitar dañarlas. El concreto deberá demolerse hasta el nivel necesario para retirar la junta existente mediante las herramientas manuales, pudiéndose usar también martillos neumáticos livianos, debiéndose dejar paredes verticales y un mínimo de irregularidades en el perímetro del corte.
- Finalmente, instalar la nueva junta (Muñoz Díaz, 2011).



Ilustración 24. Esquema de cambio de junta

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

Para la instalación de la nueva junta se debe tomar en cuenta que las paredes y fondo del cajón se deberán limpiar con aire comprimido a presión (asegurando que el aire no contenga aceites). Así mismo deberá removerse, mediante escobillado, todo el óxido a la vista en los hierro. El aditivo de adherencia se aplicará a las paredes y fondo de la caja mediante brocha, rodillo u otros elementos similares. El concreto de relleno deberá vaciarse mientras el aditivo de adherencia se encuentre fresco o pegajoso al tacto (10 horas a 20 grados centígrados). Finalmente, el concreto deberá compactarse mediante vibradores de inmersión o de pared, pudiéndose utilizar varillas de acero solo donde estos no puedan entrar. El curado deberá realizarse mediante una membrana de curado o manteniendo humedad constante por un periodo de 7 días (Muñoz Díaz, 2011).

En conclusión, los puentes tradicionales utilizan el sistema de juntas de dilatación que son obras útiles y necesarias ya que permiten desplazamientos controlados para que de esta manera sea posible mitigar los efectos generados por el movimiento de la superestructuras debido al cambio de volumen del concreto.

Sin embargo, como se pudo notar en el apartado anterior; la utilización de las juntas de dilatación sobre apoyos conlleva importantes gastos de mantenimiento, rehabilitación y reparación. Por lo que se recomienda adoptar medidas para eliminar las juntas y limitar su utilización a losas de proximidad solamente. En el capítulo 3 de la presente investigación se revisan las posibles alternativas, enfocándose en los puentes integrales (continuidad completa) y los puentes de continuidad parcial.

3.1.5.3 APOYOS

Los apoyos son elementos encargados de transmitir en forma adecuada las cargas de la superestructura (vigas, armaduras, etc...) a los componentes de la subestructura (estribos, pilas, aletas, muros, etc.) como se esquematiza en la ilustración 25. Con relación a la forma como se pueden presentar los apoyos en un puente se tienen: fijos y móviles, fijos y móviles en las pilas y fijos y móviles en las vigas. La ilustración 26 muestra la variedad de apoyos que existen para soportar un sistema estructural. Donde, (A, B y C) Apoyos fijos de acero. (D) Junta de construcción o apoyo de deslizamiento. (E y F) Balancín de acero. (G y H) Rodillos.

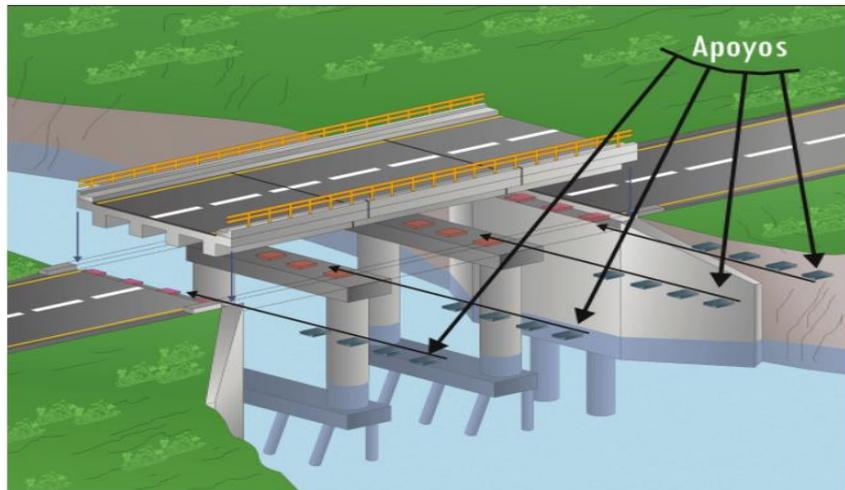


Ilustración 25. Apoyos en puentes

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

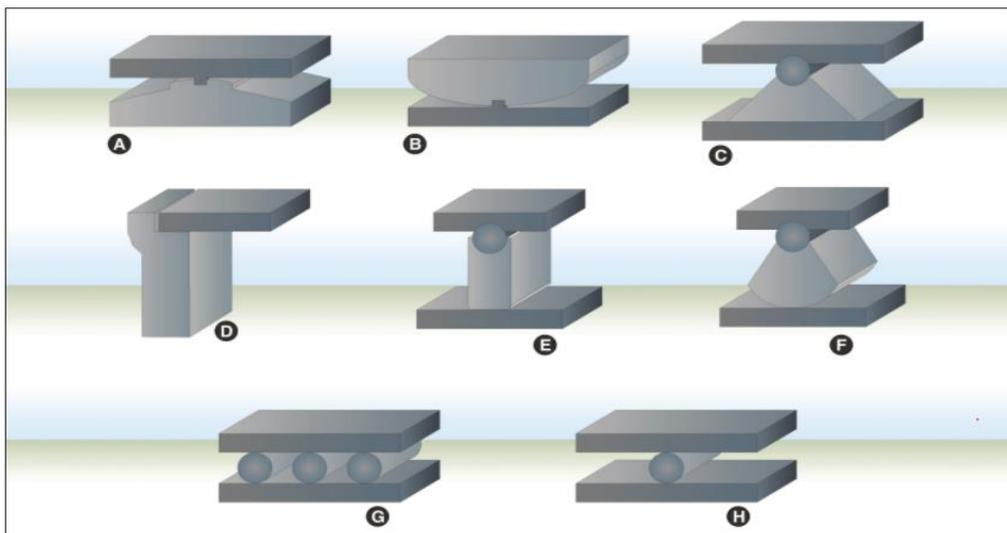


Ilustración 26. Tipos de apoyos de puentes

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

Investigaciones de continuidad parcial realizadas a través de procesos experimentales con modelos tridimensionales demuestran que para analizar los efectos que podrían tener las configuraciones de apoyos de la viga, se consideraron dos tramos de viga contiguos con una losa de enlace que proporciona una continuidad parcial entre ellos. Las configuraciones de apoyos consideradas de las dos vigas fueron rodillo-bisagra-bisagra-rodillo (RHHR), bisagra-rodillo-rodillo-bisagra (HRRH), bisagra-rodillo-bisagra-rodillo (HRHR), bisagra-rodillo-rodillo-rodillo (HRRR) y rodillo-rodillo-rodillo-rodillo (RRRR). Aunque para cada una de las configuraciones de apoyo consideradas se obtuvieron resultados diferentes, se observó que los resultados que quizás podrían considerarse más relevantes fueron dos: rodillo-bisagra-bisagra-rodillo (RHHR) y bisagra-rodillo-rodillo-rodillo (HRRH). Estas condiciones de apoyo representan dos tramos estadísticamente estables y podrían verse como el límite superior e inferior de las posibilidades de desplazamiento del soporte lateral (Canales, 2019).

Las líneas de influencia en los diagramas para ambas condiciones de apoyos, se muestran a continuación. Las líneas de influencia demuestran el comportamiento de un sistema estructural de un puente, bajo las distintas condiciones de apoyo idealizados (Ilustración 27) y se demuestran los relevantes cambios en las líneas de influencia según los sistemas de apoyos aplicados (Ilustración 28). De esta manera es posible apreciar el impacto que ambas condiciones de soporte o apoyo tienen en los momentos generados (EISafty & Okeil, 2005).

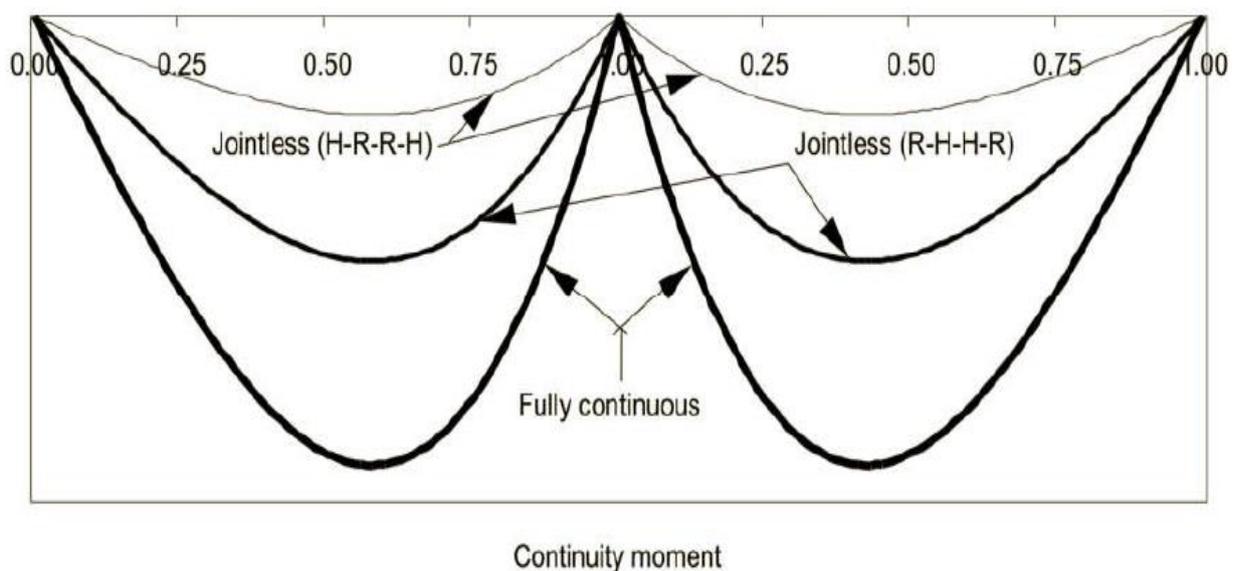


Ilustración 27. Líneas de influencia de momento continuo en un puente de doble tramo

Fuente: (EISafty & Okeil, 2005).

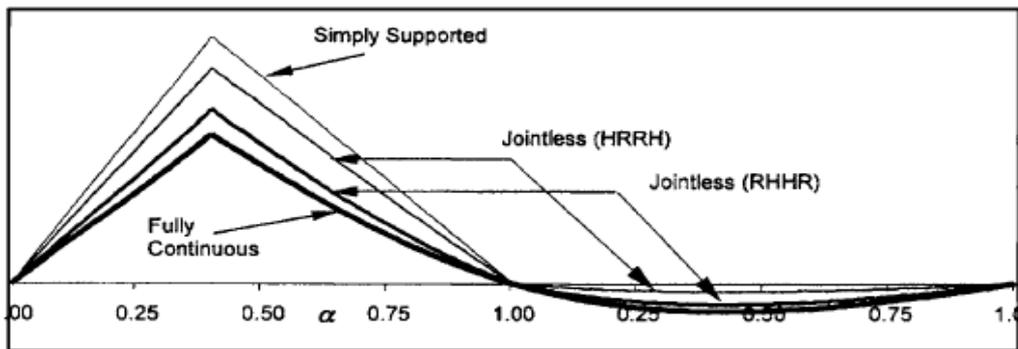


Ilustración 28. Momento positivo

Fuente: (EISafty & Okeil, 2005).

EISafty & Okeil (2005) Afirman que los anteriores diagramas demuestran que los apoyos de rodillos (HRRH) introducen poca continuidad en comparación a las bisagras (RHHR). Esto se debe a que los rodillos brindan mayor libertad lo que permite a las vigas más movilidad y se puedan desplazar más cerca una a la otra haciendo decrecer el espaciado que se encuentra entre ellas, especialmente cuando se da el caso de la elongación de estas debido a las fuerzas tensionantes que la losa de enlace brinda al sistema.

Cuando los apoyos en los extremos de la viga se encuentran en la junta, estas no tienen posibilidad para el desplazamiento longitudinal, como es el caso de RHHR, la tensión resultante en la losa de enlace se vuelve considerable. En este particular caso no existe la posibilidad para el desplazamiento, entonces cuando la viga recibe cargas flexionantes la parte superior de esta tiene una fuerza de rotación en sentido interno hacia ella misma y una rotación contraria para la losa de enlace, lo que produce una fuerza de tensión (Canales, 2019).

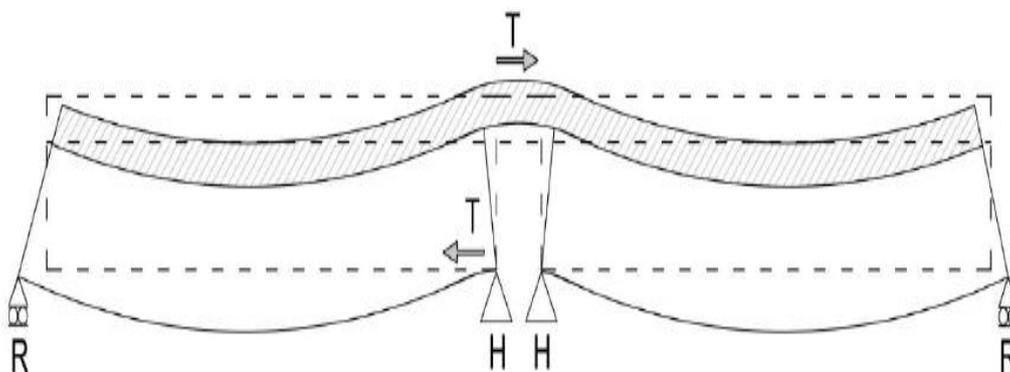


Ilustración 29. Diagrama de configuración rodillo-bisagra-bisagra-rodillo (RHHR)

Fuente: (Canales, 2019).

Para el segundo caso donde ambos extremos de la viga tienen la posibilidad de desplazamiento longitudinal, como es el caso de (HRRH), la fuerza de tensión que se desarrolla en la losa de enlace requiere que la reacción horizontal se transmita desde el extremo opuesto por medio de la viga misma (Canales, 2019).

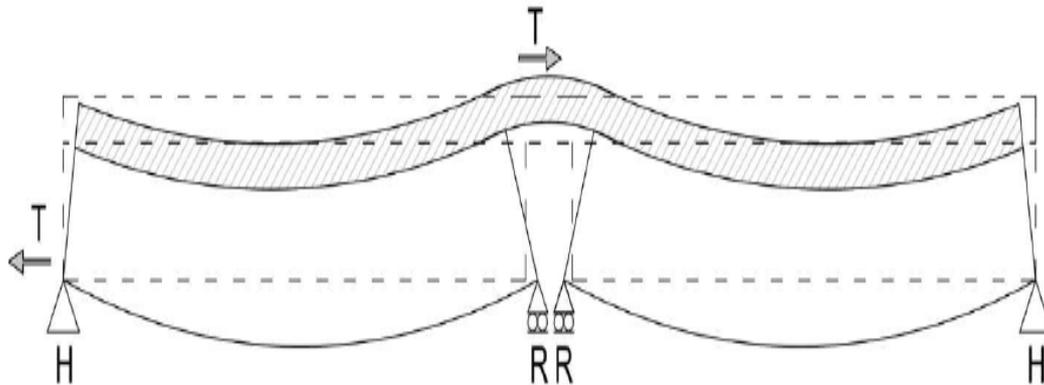


Ilustración 30. Diagrama de configuración bisagra-rodillo-rodillo-bisagra (HRRH)

Fuente: (Canales, 2019).

Ambos casos de apoyo anteriormente analizados representan casos extremos. La construcción en la realidad conlleva técnicas que no tendrán ni rigidez longitudinal nula que ofrece los apoyos de rodillo, ni tampoco la rigidez longitudinal infinita de las bisagras, más bien se tienen valores intermedios en la práctica (Muscarella & Yura, 1995).

Los apoyos de cojinete poseen rigidez longitudinal finita lo que genera un desplazamiento y al mismo tiempo una reacción en el apoyo (Muscarella & Yura, 1995). En la ilustración 31 se muestra un esquema de apoyos elastoméricos con sus capas interiores y exteriores, dada la aplicabilidad que estos apoyos tienen en la práctica, estos serán los apoyos a utilizar en el diseño de los modelos estructurales.

El hecho de que se considere que ambos soportes tienen una rigidez lateral finita, a diferencia de la rigidez longitudinal infinita que puede proporcionar un soporte con bisagras, la rigidez general del sistema es menor que la de una viga apoyada simple. En este caso, la fuerza de tensión que se origina en las rotaciones del extremo de la viga se equilibra entre la losa de enlace y ambos soportes. Esta interacción da como resultado una combinación de los comportamientos en los dos anteriores casos dado que parte de la fuerza de reacción ocurre en el soporte en la articulación, y parte de esto ocurre en el soporte lejano (Chebole, 2011).

Debido a la interacción con la rigidez axial de la viga, la parte de la fuerza que se produce en el soporte lejano interactúa con la losa de enlace de manera similar al caso HRRH. La porción que ocurre en el soporte en la articulación puede equilibrarse directamente con la losa de enlace, esto es similar al caso de RHHR. Cabe señalar que la fuerza de reacción combinada general será menor que la de cualquiera de los casos de la viga simplemente apoyada (HRRH o RHHR) dado que ambos soportes experimentarán un desplazamiento debido a la naturaleza de su rigidez (Chebole, 2011).

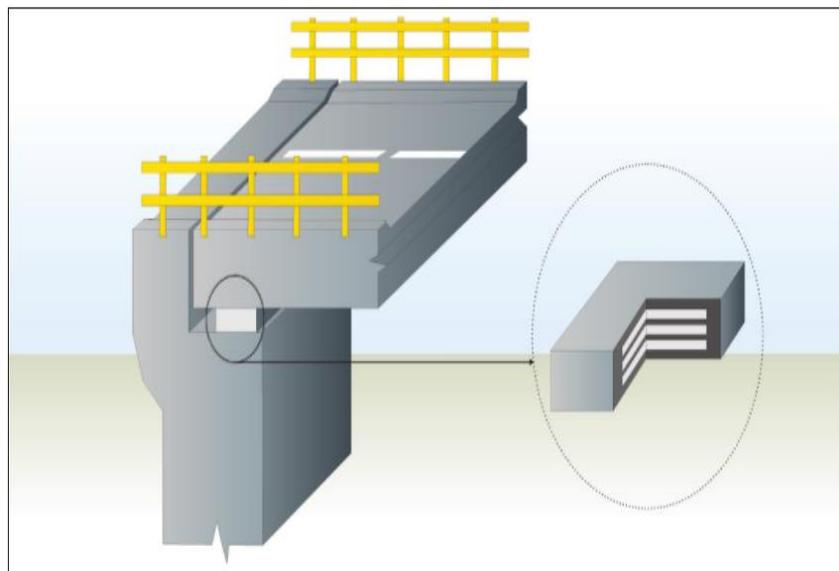


Ilustración 31. Apoyos Elastoméricos

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

3.1.6 INSPECCIONES EN PUENTES

La inspección de puentes es una investigación y evaluación detallada, mediante ensayos semidestructivos y no destructivos, de los daños detectados en los elementos del puente a través de las inspecciones visuales. Consiste en auscultaciones profundas de la estructura que incluyen ensayos especializados en campo y en laboratorio, recomendados por la inspección principal cuando el encargado no está seguro de la causa de los daños encontrados. Este tipo de inspección permite determinar la clase de daño presente en los diferentes componentes de los puentes, su extensión y su causa. Es una parte fundamental para el diseño o rehabilitación del componente (Muñoz Díaz, 2011).

Muñoz Díaz (2011) afirma que las etapas sugeridas para llevar a cabo la ejecución de una inspección son las siguientes.

a) Planeación primaria

- Información existente.
- Planos.
- Memorias de cálculo.
- Antecedentes de mantenimiento y rehabilitación.

b) Planeación detallada

- Selección de los métodos de prueba.
- Numero de ensayos.
- Pruebas complementarias.
- Recursos humanos y físicos.

c) Ejecución de ensayos

Realizado de acuerdo con el plan, sin dar opinión de resultados hasta que sean evaluados en detalle en oficina.

d) Evaluación del daño, causas y extensión.

Debe ser realizada por ingenieros experimentados con alto conocimientos de los mecanismos de daño y los métodos de ensayos. Después de terminados los ensayos, se hace una nueva inspección principal, con el objeto de actualizar la base de datos.

e) Estrategias de solución

Basadas en los resultados de las pruebas y el análisis realizado en oficina, se sugieren los siguientes tipos de propuestas:

- Reparación completa.
- Reparación provisional.
- Ninguna obra, esperando una reconstrucción mayor o reemplazo total.
- Debe incluir el año óptimo de reparación, la situación del tráfico, el costo estimado de reparación y el costo de mantenimiento.

f) Análisis económico

Evaluación beneficios-costo para seleccionar la estrategia óptima. La evaluación económica de una estrategia incluye:

- El costo directo de los trabajos de reparación.
- El costo inducido al usuario de la vía.

g) Informes

- Resumen.
- Motivo.
- Registro.
- Evaluación de los registros.
- Estrategias de los registros.
- Estrategias de reparación relevantes, incluyendo costos estimados.
- Recomendaciones pertinentes.

El manual de evaluación de puentes existentes de Estados Unidos (AASHTO) recomienda diferentes ensayos no destructivos y semidestructivos para estructuras de puentes de concreto y acero. Para los ensayos de concreto especifica los siguientes ensayos o inspecciones especiales de acuerdo con los defectos o daños identificados en la tabla 2.

Tabla 2. Tipos de inspecciones especiales en puentes de concreto

Método basado en	Defectos concreto					
	Agrietamiento	Fractura o incrustación por congelamiento	Corrosión	Apariencia y abrasión	Ataque químico	Hormigueros
Resistencia	N	N	P	N	P	N
Sonido	F	N	G ^b	N	N	N
Ultrasonido	G	N	F	N	P	N
Magnético	N	N	F	N	N	N
Eléctrico	N	N	G	N	N	N
Nuclear	N	N	F	N	N	N
Termografía	N	G ^b	G ^a	N	N	N
Radar	N	G ^b	G ^a	N	N	N
Radiografía	F	N	F	N	N	F

G = Muy aplicable. F = Aplicación intermedia. P = Poco aplicable. N = No aplicable. a = Defectos de laminaciones. b = Debajo de pavimentos bituminosos.

Fuente: (AASHTO, 2012).

La tabla 3 demuestra las inspecciones a realizarse en los puentes de acero, esto es de suma importancia para detectar potenciales fallos estructurales y evitarlos.

Tabla 3. Tipos de inspecciones especiales en puentes de acero

Método basado en:	Defectos en soldaduras/acero								
	Grietas superficiales	Grietas profundas	Grietas internas	Grietas fatiga	Vacíos	Porosidad y escoria en soldadura	Espesor	Corrosión. Esfuerzos	Ampollas
Radiografía	N	F ^b	F ^b	P	G	G	F	F	P
Partículas magnéticas - mojado	G	G	N	G	N	N	N	G	N
Partículas magnéticas - seco	F	G	N	G	N	N	N	F	N
Corriente Eddy	F	G	N	N	N	P	P	N	N
Tintas penetrantes	F	G	N	G	N	N	N	G	N
Ultrasonido	P	G	G	G	G	F	F	F	F

b = si la viga tiene grietas. G = muy. F = mediante aplicable. P = poco aplicable. N = no aplicable

Fuente: (AASHTO, 2012).

3.1.7 ENSAYOS

3.1.7.1 ENSAYOS DE CORROSIÓN

La corrosión es un proceso electroquímico que provoca la oxidación o degradación del acero en el hormigón o del acero estructural en puentes de armadura u otra tipología. Las características del hormigón, el medio ambiente y la disposición de las armaduras en los componentes estructurales son los factores asociados con este fenómeno. Los defectos causados por corrosión del acero de refuerzo se manifiestan a través de fisuras en el concreto, paralelas a la dirección de los refuerzos, delaminación y/o desprendimientos del recubrimiento. En componentes estructurales de los puentes que tengan un elevado contenido de humedad, los primeros síntomas de corrosión se evidencian por medio de manchas de óxido en la superficie del hormigón. Los efectos por corrosión en el acero de refuerzo de elementos principales pueden afectar la capacidad estructural, ya que disminuyen la sección transversal y generan pérdida de adherencia entre el acero y el concreto. Dicho fenómeno se encuentra con frecuencia en elementos de concretos de baja calidad, elaborados con altas relaciones agua-cemento, alta porosidad y afectados por humedad o ciclos de

mojado tal como es el caso de las juntas de expansión mencionados en el apartado (3.1.5.2.1) (Muñoz Díaz, 2011).

La ilustración 32 muestra un esquema del proceso corrosivo, debido a que es inevitable al menos debe de controlarse mediante inspecciones rutinarias en los puentes.

La corrosión ocurre por la formación de una celda electroquímica constituida por cuatro elementos principales.

- Ánodo donde ocurre la oxidación.
- Cátodo donde ocurre la reducción.
- Un conductor metálico donde la corriente eléctrica es un flujo de electrodos,
- Un electrolito, que es el hormigón, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.

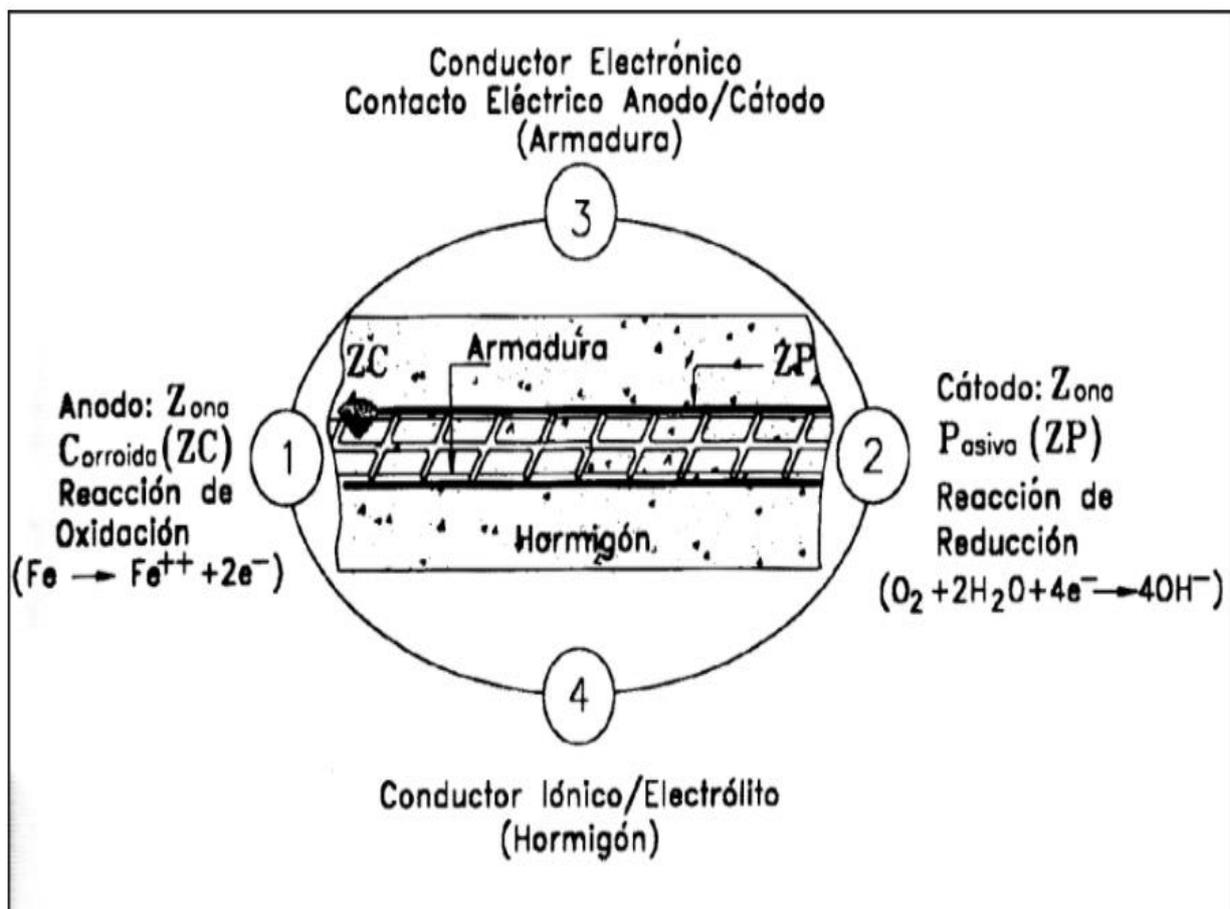


Ilustración 32. Elementos constituyentes de la celda de corrosión

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

3.2 LOSAS

Las losas son estructuras que reciben directamente las cargas, tanto permanentes como variables. Son las partes de una estructura que se diseñan no solo para resistir esfuerzos, sino también para cumplir con un destino funcional específico (Bernal, 2005).

3.2.1 LOSAS DE ENLACE EN PUENTES

El comportamiento de sistemas continuos de vigas de puentes, donde la continuidad se debe a la losa de enlace únicamente, se puede analizar utilizando métodos convencionales como, por ejemplo, el método de la viga conjugada, ecuación de tres momentos, líneas de influencia, entre otros. La losa de enlace no induce rotaciones iguales en cada lado del apoyo debido al alargamiento causado por la fuerza de tensión en la losa de enlace y, por tanto, no existe compatibilidad rotacional. La ilustración 33 muestra las deformaciones en las vigas de un puente con una cubierta sin juntas bajo condiciones generales de carga. Las deformaciones conducen a la elongación de la losa de unión y como resultado, se desarrolla una fuerza de tensión en la losa de unión, que genera un momento de continuidad en el apoyo interior (Amaya Pico, 2017).

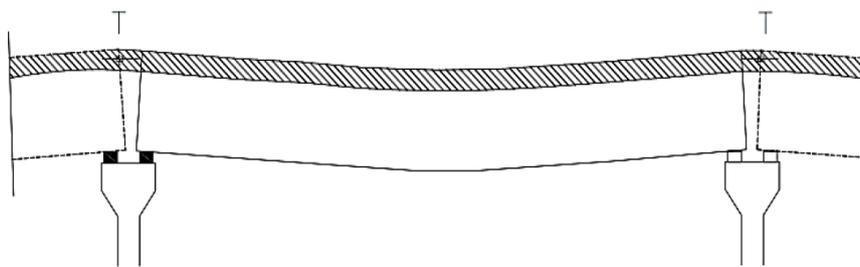


Ilustración 33. Continuidad causada por la losa de enlace del puente.

Fuente: (ElSafty & Okeil, 2005).

3.2.1.1 LONGITUD DE LOSA DE ENLACE EN PUENTES

Para determinar la longitud de las losas de enlace, inicialmente se determina la longitud de las extensiones de esta. La longitud total de la losa de enlace y la longitud de la zona de desbaste de la losa de enlace se calculan en las ecuaciones 1 y 2, respectivamente. La zona de desbaste es la sección central de la losa de enlace en la que no van conectores de corte en la viga y la losa. Eliminar la acción compuesta dentro de la losa de enlace permite que funcione como una articulación entre los dos tramos adyacentes, hasta el 5% de la longitud de la losa

adyacente puede ser desunida sin afectar la suposición de diseño de elementos simplemente apoyados (Caner & Zia, 1998).

$$Lls = 0.075 * (L1 + L2) + G1 - 2$$

Ecuación 1. Longitud losa de enlace

Fuente: (Amaya Pico, 2017)

Donde:

Lls = Longitud losa de enlace (mm)

L1 y L2 = Longitudes de los tramos adyacentes (mm)

G1-2 = Longitud entre vigas de los dos tramos adyacentes (mm)

$$Ldz = 0.05 * (L1 + L2) + G1 - 2$$

Ecuación 2. Longitud zona de desbaste

Fuente: (Amaya Pico, 2017)

Donde:

Ldz = Longitud zona de desbaste (mm)

L1 y L2 = Longitudes de los tramos adyacentes (mm)

G1-2 = Longitud entre vigas de los dos tramos adyacentes (mm)

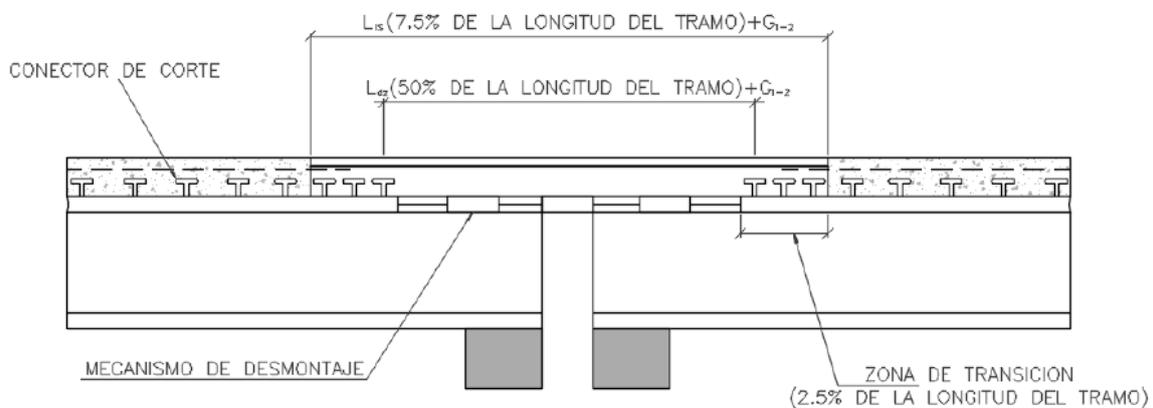


Ilustración 34. Longitud losa de enlace

Fuente: (Amaya Pico, 2017).

Amaya Pico (2017) afirma que fuera de la zona de desbaste en cada extremo de la losa de enlace están las zonas de transición en las que se restablecen la conexión de corte y la acción compuesta entre la viga y la losa. Debido a los altos esfuerzos de corte dentro de la región, el número de conectores de corte requerido por el código AASHTO de diseño se incrementa en un 50%.

3.2.1.2 ROTACIONES Y MOMENTO DE INERCIA NO FISURADO EN LA LOSA DE ENLACE

Después del cálculo de la longitud de la losa de enlace, se deben determinar los ángulos máximos de rotación final de los tramos de puente adyacentes debidos a la carga viva. La rotación es una función de la deflexión máxima permisible y la longitud de los tramos adyacentes como se muestra en la ecuación 3. El momento de inercia no fisurado se calcula por metro de ancho en la losa de enlace usando la expresión mostrada en la ecuación 4 (Amaya Pico, 2017).

$$\theta_{max} = \Delta_{max - corto} \left(\frac{3}{L_{corto}} \right)$$

Ecuación 3. Angulo de rotación

Fuente: (Amaya Pico, 2017)

Donde:

θ_{max} = Ángulo máximo de rotación final (rad)

$\Delta_{max - corto}$ = Deflexión máxima permisible de la menor de los tramos adyacentes (mm)

L_{corto} = Longitud del tramo corto de los tramos adyacentes (mm)

$$Lls = (1000\text{mm}) * \left(\frac{ts^3}{12} \right)$$

Ecuación 4. Momento de inercia no fisurado

Fuente: (Amaya Pico, 2017)

Donde:

Lls = Momento de inercia de la losa de enlace por metro de ancho (mm⁴)

Ts = Espesor de la losa del puente (mm)

3.2.1.3 MOMENTO DE FLEXIÓN EN LOSA DE ENLACE

Utilizando la rotación extrema máxima de los tramos y el momento de inercia de la losa de enlace, se calcula el momento de flexión "Mls" por metro de ancho inducido por las rotaciones impuestas en la losa de enlace en kN-m, utilizando la ecuación 5 (Amaya Pico, 2017).

$$Mls = (2 * E * Ils * 0.001 / Ldz)(\theta_{max})$$

Ecuación 5. Momento de flexión en losa de enlace

Fuente: (Amaya Pico, 2017)

Donde:

Mls = Momento de flexión inducido en la losa de enlace (mm)

E = Modulo de elasticidad del acero

Ils = Momento de inercia de la losa de enlace (mm)

θ_{max} = Ángulo máximo de rotación final (rad)

3.2.2 CLASIFICACIÓN

Las losas son clasificadas según sus características específicas.

- a) Compacidad
- b) Armaduras
- c) Apoyos
- d) Continuidad
- e) Forma

El comportamiento de las losas frente a las solicitaciones depende de la forma y dirección de sus armaduras.

3.2.3 FISURACIÓN

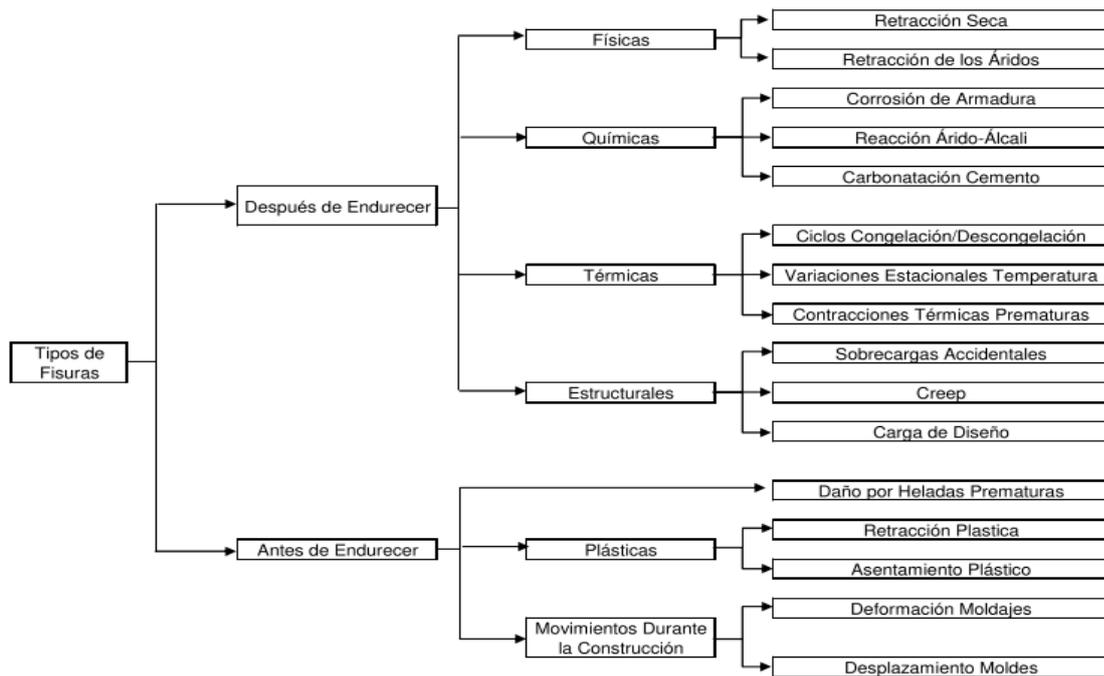
La fisuración puede producirse por distintas causas. Las principales que se consideran en las principales normas de diseño son dos.

- Originadas por deformaciones debidas a la aplicación de cargas exteriores.

- Producto del desarrollo de deformaciones impuestas en elementos cuyo acortamiento está restringido, produciéndose tensiones internas.

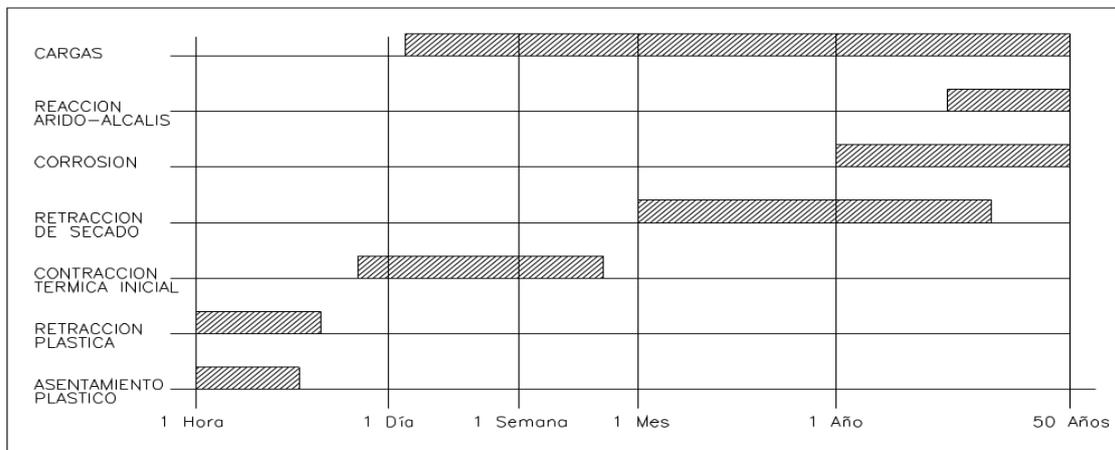
Dependiendo del momento en que se generan estas tensiones, antes o después de endurecido el hormigón, se pueden clasificar las fisuras que se originan en el elemento del hormigón. Las tablas 4 y 5 evidencian la clasificación de las fisuras en las losas, esto es importante para determinar la causa y corregir cualquier posible error estructural.

Tabla 4. Clasificación de fisuras en losas.



Fuente: (Salgado Zamorano, 2010).

Tabla 5. Fisuras a partir de colocación de hormigón



Fuente: (Salgado Zamorano, 2010).

Tradicionalmente, el tratamiento que se ha realizado de los fenómenos reológicos del hormigón ha consistido fundamentalmente en separar las deformaciones producidas por la fluencia de las producidas por la retracción. Este tratamiento es perfectamente válido siempre que se tenga en cuenta que ambas deformaciones diferidas no son independientes sino que es una manera de representar un único fenómeno, la deformación del hormigón en el tiempo. La idea de separar la fluencia de retracción surge del interés en separarlas deformaciones diferidas de procesos donde interviene el nivel de tensiones existente en un elemento de las que sufriría en cada de no estar sometida a tensión alguna (Salgado Zamorano, 2010).

(Salgado Zamorano, 2010) afirma que la deformación por retracción es la deformación que desarrolla en el tiempo un elemento de hormigón, con unas características dadas y en un medio dado cuando no se encuentra sometido a carga exterior. La retracción no incluye cambios en longitud producto de variaciones de temperatura, pero depende del ambiente y de la configuración y tamaño de la muestra. En general, la retracción es una deformación que reduce el volumen inicial del elemento debido a una serie de fenómenos físico-químicos que ocurren tanto a tempranas edades como a lo largo del tiempo.

La deformación por fluencia es la diferencia entre la deformación total que experimenta el elemento de hormigón en el tiempo cuando es sometido a la acción de alguna carga exterior y a la deformación de retracción (Salgado Zamorano, 2010).

La retracción plástica se produce antes de finalizar el fraguado del hormigón, dentro de su proceso de hidratación, cuando aún se encuentra en estado plástico. Los principales factores que influyen en ella son la dosificación y tipo de cemento, a mayor cantidad de cemento mayor será también la retracción plástica que experimentará el hormigón y la desecación superficial, así como el viento, el desecar la superficie del hormigón acelera este proceso (Salgado Zamorano, 2010).

Otros factores que se han asociado a la aparición de fisuras por retracción plástica, y que deben tener un cierto control, son los siguientes:

- Temperatura Hormigón y temperatura del aire.
- Humedad relativa del ambiente.
- Velocidad del viento.

Para determinar la tasa de evaporación que sufre el hormigón en función de los parámetros antes definidos, la ACI (American Concrete Institute) dispone el siguiente gráfico:

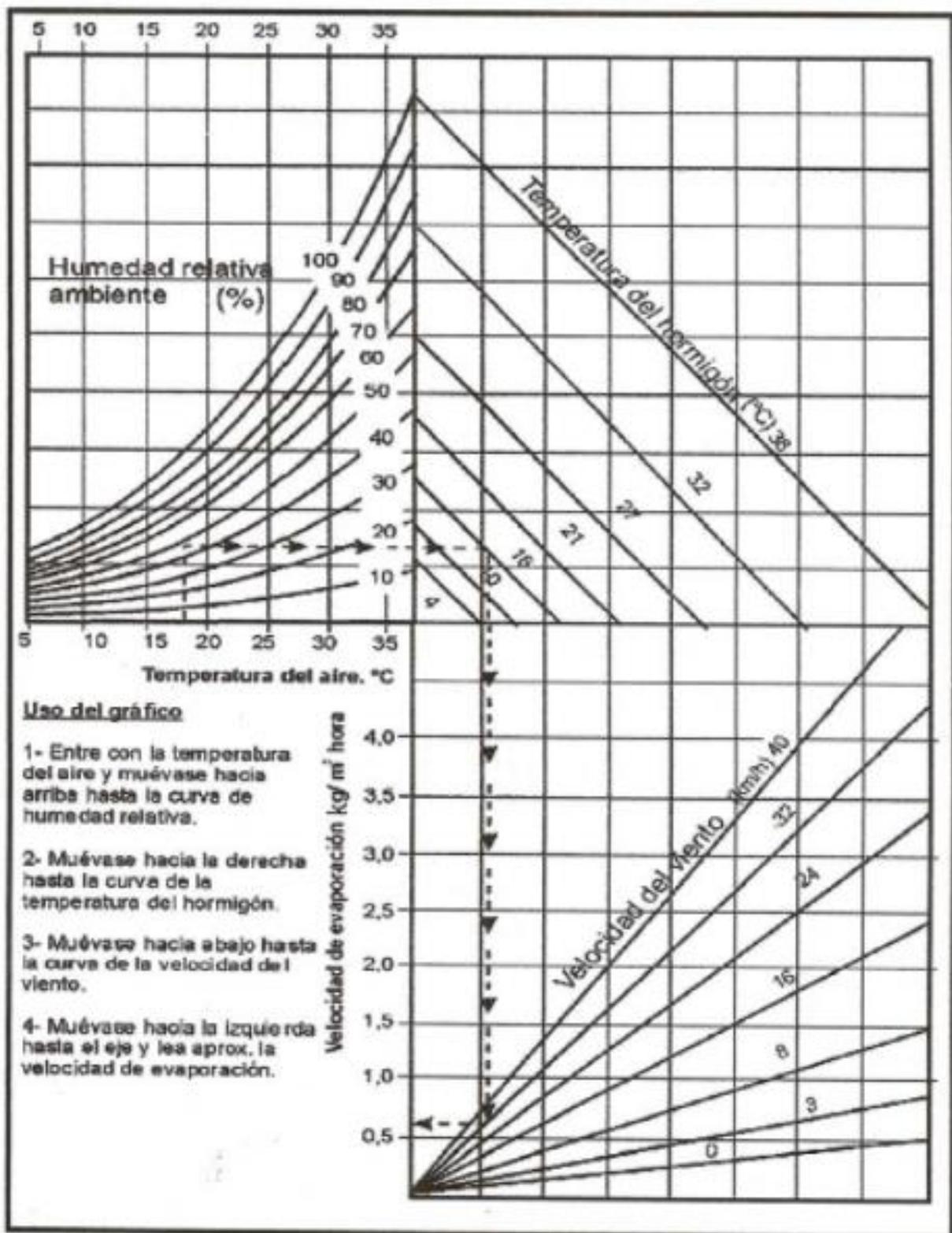


Gráfico 1. Efecto de incremento de la temperatura y del aire del hormigón

Fuente: (Salgado Zamorano, 2010).

3.3 CONTINUIDAD EN PUENTES

Los puentes tradicionales utilizan juntas de dilatación que permiten desplazamientos controlados para mitigar los efectos generados por el movimiento de la superestructura debido al cambio de volumen del concreto (Ilustración 35), pero como se definió anteriormente, la utilización de las juntas de expansión sobre los apoyos conllevan gastos de mantenimiento relevantes. En los últimos años se han adoptado medidas para eliminar las juntas de expansión y limitar su uso a las ubicaciones en las losas de proximidad solamente (Amaya Pico, 2017).

Los puentes que utilizan estas características se denominan puentes sin juntas o puentes integrales, la condición de continuidad en estas estructuras es evidente (Ilustraciones 36 y 37). En las especificaciones de diseño de puentes AASHTO LFRD no se presentan requisitos para la longitud máxima permitida del puente sin juntas de dilatación (Amaya Pico, 2017).

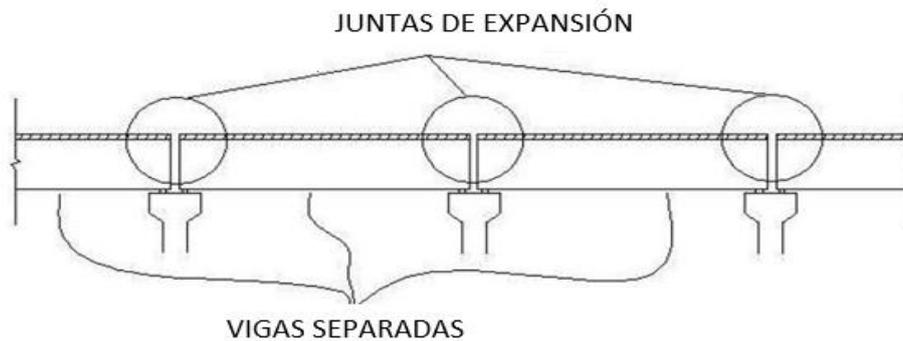


Ilustración 35. Puente con juntas de expansión (sin continuidad)

Fuente: (Mothe, 2006).



Ilustración 36. Puente con vigas integradas (continuidad completa)

Fuente: (Mothe, 2006).



Ilustración 37. Puente con vigas separadas (continuidad parcial)

Fuente: (Mothe, 2006).

3.3.1 CONTINUIDAD COMPLETA

Amaya Pico (2017) afirma que los puentes de múltiples vanos con continuidad mecánica entre tramos adyacentes se realizan mediante la conexión de las vigas del puente con un detallado de hormigón armado en las zonas de apoyos intermedios.

La construcción se realiza en dos etapas:

- En la primera etapa, las vigas son simplemente apoyadas y resisten su propio peso más la carga de encofrado y el hormigón húmedo de la fundida de la losa.
- En la segunda etapa, después del endurecimiento del hormigón in situ, la estructura se hace continua, pero solo para la carga de servicio.

En un sistema común de continuidad de la superestructura las vigas de cada vano se apoyan simplemente sobre neoprenos. El hormigón de la viga diafragma se puede colocar a una altura parcial y el refuerzo longitudinal colocado en la losa sobre los apoyos. El sistema está diseñado para resistir todas las sollicitaciones como una superestructura compuesta de tramo continuo (Kowalsky & Wing, 2005).

Cuando se alcanza la integración de los elementos, se desarrollarán grandes esfuerzos tensionantes en la sección superior de la estructura debido al momento negativo generado por la continuidad como se evidencia en la ilustración 38. Además de estos esfuerzos también se pueden generar ciertos momentos positivos debido a los efectos del largo plazo y las cargas por temperatura (Canales, 2019).

El comportamiento de este sistema se complica por los efectos de interacción de la fluencia y la contracción del hormigón, el gradiente térmico, la redistribución de momentos debido al agrietamiento y la interacción suelo-estructura. Las especificaciones AASHTO LFRD permiten a los diseñadores utilizar uno de los cuatro (4) métodos posibles. Sin embargo, debido a la complejidad para aplicar el método teórico, a menudo se emplea el método empírico más simple y más conservador, pero implica los siguientes dos requisitos.

- Las vigas deben tener 90 días de edad antes de vaciar el concreto in situ para conectarlas al diafragma.
- El refuerzo para el momento positivo debe proporcionar una resistencia a flexión del 1.2 veces el momento de sollicitación (Amaya Pico, 2017).

En estudios realizados mediante generación de modelos 3D, investigaciones y análisis por el Dr. Canales (2019) fue observado que las fuerzas tensionantes en las juntas solo son transferidas a través del refuerzo positivo ingresado. Pruebas de campo fueron realizadas en los puentes con vigas continuas las cuales fueron consistentes con los resultados del modelo 3D.

Las pruebas realizadas demostraron que las cargas vivas, en general, resultan contribuciones despreciables al momento positivo en las juntas, pero que este detalle podría proporcionar una continuidad suficiente como para ser considerado para una reducción del momento positivo debido a la carga viva en el centro del tramo (Canales, 2019).

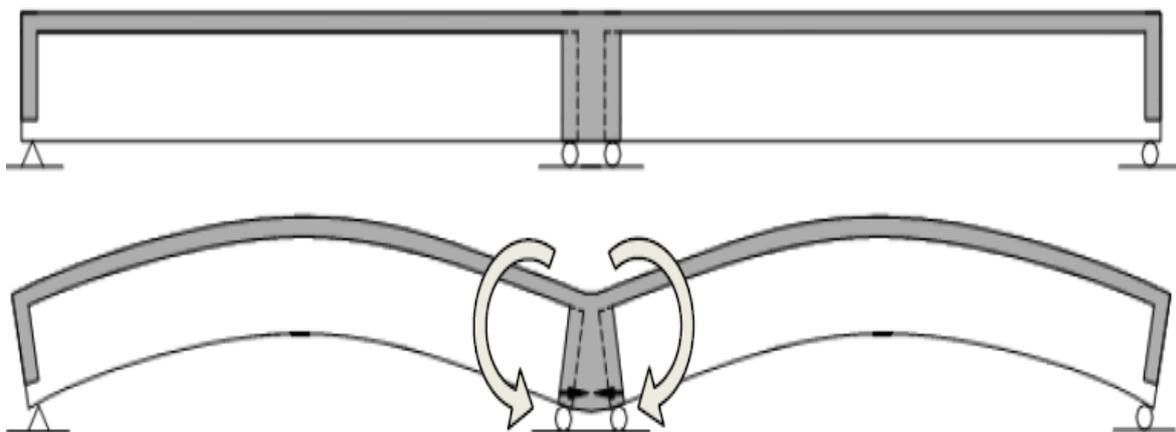


Ilustración 38. Momento positivo en diafragma

Fuente: (Hossain, 2012).

Debido a este análisis se puede observar que el desempeño de la estructura puede mejorar drásticamente, especialmente considerando que la reducción en el momento positivo debido a las cargas vivas en el centro del claro permitirá que se empleen tramos más largos. Lo cual permite mejores distribuciones de esfuerzos y más capacidad de carga (Canales, 2019). Tomando en cuenta los atributos mencionados anteriormente que actuarán adicionalmente a la eliminación de los problemas asociados que conllevan las juntas de expansión se puede inferir que la continuidad completa brinda mejoras significativas al desempeño de la cubierta en términos reducción de costos, durabilidad y capacidad de carga. Por lo que resulta ser una alternativa estructuralmente viable; sus principales limitantes son su alto costo de construcción en relación a las demás alternativas y su aplicabilidad en los diseños constructivos. En la ilustración 39 se brinda un ejemplo de continuidad completa donde todos los componentes estructurales han sido unificados para tener un sistema integral.



Ilustración 39. Ejemplo Continuidad Completa

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

3.3.2 CONTINUIDAD PARCIAL

El sistema de losas de enlace permite que las juntas de expansión, típicamente encontradas en los apoyos de la superestructura, sean eliminadas. El sistema involucra la unión del tramo original apoyado a una losa de concreto que viene siendo una continuación de la cubierta y tramos antecedentes. Para proveer la flexibilidad necesaria para que las losas de enlace se acomoden en las secciones finales de la viga del tramo, la losa de enlace se une a esta por una longitud determinada con variadas metodologías (AU & Lam, 2011).

Se han realizado investigaciones exhaustivas por Caner & Zia (1998) donde sus estudios demuestran que las losas de enlace deben de ser diseñadas siguiendo los siguientes procedimientos.

- Diseñar cada tramo como un tramo simplemente apoyado. Ignorando cualquier posible contribución de las losas de enlace.
- Asegurarse que la losa de la cubierta no esté unida a las bridas superiores de las vigas en una longitud equivalente al 5% de la longitud del tramo en cada una de las vigas adyacentes.
- Determinar las rotaciones finales de las vigas bajo cargas de servicio.
- Determinar el momento actuante en la losa de enlace debido a las rotaciones con la ecuación (1).

$$M = \frac{2(E)(I)}{lD} \phi$$

Ecuación 6. Momento actuante debido a rotaciones

Fuente: (Caner & Zia, 1998).

Donde:

E = Modulo de elasticidad de concreto (kN/m²)

I = Inercia (m⁴)

Ld = Longitud de anclaje (m)

ϕ = rotación final (rad)

Sin embargo, estudios realizados por (AU & Lam, 2011) demuestran que la anterior ecuación podría brindar deformación no realística en un modelo en tercera dimensión, por lo que se añadió un factor de revisión.

$$M = \frac{2(E)(I)}{lD} \phi (\alpha R)$$

Ecuación 7. Momento actuante debido a rotaciones (Revisada)

Fuente: (AU & Lam, 2011).

Donde:

αR = Factor de ajuste para forzar la compatibilidad de desplazamiento entre la losa de enlace y la viga. Esto resulta de:

$$(\alpha R) = \frac{(4)}{(1 + \frac{3e}{Ld})}$$

Ecuación 8. Factor de ajuste

Donde:

e = Distancia entre apoyos simples adyacentes en la locación de soporte.

(Amaya Pico, 2017) menciona que la continuidad parcial es un método que proporciona continuidad únicamente a la cubierta, en el cual las vigas se diseñan como simplemente apoyadas. Esto significa que no puede ocurrir ninguna redistribución de los efectos de carga vertical entre tramos adyacentes. Esto se aplica a todas las cargas verticales, incluyendo el peso propio y la carga variable.

Dado el particular enfoque hacia la cubierta, la losa es continua a través de la unión de la zona entre apoyos, la losa se desprende de las vigas, cierta longitud a ambos lados de la junta. Este detalle reduce el agrietamiento en la losa continua de la cubierta distribuyendo las deformaciones que experimenta sobre una mayor distancia (Matteo, 2015).

Este método tiene alguna ventaja sobre los detalles que proporcionan la continuidad completa, como el fácil proceso de construcción y un pequeño manejo del hormigón in situ.

Debido a que la continuidad se limita únicamente al tablero existen 2 soluciones constructivas convencionales.

- 1) El tablero se separa de las vigas que soportan aproximadamente una longitud de 1.5m con una capa de material deformable, que puede ser poliestrieno expandido (a).

Una alternativa a esta solución es reforzar la parte superior de la viga, y en una segunda etapa vertir el concreto, reemplazando las vigas diafragmas típicas de los puentes (b).

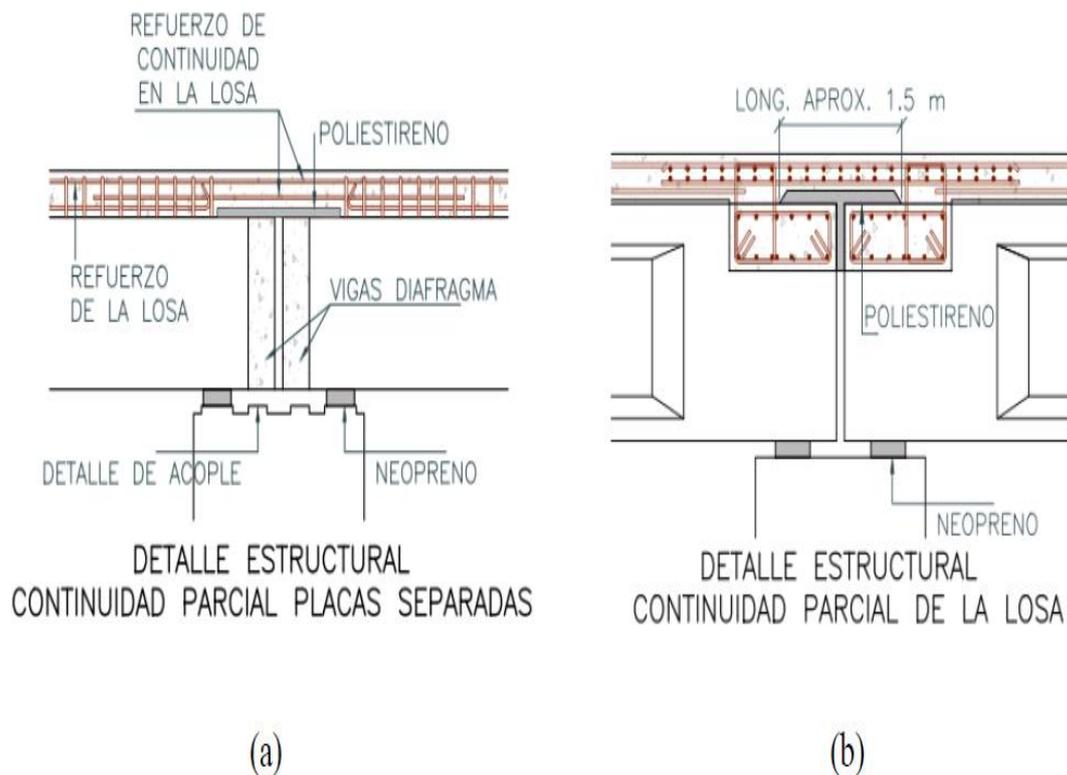


Ilustración 40. Continuidad parcial (Alternativa 1)

Fuente: (Amaya Pico, 2017).

Características propias de la alternativa:

- Se proporcionan neoprenos y diafragmas separados para cada tramo.
 - Permite rotación debido a la separación entre la losa y las vigas en las zonas de apoyo.
 - No presenta continuidad de momento entre vanos adyacentes por no haber refuerzo de continuidad en las vigas adyacentes (Amaya Pico, 2017).
- 2) La superestructura está diseñada y construida de manera convencional para puentes de múltiples vanos simplemente apoyados, con diafragmas transversales en los extremos de la viga. Los extremos de la viga se apoyan sobre neoprenos. Las barras de refuerzo longitudinal se incorporan en la losa a profundidad media para amarrar las losas con la viga diafragma, eliminando el movimiento de expansión a nivel de cubierta

simulando una junta rotacional de cubierta. Para permitir esta rotación, las barras se desarrollan a ambos lados de la articulación.

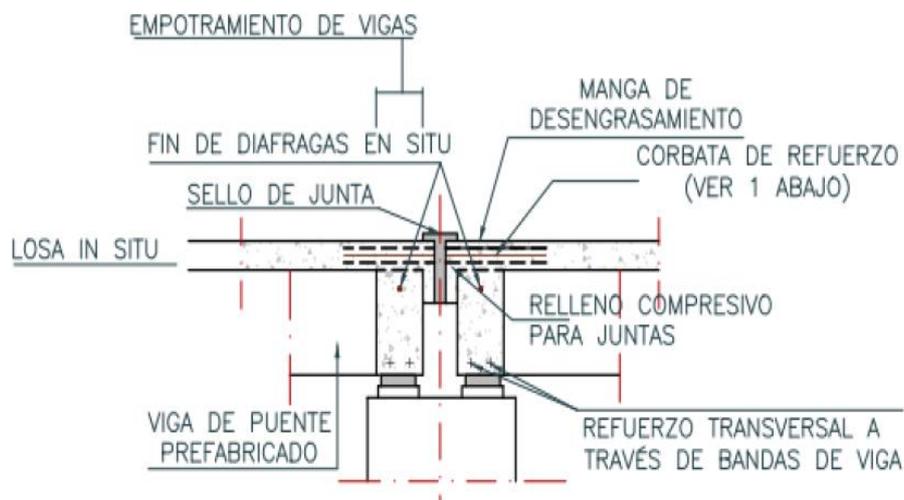


Ilustración 41. Continuidad parcial (Alternativa 2)

Fuente: (Amaya Pico, 2017).

Características propias de la alternativa:

- El refuerzo a profundidad media de la losa desarrolla cierta longitud a cada lado de la junta para permitir la rotación del tablero.
- No hay momento de continuidad entre los vanos adyacentes.
- Las losas entre vanos se separan utilizando relleno resistente a esfuerzos de compresión en la junta, pero la impermeabilización de la superficie de la losa es continua y se proporcionan sellos especiales sobre la junta para una doble protección.
- Se proporcionan neoprenos separados y diafragmas al final de cada tramo (Amaya Pico, 2017).

Las ventajas que brindan las losas de enlace son numerosas; estas incluyen reducción de costos asociados con la construcción y mantenimiento de juntas; eliminación de daño estructural causado por mantenimiento incorrecto, daños de corrosión causado a elementos estructurales debido a fugas de agua a través de la cubierta y reducción en las vibraciones y ruido producido por los vehículos al pasar sobre las juntas, por ende mejorando la experiencia del conductor. Debido a la continuidad de los tramos el momento generado en las vigas es reducido lo que incrementa la capacidad de carga (Mothe, 2006).

Las desventajas involucradas con la inclusión de este sistema se deben a la continuidad alcanzada. Esta genera esfuerzos secundarios (temperatura, encogimiento, arrastre, etc...) que son propensos a causar daños estructurales si no son contemplados. Los altos esfuerzos producidos por las cargas cíclicas llevan a las fisuras y fracturas si el puente no es diseñado correctamente. Correcto diseño y construcción son queridos si se pretende remover las juntas de expansión existentes para utilizar un sistema continuo, de lo contrario debido a las post tensión la estructura puede colapsar (Ghimire, 2014).

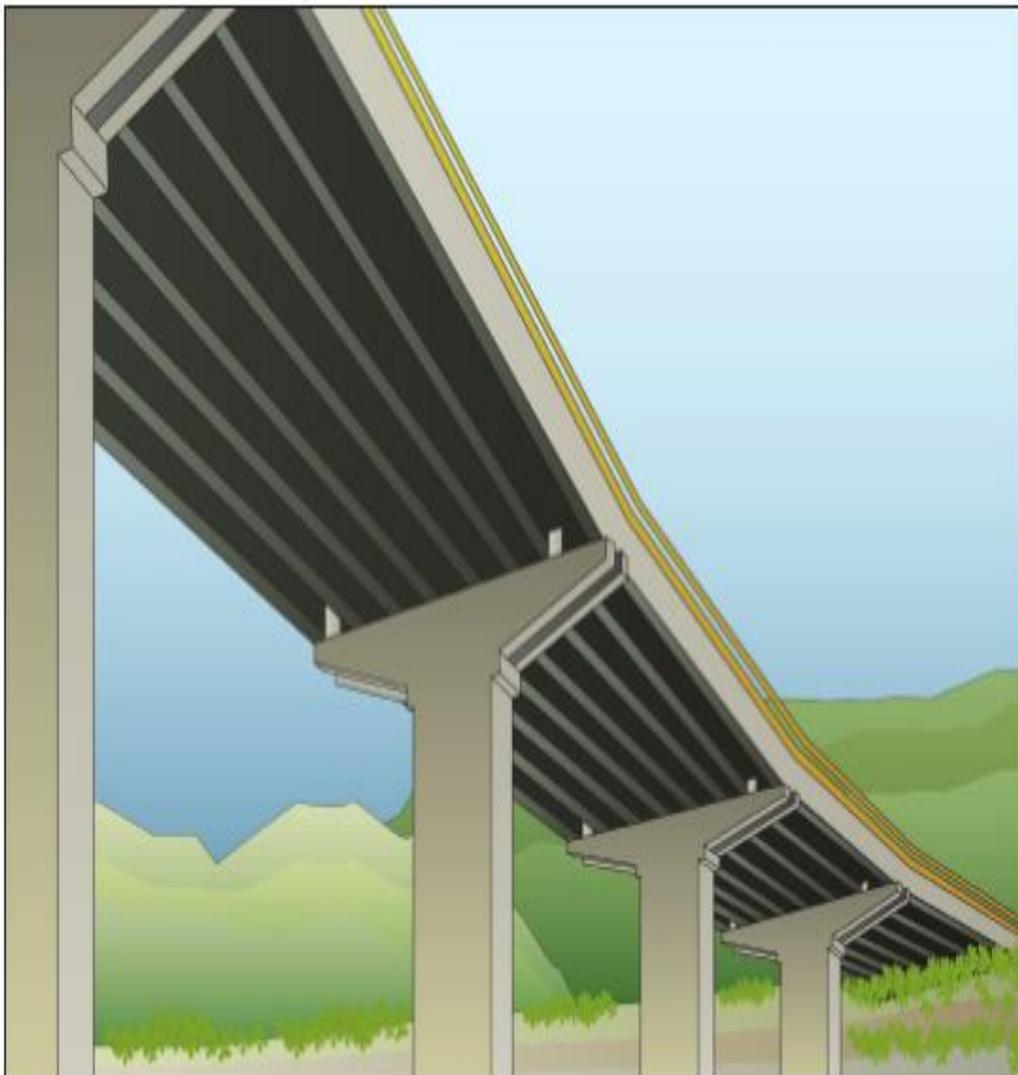


Ilustración 42. Continuidad Parcial en puente (Tramos independientes)

Fuente: (Muñoz Díaz, 2011).

IV. METODOLOGÍA

4.1 ENFOQUE

La presente investigación corresponde a un método de indagación cuantitativo debido a los procesos secuenciales y experimentales a lo largo de su desarrollo. La investigación es una extensión de una tesis desarrollada en LSU (Luisiana). La naturaleza del tema involucra la medición de variables en un determinado contexto, el cual es el desempeño de las losas de enlace en un puente sometido a distintas variables. Partiendo del problema, el cual en este caso fue demostrar la viabilidad de la continuidad en los puentes, se construyó un marco teórico del cual fue posible interpretar la información y extraer hipótesis para luego confirmarlas o desaprobarlas mediante los estudios cuantitativos realizados.

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Una variable de investigación es una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es posible ser medida u observada. Este concepto es aplicable a personas, objetos, hechos y fenómenos (Sampieri, 2014).

Las variables pueden ser dependientes o independientes. Las dependientes son aquellas que su valor, función o cualquier otro factor relevante no depende de ninguna otra variable, las independientes son aquellas que dependen de otras variables.

Tomando en cuenta que la presente investigación es una extensión de un estudio paramétrico ya realizado, se consideraron las siguientes variables y se realizarán ciertas adiciones en términos de valores.

4.2.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

- **Número de tramos:** Para explorar los efectos de continuidad en las distintas condiciones de apoyos se consideraron 8 tramos a la investigación, adicionales al estudio paramétrico original. (Ver tabla 6)
- **Longitud total del segmento:** Adicional al estudio paramétrico original, se consideraron 3 longitudes del tramo total las cuales son de 450 ft, 600 ft y 740 ft, las cuales tienen una directa relación con la cantidad de tramos posibles según la longitud total. (Ver tabla 6)

Tabla 6. Tramos y longitudes por segmento

Longitud total del segmento (ft)	Número de tramos por segmento							
	3	4	5	6	7	8	9	10
450	150	112.5	90	75	64.29	56.25		
600		150	120	100	85.71	75	66.67	
740			148	123.33	105.71	92.5	82.22	74

Fuente: (Propia).

- **Espaciado de vigas:** Según la AASHTO la longitud libre del tramo generalmente se mide como una distancia entre la línea central de los rodamientos y se utilizó de manera efectiva en el diseño. Por lo que se investigó la influencia que el espaciado de las vigas a 6ft, 7ft y 8ft tienen en los modelos generados.
- **Condición de continuidad:** Existen 2 condiciones de continuidad en los puentes, la continuidad completa o la continuidad parcial. Esta variable tiene una relación directa con la estructuración del puente ya que esta condición determina la utilización de las losas de enlace en el sistema por lo que la condición que se utilizó fue la continuidad parcial.
- **Apoyos:** Se tomaron en consideración diferentes tipos de apoyos para fines investigativos. 6 condiciones, incluyendo: No continuidad con apoyos idealizados, continuidad completa con apoyos idealizados, continuidad parcial con apoyos HRRH, continuidad parcial con apoyos RHHR, continuidad parcial con apoyos elastoméricos (cojinetes) y continuidad parcial con cojinetes de apoyo en condición flotante.
- **Temperatura:** Se investigó la reacción que los modelos generados tuvieron sometidos a tres diferentes temperaturas en grados Fahrenheit: 0, 36 y 73.

4.2.2 VARIABLES DEPENDIENTES

- **Angulo de rotación y desplazamiento en los extremos de viga:** Estos fenómenos son el resultado de deformaciones debido a cambios de volumen en el hormigón causados por la temperatura.
- **Fuerzas y esfuerzos generados en la losa de enlace:** Las generaciones de esfuerzos y fuerzas en las losas de enlace son resultados de contribuciones del concreto en

contacto, así como los esfuerzos tensionantes y compresivos además de las cargas vivas involucradas.

- **Grietas en la losas de enlace:** Las grietas en el concreto son consecuencia de variaciones externas de temperatura, refuerzos, contracciones, vibraciones, forma estructural, entre otras.
- **Reacciones en los apoyos:** Los apoyos reaccionan según las distintas condiciones variables a las cuales estos están sometidos.

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

4.3.1 TÉCNICAS APLICADAS

4.3.1.1 INVESTIGACIÓN DE ESTUDIO PARAMÉTRICO ORIGINAL

Dado que la presente investigación es una extensión de un estudio paramétrico realizado previamente fue necesario retroalimentarse de toda la información teórica y técnica posible sobre el tema. El estudio de la disertación original fue en definitiva una técnica de alta utilidad ya que tomando en cuenta los procesos y variables originales se obtuvo una referencia de los resultados y metodología a seguir para la elaboración de la presente extensión del estudio de continuidad en puentes.

4.3.1.2 DISEÑO DE HOJAS DE CÁLCULO

Para el estudio de continuidad en los puentes fue necesario llevar a cabo una serie de análisis de resultados en los modelos generados. Cada modelo con sus distintas variables particulares (temperaturas, espaciado de vigas, longitud total del segmento y cantidad de tramos involucrados). Sin embargo, para la generación de cada modelo fue necesario obtener una serie de datos relevantes en su diseño como el tipo de vigas a considerar y el diseño de los apoyos involucrados, tomando en consideración la naturaleza variante de cada modelo se realizaron hojas de cálculos con el fin de poder ingresar los datos obtenidos al programa de manera ordenada y secuencial al software.

4.3.1.3 *GENERACIÓN DE MODELOS*

Los estudios paramétricos están basados en la ley de distribución de las variables que se están estudiando. Para medir la influencia que cada variable tiene en el tema se optó por realizar modelos en un software estructural en donde se ingresaron los datos de diseño y variables pertinentes. La investigación se basó enteramente en los resultados obtenidos por la influencia de cada variable en los modelos.

4.3.1.4 *ASESORAMIENTO PROFESIONAL DE PRIMERA MANO*

A medida el proyecto se fue desarrollando, fueron surgiendo interrogantes en cuanto a ciertos temas tanto técnicos como teóricos. Estas interrogantes fueron aclaradas por el asesor temático, el ingeniero Maro Tulio Canales; especialista en proyectos estructurales, autor de la disertación original de la cual la presente extensión está basada.

4.3.2 INSTRUMENTOS APLICADOS

4.3.2.1 *AASHTO LFRD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 2012*

AASHTO LFRD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS es el primer manual de construcción reconocido a nivel nacional en los Estados Unidos, esta edición de la AASHTO se enfatiza en primeramente en los puentes y su enfoque es brindar las normas y técnicas constructivas para así brindar estandarización a las obras estructurales del país. Este instrumento fue utilizado para el mismo fin, chequear que todos los diseños de los modelos cumplieren con sus normativas y especificaciones para de esta manera obtener resultados apegados a la realidad.

4.3.2.2 *PERFORMANCE STUDY OF LINK SLAB CONTINUITY IN PRESTRESSED CONCRETE BRIDGES*

La disertación original del estudio de losas de enlace en puentes presforzados fue realizada por el Doctor Marco Tulio Canales, asesor temático de la presente extensión. Este instrumento fue utilizado para comprender el alcance de la investigación actual y obtener las referencias necesarias para su realización.

4.3.2.3 *STATE OF LOUISIANA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT BRIDGE DESIGN MANUAL*

Este manual se basa en las especificaciones y normas técnicas de la AASHTO, este se utiliza como referencia para la información necesaria no brindada por el manual de AASHTO de la LFRD ya que cada región cuenta con sus particularidades. Debido a la localización de la investigación se utilizó este instrumento con el fin de cumplir con todas las especificaciones de diseño de Louisiana.

4.3.2.4 *MICROSOFT EXCEL*

El software de hojas de cálculo Excel fue necesario para el proceso de diseño de vigas, apoyos y esquematizar de manera ordenada y secuencial los datos respectivos de cada modelo a generar con sus particulares variables.

4.3.2.5 *STAAD*

Es un software de análisis estructural y de diseño, este instrumento fue de suma utilidad para realizar el estudio paramétrico debido a su capacidad de analizar los modelos creados con los distintos criterios y variables necesarios para llevar a cabo la investigación. Se diseñaron 162 modelos cada uno con las distintas condiciones mencionadas en los anteriores apartados; se ingresaron los datos obtenidos de las hojas de cálculo para cada particular modelo y luego su viabilidad fue analizada con los resultados brindados por STAAD.

4.4 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para que la ejecución del estudio paramétrico fue necesario, en primera instancia, la determinación de las variables a analizar. Una vez identificadas las variables con las cuales se realizaría la extensión se elaboró una hoja de cálculo en donde se hacía uso de estas. Las principales variables a utilizar con respecto a la disertación original fueron los números de tramos, la longitud total de los segmentos, el espaciado de las vigas, los tipos de apoyos y las temperaturas.

El tipo de vigas a utilizar fue determinado mediante el manual de construcción de puentes del estado de Louisiana (Ver apartado 4.3.2.3). Este manual proporcionó una tabla mediante la cual se seleccionaba la viga ideal a utilizar basándose en la distancia total del tramo. Dada la

naturaleza variable de estas longitudes se utilizaron las vigas AASHTO pertinentes según dichas longitudes. Una vez obteniendo la viga a utilizar se ingresó en la hoja de cálculo para tener de manera esquematizada la viga a emplear con su respectivo tramo.

Seguidamente, se procedió a calcular los apoyos de la viga los cuales se calcularon mediante fórmulas determinadas en la disertación original; las cuales constaban de largo, ancho y grosor, tanto como para los extremos derechos como para los extremos izquierdos de la viga, en donde se obtuvieron los apoyos elastómeros idealizados para las vigas. Cada dimensión de los apoyos, al igual que las vigas fue ingresado en la hoja de cálculo con el mismo fin. Esquematizar y tener toda la información en el orden secuencial y respectivo de cada tramo.

De la misma manera, se ingresaron todas las variables independientes necesarias para cada longitud de tramo, las cuales fueron la temperatura en grados Fahrenheit (0,36 y 73 grados), los distintos espaciados de vigas (5.91, 7 y 8 ft) y el número de tramos en cada segmento que fue directamente relacionado con las longitudes totales de los segmentos (450, 600 y 740 ft).

Una vez ingresadas todas las variables con su respectiva viga y apoyos, se obtuvo una esquematización final de todos los datos necesarios para ingresar al software de análisis STAAD. Finalmente, con todos los datos esquematizados de manera ordenada y secuencial se fueron construyendo y desarrollando los 162 modelos en el software de diseño y análisis.

Para finalización de la investigación con toda la información indagada en fuentes confiables, el análisis y los resultados obtenidos se realizaron las conclusiones basadas en los objetivos y en las preguntas de investigación.

4.5 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

Para la validación de los resultados obtenidos se fue realizando una comparación a un puente real localizado en la ciudad de Louisiana a lo largo del desarrollo del estudio. La comparación consistió en analizar los resultados obtenidos mediante el software con un monitoreo a largo plazo en cual fueron instalados sensores. De esta manera se verificó si los valores eran apegados a la realidad o no, en caso de no serlo se fue modificando el diseño y/o variables hasta el punto de lograrlo. Cabe mencionar que la presente investigación no necesito de esta metodología debido a que la disertación original se encargó de realizarla y la extensión se trabajó con esta referencia.

4.6 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

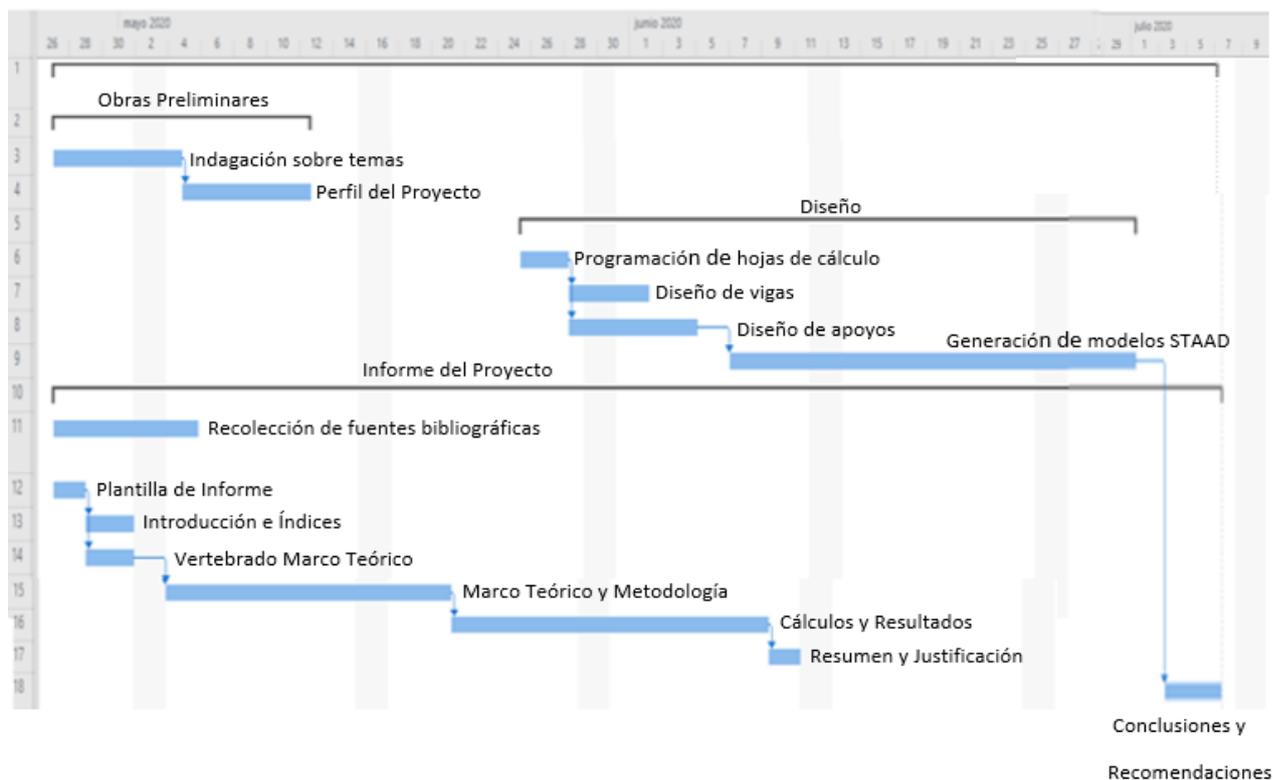
Tabla 7. Cronograma

# Actividad	Nombre de Tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1	Proyecto de Investigación	50 días	lun/27/4/20	vie/3/7/20	
2	Obras preliminares	12 días	lun/27/4/20	mar/12/5/20	
3	Indagación sobre tema a investigar	6 días	lun/27/4/20	lun/4/5/20	
4	Entrega de perfil del proyecto	6 días	mar/5/5/20	mar/12/5/20	3
5	Diseño	29 días	mar/26/5/20	vie/3/7/20	
6	Programación de hojas de cálculo	3 días	mar/26/5/20	jue/28/5/20	
7	Diseño de vigas	3 días	vie/29/5/20	mar/2/6/20	6
8	Diseño de apoyos	6 días	vie/29/5/20	vie/5/6/20	6
9	Generación de modelos STAAD	20 días	lun/8/6/20	vie/3/7/20	8
10	Informe del proyecto	39 días	lun/27/4/20	jue/18/6/20	
11	Recolección de fuentes bibliográficas	7 días	lun/27/4/20	mar/5/5/20	
12	Plantilla del informe	2 días	lun/27/4/20	mar/28/4/20	
13	Introducción e índices	3 días	mié/29/4/20	vie/1/5/20	12
14	Vertebrado de Marco Teórico	3 días	mié/29/4/20	vie/1/5/20	12
15	Marco Teórico y Metodología	14 días	lun/4/5/20	jue/21/5/20	14
16	Cálculos y Resultados	14 días	vie/22/5/20	mié/10/6/20	15
17	Resumen y Justificación	2 días	jue/11/6/20	vie/12/6/20	16
18	Conclusiones y Recomendaciones	4 días	lun/15/6/20	jue/9/7/20	9

Fuente: (Propia).

4.7 DIAGRAMA DE GANTT

Tabla 8. Diagrama de GANTT



V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente capítulo expone los resultados de los cálculos que se llevaron a cabo para ejecutar el diseño de los modelos estructurales de continuidad de puentes con las variantes respectivas de cada caso. De la misma manera, se explica los criterios y análisis realizados a cada modelo en cuanto a viabilidad. La realización de los modelos consta de cuatro actividades esenciales que le componen según muestra el cronograma (ver Tabla 7), las cuales son: la programación de la hoja de cálculo, el diseño de las vigas, el diseño de los apoyos y la generación de los modelos estructurales. Posteriormente se procedió a ejecutar un análisis de resultados y se explicaron los criterios involucrados.

A lo largo del capítulo se definirán los criterios empleados para el diseño de cada modelo con los datos mencionados en el apartado de (4.2 Variables de investigación).

5.1 DISEÑO DE MODELOS STAAD

Para dar inicio al proceso de generación de modelos de puentes mediante el software STAAD fue necesario realizar diseños, los cuales involucraban las vigas y los apoyos. Todos los parámetros y datos concernientes fueron ingresados a una hoja de cálculo, esto con el fin de realizar los cálculos necesarios para cada componente estructural de manera automática y también esquematizar la información según las variantes de la extensión.

Como se demostró en la Tabla 6 existen 18 distintas tipologías para los modelos tomando en consideración las distintas longitudes de cada tramo según la longitud total del segmento. Cada longitud de segmento cuenta con 6 distintas variaciones debido a temperatura, espaciamiento de vigas y longitud total requerida; para cada distinta variación se generó un modelo, sin embargo cada modelo contaba con su propio diseño tanto de vigas como de apoyos. Por lo que se realizó una hoja de cálculo conteniendo todos los datos finales de cada variación/modelo para luego ingresar dichos datos al software y luego generar el modelo final.

Debido a las 18 distintas tipologías y 6 variaciones por cada una se obtuvo un total de 162 modelos estructurales. A continuación se muestra una tabla perteneciente a la longitud total requerida de 450ft con longitud de 90ft por tramo, con la finalidad de exponer el procedimiento de cálculos y esquematización que se llevaron a cabo para la obtención de datos de cada modelo generado.

Tabla 9. Esquematización de datos para cada modelo

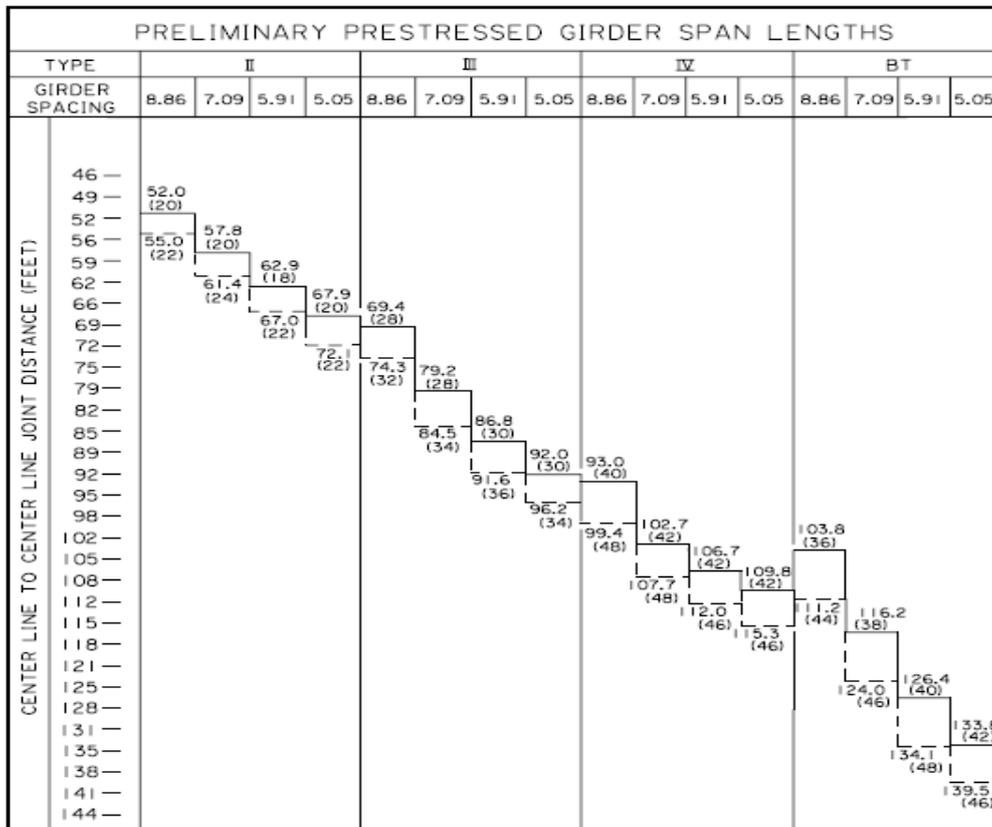
Variante	Tramos (ft)										Espaciado vigas (ft)	Temperatura (F)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
19	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	5.91	0
20	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	5.91	36
21	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	5.91	73
22	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	7.09	0
23	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	7.09	36
24	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	7.09	73
25	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	8.86	0
26	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	8.86	36
27	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	8.86	73

Fuente: (Propia).

5.1.1 DISEÑO DE VIGAS Y LOSA

Se determinó un tipo de viga AASHTO para cada variante debido a que la funcionalidad óptima de cada tipo de viga está directamente relacionada con la luz y consecuentemente la su longitud.

Tabla 10. Longitud del tramo de viga



Fuente: (DOTD, 2005).

Para la determinación de la viga a utilizar se utilizó la (Tabla 11) basada en las especificaciones de AASHTO LFRD la cual fue obtenida del manual de construcción de puentes del estado de Louisiana.

Las propiedades de cada viga utilizada para los diseños pertenecen al manual de AASHTO LFRD y se muestran a continuación:

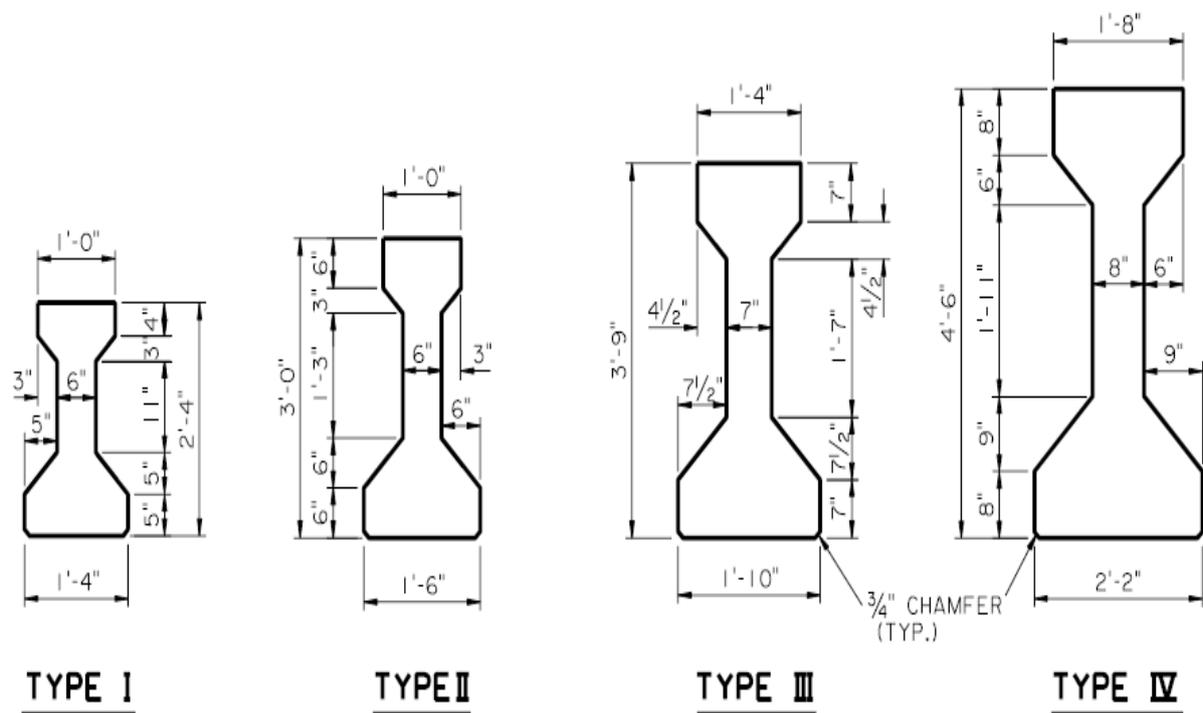


Ilustración 43. Dimensiones Transversales de vigas AASHTO (SI)

Fuente: (DOTD, 2005).

Tabla 11. Propiedades de Vigas AASHTO

BEAM TYPE	AREA (in. ²)	"x" * (in.)	\bar{Y} (in.)	MOMENT OF INERTIA (in. ⁴)	WEIGHT (lbs./ft.)	BOTTOM SECT. MOD. (in. ³)	TOP SECT. MOD. (in. ³)
I	276	12.5	12.59	22,750	288	1,805	1,307
II	369	16.5	15.83	50,980	384	3,220	2,527
III	559	21.0	20.27	125,390	583	6,186	5,070
IV	789	25.5	24.73	260,730	822	10,543	8,908

Fuente: (DOTD, 2005).

En los casos más extremos fue necesario utilizar la viga tipo 5, la cual en los manuales se refiere como BT. Esta fue utilizada exclusivamente cuando las luces de los claros fueron excepcionalmente grandes, lo cual fue relativamente frecuente dada la naturaleza de los requerimientos de la presente extensión.

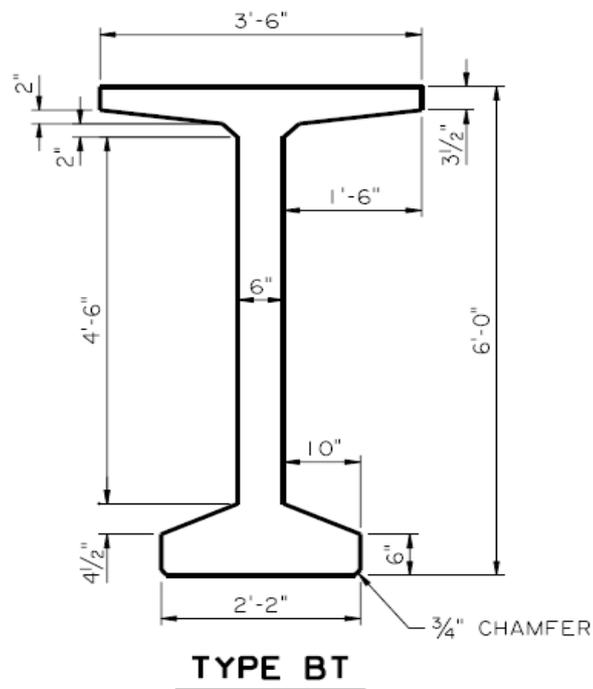


Ilustración 44. Dimensiones Transversales de viga AASHTO tipo 5 (SI)

Fuente: (DOTD, 2005).

Tabla 12. Propiedades de viga AASHTO tipo 5

BEAM PROPERTIES							
		2" DIA. OPEN HOLE AT END AND INTERMEDIATE DIAPHRAGMS					
BEAM TYPE	AREA (in. ²)	"x" * (in.)	\bar{Y} (in.)	MOMENT OF INERTIA (in. ⁴)	WEIGHT (lbs./ft.)	BOTTOM SECT. MOD. (in. ³)	TOP SECT. MOD. (in. ³)
IV-MOD	909	31.5	28.99	369,320	947	12,740	11,910
BT	766	34.5	36.63	545,113	798	14,881	15,412

Fuente: (DOTD, 2005).

Una vez determinada la viga a utilizar, cerciorándose que esta cumpliera con las longitudes estipuladas en la tabla de longitudes de tramos se procedió a ingresar los datos necesarios de la respectiva viga a la hoja de cálculo.

A lo largo de todo el presente capítulo se desarrollará el mismo ejemplo de longitud total requerida de 450ft con longitud de 90ft por tramo, con el propósito de conservar la uniformidad en la exposición del diseño.

Entonces, se realizó una extensión de la (Tabla 9) la cual consistió en las propiedades la viga, como se muestra a continuación:

Tabla 13. Datos de vigas

Viga	Inercia (in ⁴)	Centroide (in)	Altura (ft)	Área (in ²)	Base (in)	Peso (lb/ft)
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822
IV	260730	24.73	4.5	789	26	822

Fuente: (Propia).

En este particular caso todas las longitudes requeridas se cumplieron con la viga tipo 4 por ende fue seleccionada y se ingresaron sus datos dentro de la hoja de cálculo.

Posteriormente se consideró la losa con un espesor de 8.5in y luego se ingresaron sus propiedades de sección simple y luego se calcularon para sección compuesta.

Entonces, tomando como referencia el primer modelo (variante 19) el cual tiene una longitud total de 450ft, espaciado de vigas de 5.91ft a 0 grados Fahrenheit. Primero se calculó el centroide de la losa.

$$Yb \text{ losa} = H_{\text{viga}} + \frac{\text{Espesor}}{2}$$

Ecuación 9. Centroide losa

Fuente: (Canales, 2019).

$$Yb \text{ losa} = 6ft * 12 + \frac{8.5 \text{ in}}{2}$$

$$Yb \text{ losa} = 58.25 \text{ in}$$

Luego, se calculó el área de la losa multiplicando el espesor con el espaciado de las vigas que la sostienen.

$$Alosa = \text{Espesor losa} * \text{espaciado de vigas}$$

Ecuación 10. Área de losa

Fuente: (Canales, 2019)

$$Alosa(in^2) = 8.5in * 5.91ft * 12$$

$$Alosa = 602.82 in^2$$

Una vez obtenida el área de la losa se realizó una sumatoria entre el área de la viga y el área de la losa para ir obteniendo los datos necesarios para los cálculos de la sección compuesta.

$$SumA = \text{Area de losa} + \text{Area de viga}$$

Ecuación 11. Sumatoria de áreas

Fuente: (Canales, 2019)

$$SumA = 602.82 in^2 + 789 in^2$$

$$SumA = 1,391.82 in^2$$

Seguidamente se realizó una sumatoria de áreas multiplicadas por su centroide, tanto de la viga como de la losa.

$$Sum(A * Y) = (\text{Area de viga} * \text{Centroide de viga}) + (\text{Area de losa} * \text{Centroide de losa})$$

Ecuación 12. Sumatoria de áreas multiplicadas por centroides

Fuente: (Canales, 2019)

$$Sum(A * Y) = (789in^2 * 24.73in) + (602.82 in^2 * 58.25in)$$

$$Sum(A * Y) = 54,626.235 in^3$$

Con la obtención de los resultados anteriores fue posible calcular el centroide de la sección compuesta el cual consistió en una división entre ambos.

$$Yb \text{ compuesto } (in) = \frac{SumA}{Sum(A * Y)}$$

Ecuación 13. Centroide sección compuesta

Fuente: (Canales, 2019)

$$Yb \text{ compuesto} = \frac{54,626.235 in^3}{1,391.82 in^2}$$

$$Yb \text{ compuesto} = 39.248 in$$

Después, se utilizó el teorema de los ejes paralelos para todos los componentes estructurales involucrados para luego poder obtener una sola inercia de sección compuesta.

$$Ad^2losa = \text{Area de Losa} * (\text{Centroide de losa} - \text{Centroide secc. compuesta})^2$$

Ecuación 14. Teorema de ejes paralelos (Losa)

Fuente: (Canales, 2019)

$$Ad^2losa = 602.82 \text{ in}^2 * (58.25 \text{ in} - 39.248061 \text{ in})^2$$

$$Ad^2losa = 217,662.46 \text{ in}^4$$

$$Ad^2viga = \text{Area de Viga} * (\text{Centroide de viga} - \text{Centroide secc. compuesta})^2$$

Ecuación 15. Teorema de ejes paralelos (Viga)

Fuente: (Canales, 2019)

$$Ad^2viga = 789 \text{ in}^2 * (24.73 \text{ in} - 39.248061 \text{ in})^2$$

$$Ad^2viga = 166,300.74 \text{ in}^4$$

$$Inercia \text{ de losa} = \text{Espaciado de vigas (in)} * \frac{\text{Espesor de losa (in)}^3}{12}$$

Ecuación 16. Inercia de losa

Fuente: (Canales, 2019)

$$Inercia \text{ de losa} = (5.91 \text{ ft} * 12) * \frac{8.5 \text{ in}^3}{12}$$

$$Inercia \text{ de losa} = 3,629.4786 \text{ in}^4$$

Con todos los resultados obtenidos fue posible realizar el cálculo de la inercia de la sección compuesta.

$$Inercia \text{ secc. compuesta (in}^4) = (\text{Inercia viga} + Ad^2viga + Inercia \text{ losa} + Ad^2losa)$$

Ecuación 17. Inercia secc. Compuesta

$$Inercia \text{ secc. compuesta (in}^4)$$

$$= 260,730 \text{ in}^4 + 166,300.74 \text{ in}^4 + 3,629.4786 \text{ in}^4 + 217,662.46 \text{ in}^4$$

$$Inercia \text{ secc. compuesta} = 648,322.679 \text{ in}^4$$

Habiendo obtenido los resultados de cada variante, se ingresaron los datos en la tabla la cual es una extensión de la (Tabla 13). Dado que las vigas son Tipo IV en cada variante los resultados

son similares pero varían debido a que la sección cambia cuando existe un diferente espaciado de vigas.

Tabla 14. Propiedades de secc. compuesta

Yb losa (in)	A losa (in ²)	SumA (in ²)	Sum(A*Y) (in ³)	Yb comp. (in)	Ad ² losa (in ⁴)	Ad ² viga (in ⁴)	Inercia losa (in ⁴)	Inercia secc. comp.(in ⁴)
58.25	602.82	1391.82	54626.24	39.25	217662.46	166300.74	3629.48	648322.68
58.25	602.82	1391.82	54626.24	39.25	217662.46	166300.74	3629.48	648322.68
58.25	602.82	1391.82	54626.24	39.25	217662.46	166300.74	3629.48	648322.68
58.25	723.18	1512.18	61637.21	40.76	221208.32	202754.67	4354.15	689047.13
58.25	723.18	1512.18	61637.21	40.76	221208.32	202754.67	4354.15	689047.13
58.25	723.18	1512.18	61637.21	40.76	221208.32	202754.67	4354.15	689047.13
58.25	903.72	1692.72	72153.66	42.63	220610.24	252686.80	5441.15	739468.19
58.25	903.72	1692.72	72153.66	42.63	220610.24	252686.80	5441.15	739468.19
58.25	903.72	1692.72	72153.66	42.63	220610.24	252686.80	5441.15	739468.19

Fuente: (Propia).

La obtención de estos datos es relevante debido a que es información necesaria para el proceso posterior del diseño de los apoyos. Donde se requiere de pesos, módulos e inercia de las secciones involucradas con el apoyo.

5.1.2 DISEÑO DE APOYOS

Debido a variaciones en coeficientes de temperatura se producirán cambios de volúmenes en el concreto, consecuentemente un decrecimiento o un incremento de tamaño. Los responsables de absorber ese diferencial generado son los apoyos.

Por esa razón se deben de diseñar acorde a las revisiones y sugerencias de la AASHTO. Las normas de diseño consisten principalmente en proponer dimensiones para los apoyos que cumplan con las dimensiones mínimas en base a los esfuerzos generados.

Para el diseño de los apoyos se consideraron 2 de estos debido a que son la cantidad en los que se apoya una viga. Las longitudes de los tramos se mantienen simétricas a pesar de las longitudes totales cambiantes, por ende una vez se calculó el diseño de un tramo de 2 apoyos se utilizó este dimensionamiento para toda la longitud del puente de manera repetitiva como se muestra en la figura siguiente (Ilustración 45).

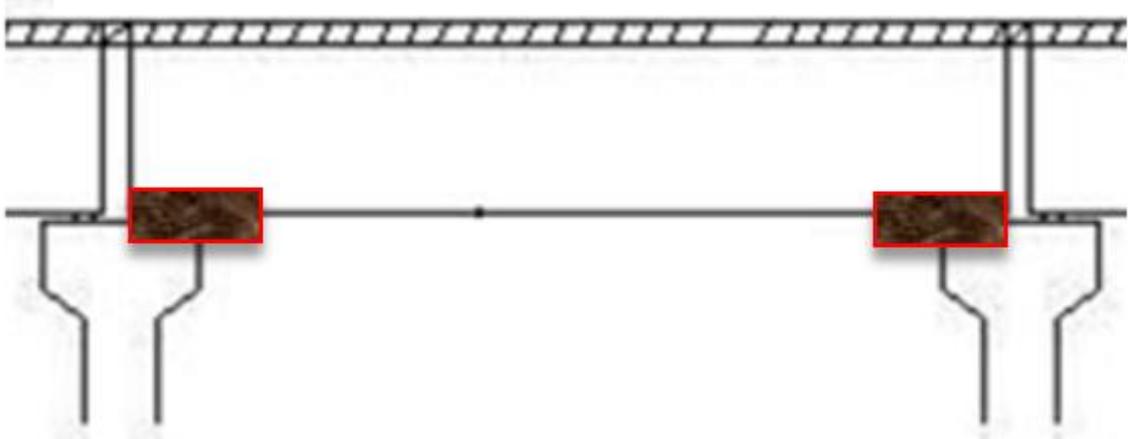


Ilustración 45. Modelaje de apoyos

Fuente: (Propia).

Los apoyos, esencialmente, se diseñaron para resistir las cargas muertas y vivas involucradas con la viga además de considerar esfuerzos de rotación y de cortante. Los apoyos están compuestos por coberturas exteriores de neopreno y capas inferiores de acero y neopreno. Su grosor total fue la dimensión más relevante a calcular debido a su relación con la absorción de fuerzas; esta dependió del número de capas totales que el diseño involucró.

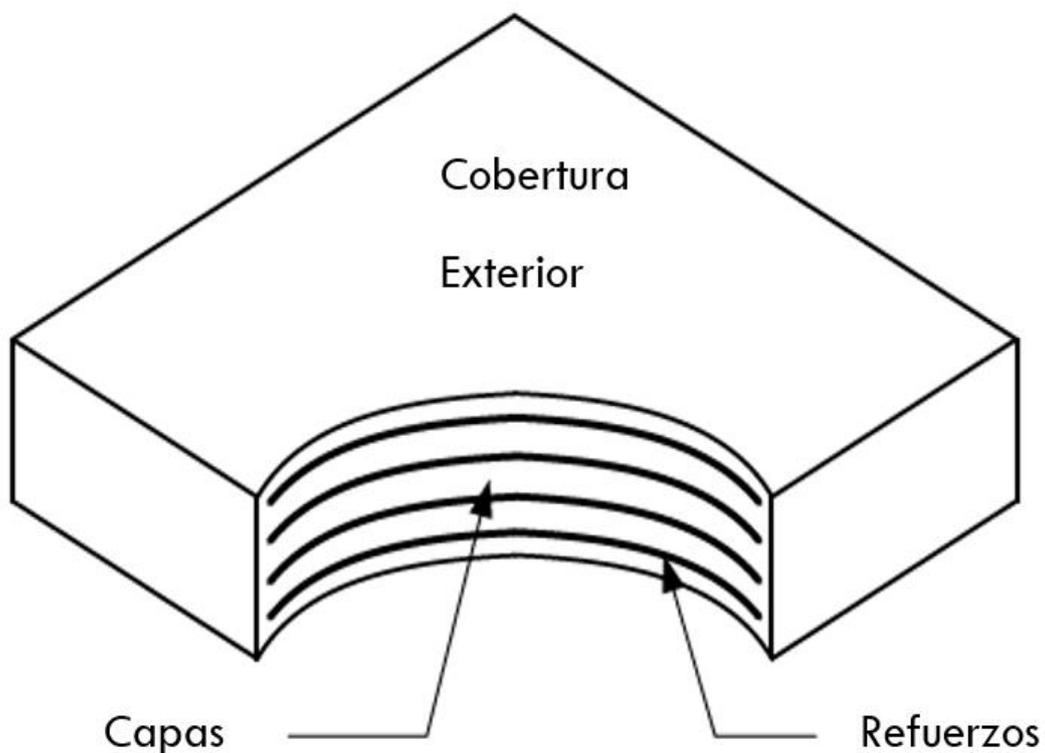


Ilustración 46. Composición de apoyo

Fuente: (DOTD, 2005).

Para evidenciar el proceso de cálculos llevados a cabo se tomó de referencia la variante 19 como se ha venido trabajando a lo largo del apartado.

Inicialmente se consideraron los pesos de los componentes involucrados con el apoyo los cuales son la viga y la losa. El peso de la viga AASTO tipo IV es de 822 lb/ft como lo muestra la tabla de propiedades de las vigas (Tabla 11).

$$\text{Alosa} = \text{Espaciado de vigas (ft)} * \frac{\text{Espesor de losa (in)}}{12}$$

Ecuación 18. Área de losa

Fuente: (Canales, 2019).

$$\text{Alosa} = 5.91(\text{ft}) * \frac{8.5(\text{in})}{12}$$

$$\text{Alosa} = 4.19 \text{ ft}^2$$

$$\text{Wlosa} = \text{Area de losa} * \text{Peso del concreto}$$

Ecuación 19. Peso de losa

Fuente: (Canales, 2019).

$$\text{Wlosa} = 627.94 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

Para la carga viva se consideró un camión de diseño HL93 el cual represente una carga de 32,000 lb para las llantas traseras y de 8,000 lb para la llanta delantera lo que brinda una carga resultante de 72,000 lb la cual se utilizó en la mitad de cada tramo. Por lo que la carga viva para cada apoyo correspondió a 36,000lb.

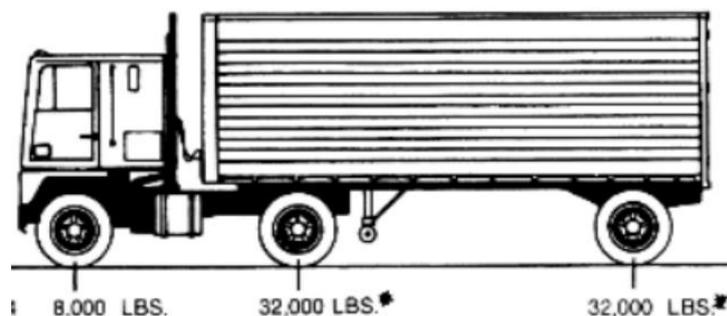


Ilustración 47. Camión de diseño HL93

Fuente: (Palacios Otero, 2012).

La carga muerta consistió en la suma del peso de la losa y el peso de la viga multiplicado por la longitud total del tramo involucrado dividido a la mitad para distribuir las fuerzas a los apoyos.

$$\text{Carga muerta} = (W_{\text{viga}} + W_{\text{losa}}) * \frac{\text{Long. tramo}}{2}$$

Ecuación 20. Carga muerta

Fuente: (Canales, 2019).

$$\text{Carga muerta} = \left(822 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} + 627.94 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} \right) * \frac{90 \text{ ft}}{2}$$

$$\text{Carga muerta} = 65,247 \text{ lb}$$

Con estos datos fue posible calcular la reacción en los apoyos la cual fue la suma de ambas cargas.

$$\text{Reacción apoyo} = \text{LL} + \text{DL}$$

Ecuación 21. Reacción en apoyo

Fuente: (Canales, 2019).

$$\text{Reacción en apoyo} = 36,000 \text{ lb} + 65,247 \text{ lb}$$

$$\text{Reacción en apoyo} = 101,247 \text{ lb}$$

Con todos los anteriores parámetros calculados fue posible realizar las revisiones de esfuerzos, dimensiones y separaciones de los apoyos tal como se muestra en (AASHTO, 2012) sección 14.7.5. Una vez calculadas las dimensiones necesarias de los apoyos, estos datos resultantes fueron ingresados a la hoja de cálculo de manera esquematizada como se muestra en (Tabla 15) para luego obtener su rigidez, dato necesario para la generación de los modelos.

Tabla 15. Dimensiones de apoyos

APOYO 1			APOYO 2		
Longitud (in)	Ancho (in)	Espesor (in)	Longitud (in)	Ancho (in)	Espesor (in)
14	24	6	14	24	6

Fuente: (Propia).

La longitud fue calculada según la luz del claro y a base de proposiciones y cumplimientos de la normativa, el ancho fue de 2 pulgadas menos que el ancho de la viga utilizada y el espesor fue calculado según la cantidad de capas involucradas a base de revisiones.

5.1.3 GENERACIÓN DE MODELOS

Todos los anteriores resultados fueron utilizados como datos a ingresar en el software de estructuración. Dada la cantidad de modelos, estos se reorganizaron de manera que se pudiese llevar un orden determinado y evitar la confusión dada la naturaleza repetitiva y extensiva de datos.

Los modelos inicialmente se organizaron por temperatura y separación entonces utilizando la misma referencia a lo largo del capítulo la variante 19 pasó a llamarse FL_0_6_21 donde FL se refiere a la condición flotante de los apoyos, originalmente planteado así por (Canales, 2019) en la disertación original de esta extensión; 0 se refiere a la temperatura en grados Fahrenheit, en este caso 0 grados y 6 se refiere al espaciado utilizado en las vigas; estos 3 datos anteriores conformaron una viñeta en la hoja de cálculo y 21 es el número de modelo correspondiente a esa sección.

Así se reorganizó todo el trabajo para llevar un orden determinado en la generación de los modelos estructurales.

Cada modelo requirió una serie específica de parámetros a ingresar como datos, los cuales fueron los resultados de diseño de vigas y apoyos en las secciones 5.1.1 y 5.1.2 respectivamente. Los parámetros necesarios a ingresar se muestran en la Tabla 17.

Tabla 16. Parámetros de ingreso en STAAD

Caso	tramo1	tramo2	tramo3	tramo4	tramo5	total
FL_0_6_21	90	90	90	90	90	450

Viga	Esp.	min sep.	tren de carga	esp. libre
IV	5.91	54	110	562

ML	K1	Yb	hg
-510.9	117.6	3.3	4.5

Fuente: (Propia).

Donde se consideraron, los tramos con su longitud, la longitud total el tipo de viga, el espaciamiento entre vigas, la separación mínima entre camiones (Tabla 17), el tren de carga (Ecuación 22), el espaciamiento libre (Ecuación 23), el Momento debido al cambio de

temperatura (Tabla 18), los módulos de rigidez de los apoyos (Ecuación 24), el centroide de la sección compuesta y la altura de la viga en pulgadas.

La separación mínima entre camiones se determinó mediante un análisis realizado en la disertación original de la presente extensión (Canales, 2019), por lo tanto se tomó como dato de tabla, el cual varió según el tipo de viga presente.

Tabla 17. Separación mínima entre camiones

Tipo de Viga	Separación mínima (ft)
II	50
III	50
IV	54
V	58

Fuente: (Canales, 2019).

Estas separaciones fueron resultados un análisis para ubicar los camiones, es decir, las cargas en el modelo por lo que sus fines son meramente concernientes al software de modelaje.

El tren de carga consistió en la longitud total de carga por lo que se tomó la separación mínima entre los camiones y el tamaño de cada camión.

Entonces,

$$\text{Tren de carga} = \text{separación mínima} + \text{longitud total de camión}$$

$$\text{Ecuación 22. Tren de carga}$$

Fuente: (Canales, 2019).

$$\text{Tren de carga} = 54 \text{ ft} + 28 \text{ ft} + 28 \text{ ft}$$

$$\text{Tren de carga} = 110 \text{ ft}$$

El espacio libre fue un dato necesario para que el software STAAD supiese aplicar la carga móvil a lo largo de toda la longitud de los tramos en ft

Por lo que,

$$\text{Separación libre} = \text{luz total del tramo} + \text{tren de carga} + 2\text{ft}$$

$$\text{Ecuación 23. Espacio libre}$$

Fuente: (Canales, 2019).

$$\text{Espacio libre} = 450 \text{ ft} + 110 \text{ ft} + 1 \text{ ft} + 1 \text{ ft}$$

$$\text{Espacio libre} = 562 \text{ ft}$$

Donde los 2 ft adicionales son utilizados para que el programa realice un análisis de carga móvil total de la longitud involucrada. 1 ft antes de que inicie el modelo y otro 1 ft después de la longitud para de esta manera garantizarse que abarque toda la longitud.

El momento debido a gradiente de temperatura se tomó como dato de tabla perteneciente a un análisis previamente realizado por (Canales, 2019).

Tabla 18. Momento debido a gradiente de temperatura

Tipo de viga	ML (lb * ft)		
	Espaciado de vigas (ft)		
	5.91	7.09	8.86
II	-286.8	-281.4	-281.4
III	-386.4	-423.9	-444.6
IV	-510.9	-566.2	-611.9
V	-609.4	-675.5	-731.0

Fuente: (Canales, 2019).

El momento debido a gradiente de temperatura fue un resultado directo a la sección transversal de la estructura afectada, debido a que se producen variantes en la deformación relacionados con los volúmenes involucrados. Es decir que este es un valor de momento fijo directamente relacionado con los valores de tensión y compresión generados debido a la sección transversal, entonces se consideran los tipos de vigas y las separaciones entre sí para la determinación de este valor.

La rigidez de los apoyos se define como la resistencia de estos a doblarse o torcerse por la acción de las fuerzas exteriores actuantes en las superficies ejercidas a estos. Todo el proceso desarrollado en la sección 5.1.2 fue realizado para obtener estos valores ya que son los únicos que le conciernen al software de estructuración STAAD.

$$\text{Rigidez de apoyo} = \frac{G * L * W}{T} * 12$$

Ecuación 24. Rigidez de apoyo

Fuente: (Canales, 2019).

Donde,

G = Factor de forma, variante con temperatura (Ksi)

L = Longitud del apoyo en dirección a la luz del tramo (in)

W = Ancho de apoyo (in)

T = Espesor de apoyo (in)

Entonces,

$$\text{Rigidez de apoyo} = \frac{(0.175 \text{ ksi}) * (14 \text{ in}) * (24 \text{ in})}{6 \text{ in}} * 12$$

$$\text{Rigidez de apoyo} = 117.6 \text{ ft}$$

Luego se tomó el centroide de la sección compuesta (Ecuación 13) y la altura de la viga proveniente de (Tabla 12).

Habiendo obtenido todos los datos del presente apartado se procedió a ingresarlos como parámetros en los modelos estructurales lo que proporcionó un modelo con todas las variantes como resultado final.

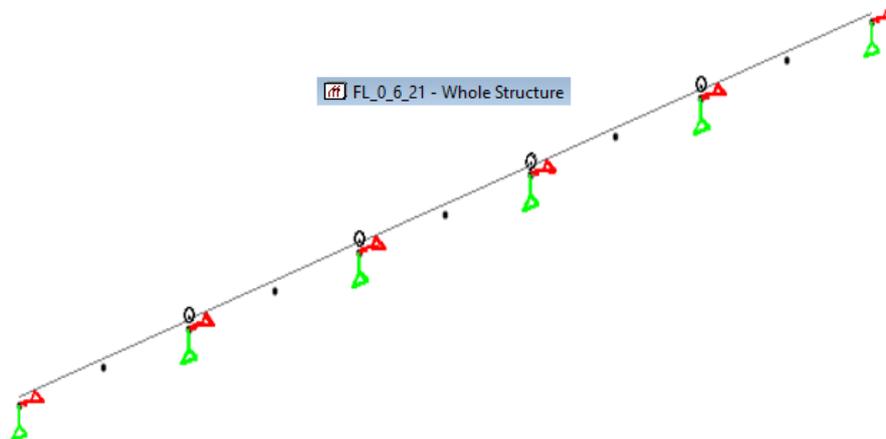


Ilustración 48. Modelo Estructural

Fuente: (Propia).

El modelo final expone cada uno de los tramos con sus apoyos; la rigidez se determinó una sola vez debido a que los tramos son simétricos y por ende todos los apoyos fueron considerados en un solo diseño. Con los resultados obtenidos se procedió a realizar una extracción de datos los cuales fueron las consecuencias de todas las variantes ingresadas como datos en cada uno de los 162 modelos.

5.2 INTERPRETACIÓN DE DATOS

Habiendo obtenido los modelos de STAAD se procedió a correr modelo por modelo los 162 casos de puentes de estudio. Para obtener los resultados necesarios para la evaluación del desempeño de las losas se evaluaron las acciones de las cargas vivas y del gradiente de temperatura contra la longitud de tramos, longitud del segmento y rigidez del apoyo. También para efectos de análisis se decidió sintetizar los resultados obtenidos en gráficos comparativos para obtener una mejor comprensión de los resultados.

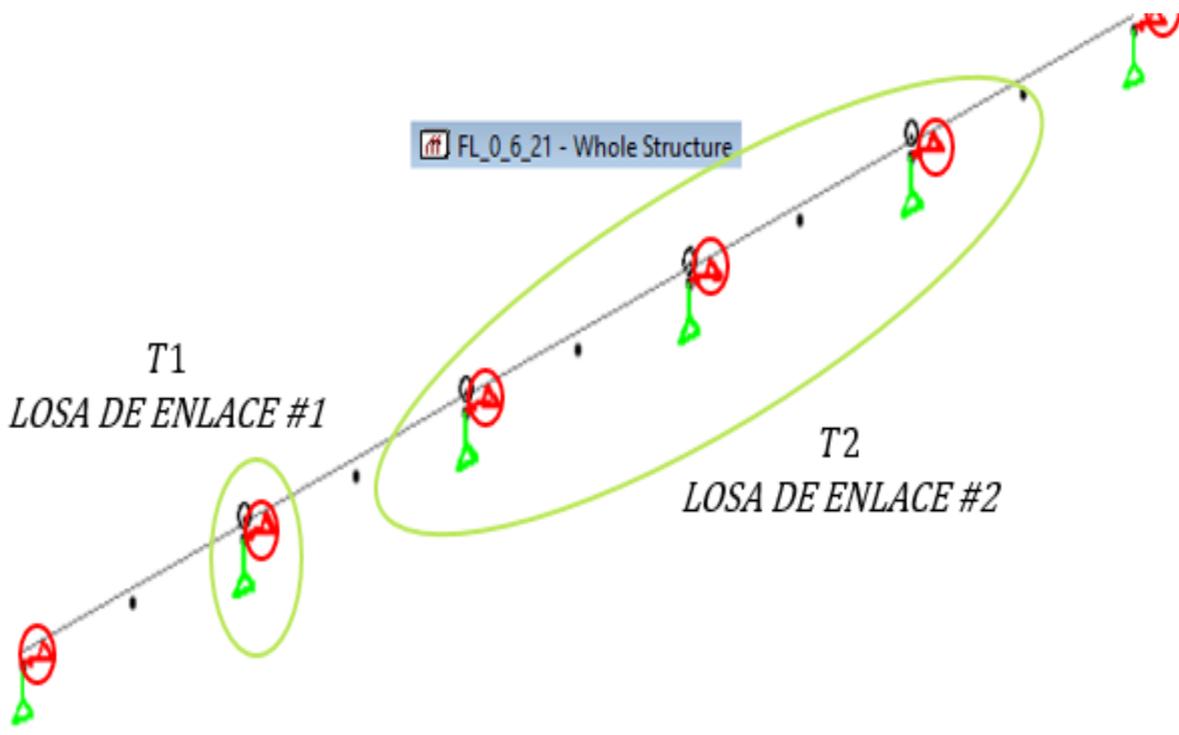


Ilustración 49. Modelo utilizado para análisis de datos

Fuente: (Propia). En la ilustración se logra apreciar que T1 es la primera losa de enlace y T2 es el caso más crítico de las posteriores losas de enlace involucradas en el sistema estructural, ambas se sometieron a las distintas cargas y variables involucradas con esta investigación.

5.2.1 GRADIENTE DE TEMPERATURA

El gradiente de temperatura es una carga que existe debido a los cambios de volúmenes en el concreto. Se realizó un análisis con los resultados obtenidos en donde se estudia la influencia que esta carga tuvo en:

- 1) Longitudes de tramos y segmentos.
- 2) Rigidez de los apoyos.

1) Longitudes de tramos y segmentos.

Como se demostró en la tabla 6 existen 3 posibles longitudes de segmentos en la presente extensión los cuales son 450ft, 600ft y 740ft por ende el número de tramos y longitudes de estos varió en cada longitud total. A continuación se muestran los esfuerzos de tensión generados en la losa de enlace #1 (T1) (ilustración 49) debido al gradiente de temperatura en los tramos.

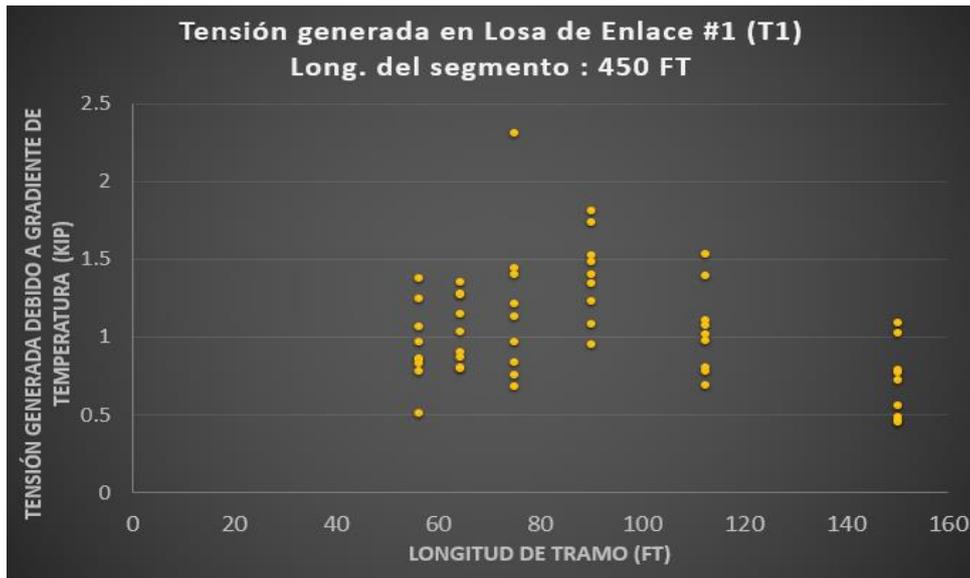


Gráfico 2. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 450 ft

Fuente: (Propia).

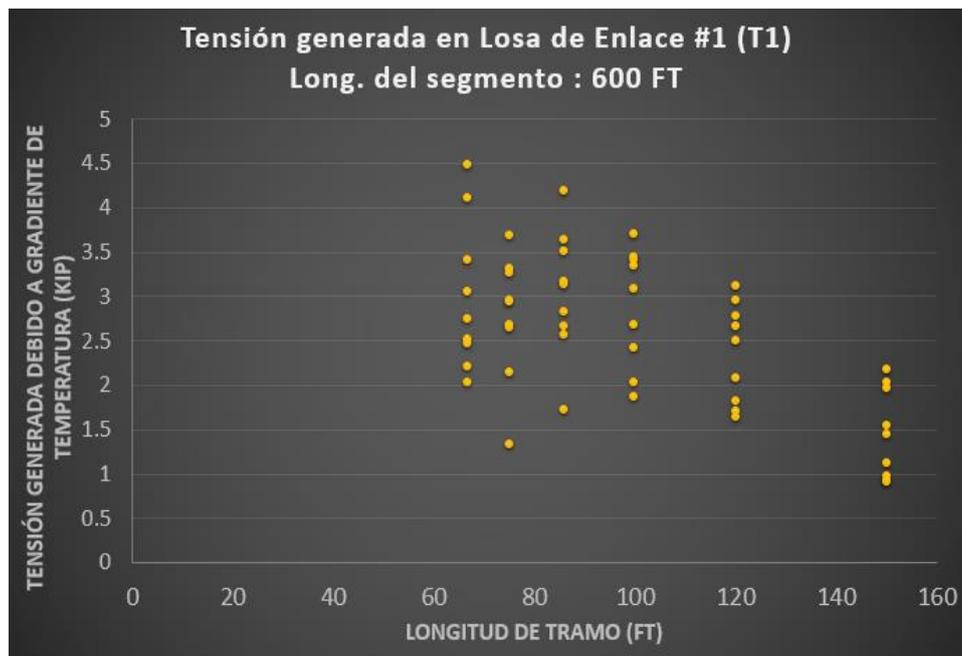


Gráfico 3. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 600 ft

Fuente: (Propia).

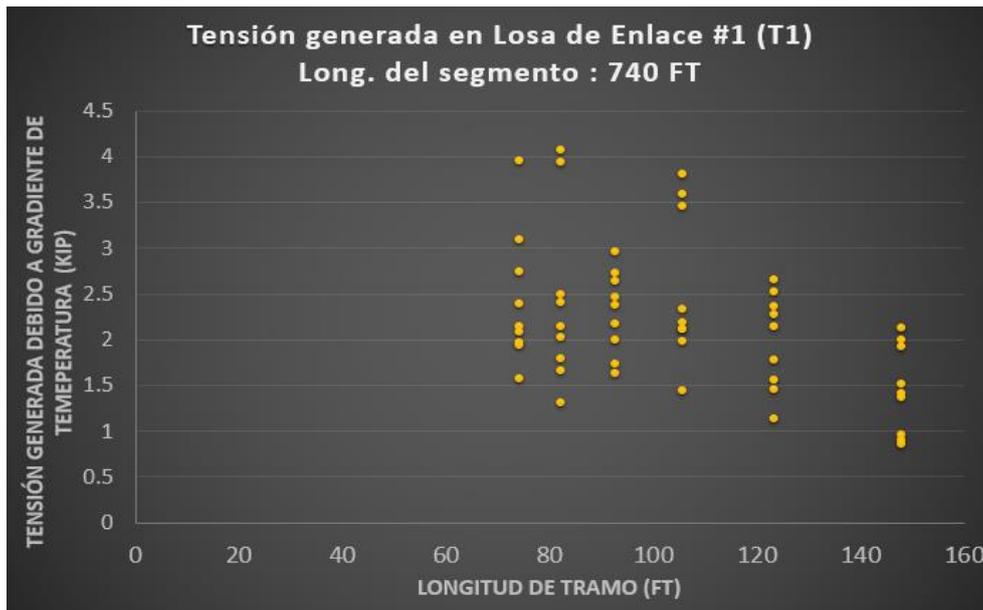


Gráfico 4. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 740 ft

Fuente: (Propia).

Según los resultados obtenidos de las fuerzas tensionantes en la losa de enlace #1 en los gráficos número 2, 3 y 4 se observó que debido a que las longitudes de los tramos varían según la longitud total del tramo, no se encuentra una correspondencia relevante en cuanto a la tensión generada según su longitud. Se observa que la tensión varía según las longitudes sin una determinada tendencia. Lo mismo se muestra en los resultados de las fuerzas tensionantes en la losa #2 (T2), gráficos 5, 6 y 7.

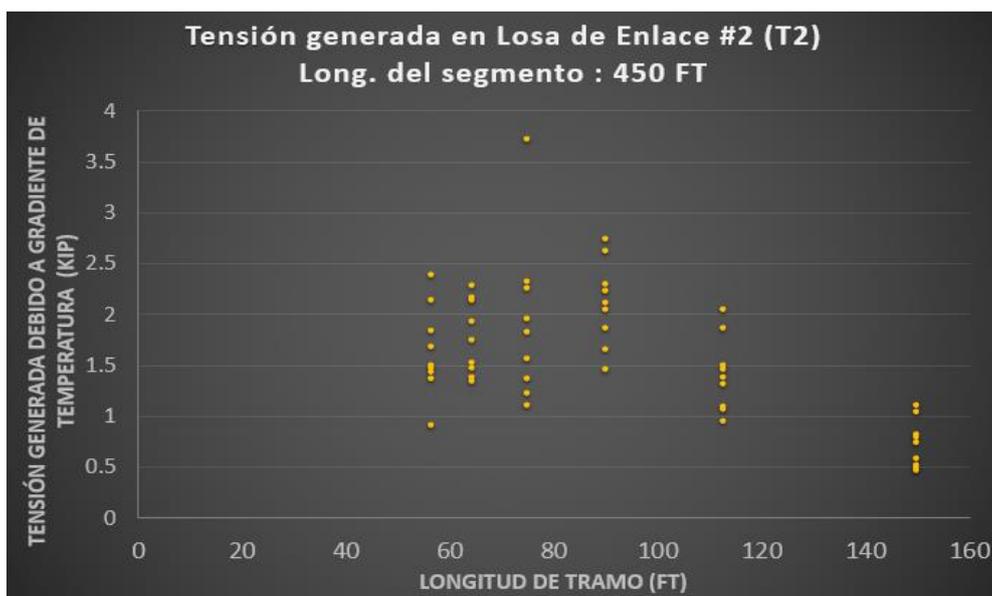


Gráfico 5. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 450 ft

Fuente: (Propia).

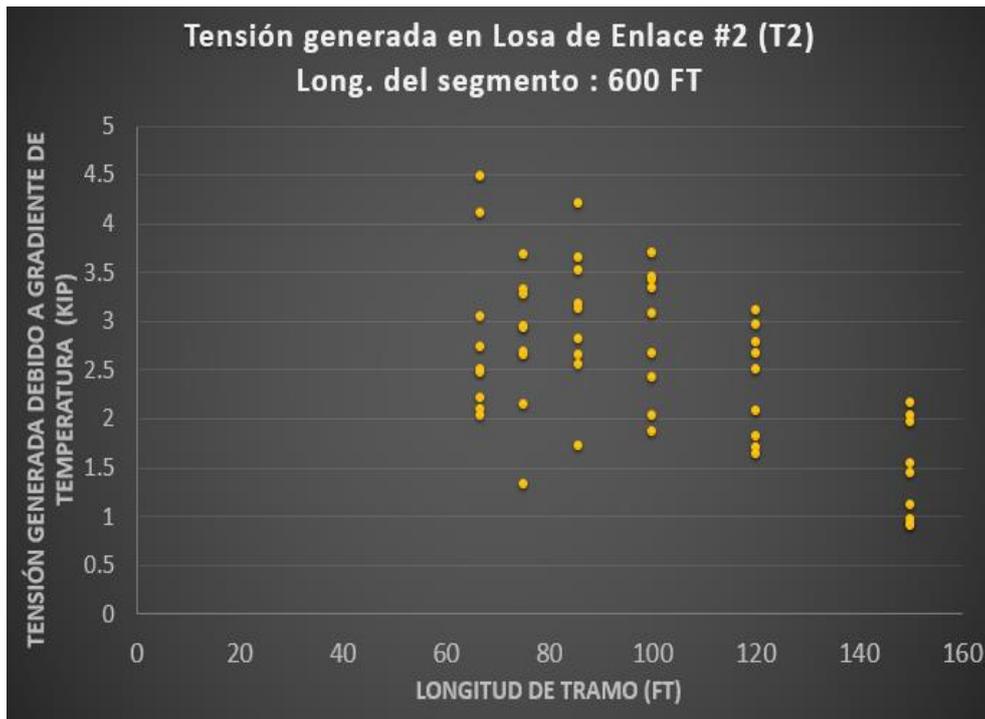


Gráfico 6. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 450 ft

Fuente: (Propia).

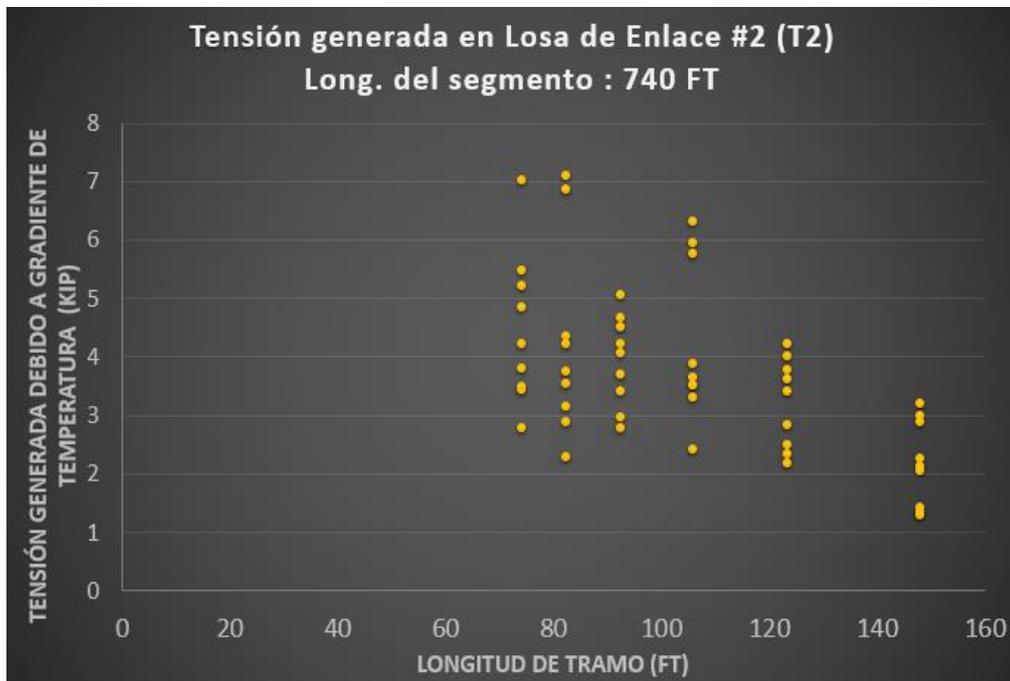


Gráfico 7. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 740 ft

Fuente: (Propia).

2) Rigidez de los apoyos.

La rigidez de los apoyos se define como la resistencia de estos a doblarse o torcerse por la acción de las fuerzas exteriores actuantes en las superficies ejercidas a estos, a continuación se muestran los esfuerzos de tensión generados en la losa de enlace #1 (T1) y # 2 (T2) debido al gradiente de temperatura y su magnitud en comparación con las distintas rigideces de los apoyos generadas en los modelos.

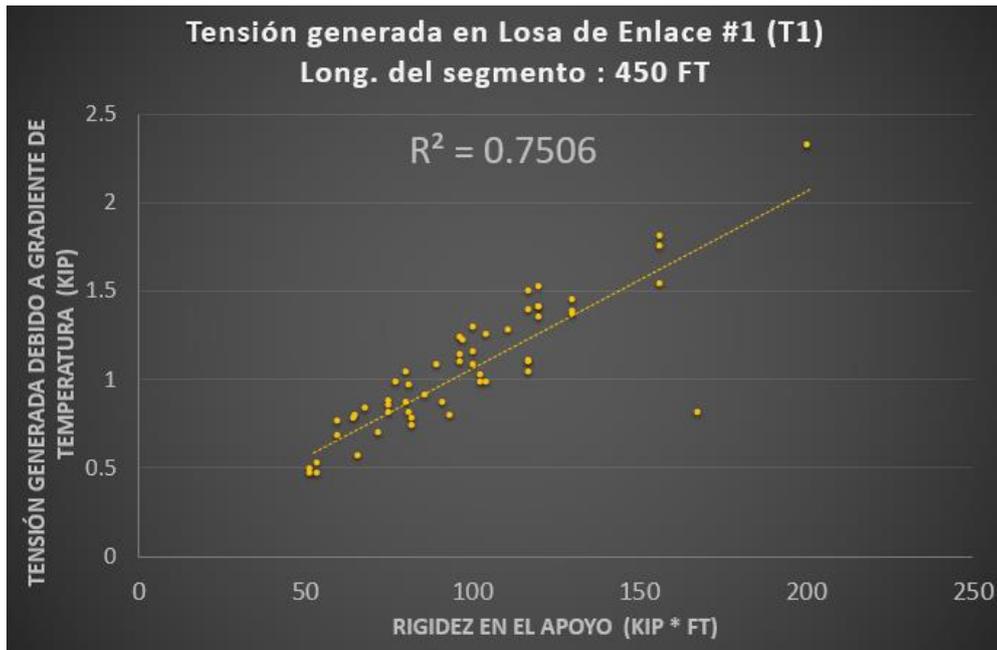


Gráfico 8. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 450 ft

Fuente: (Propia).

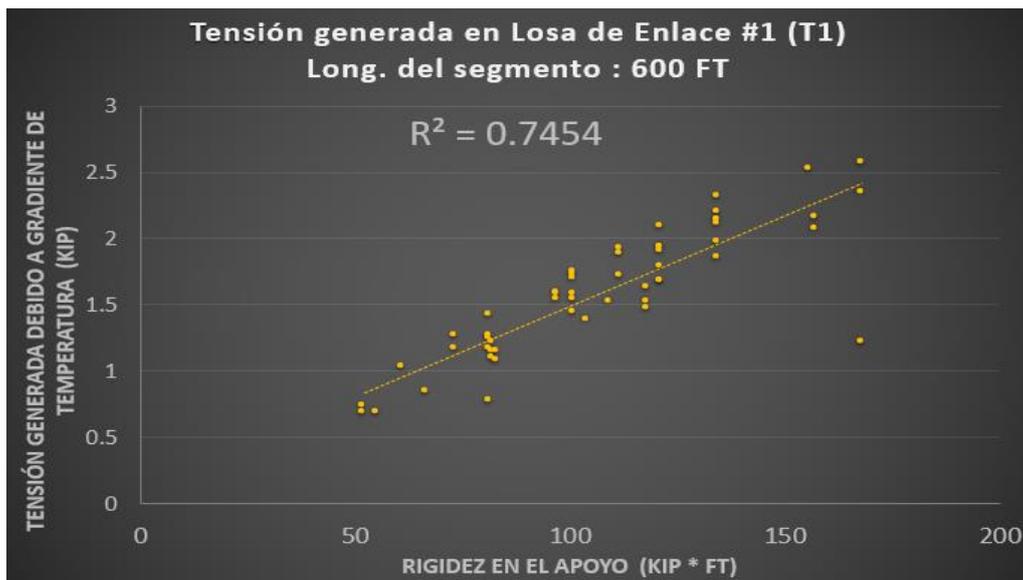


Gráfico 9. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 600 ft

Fuente: (Propia).

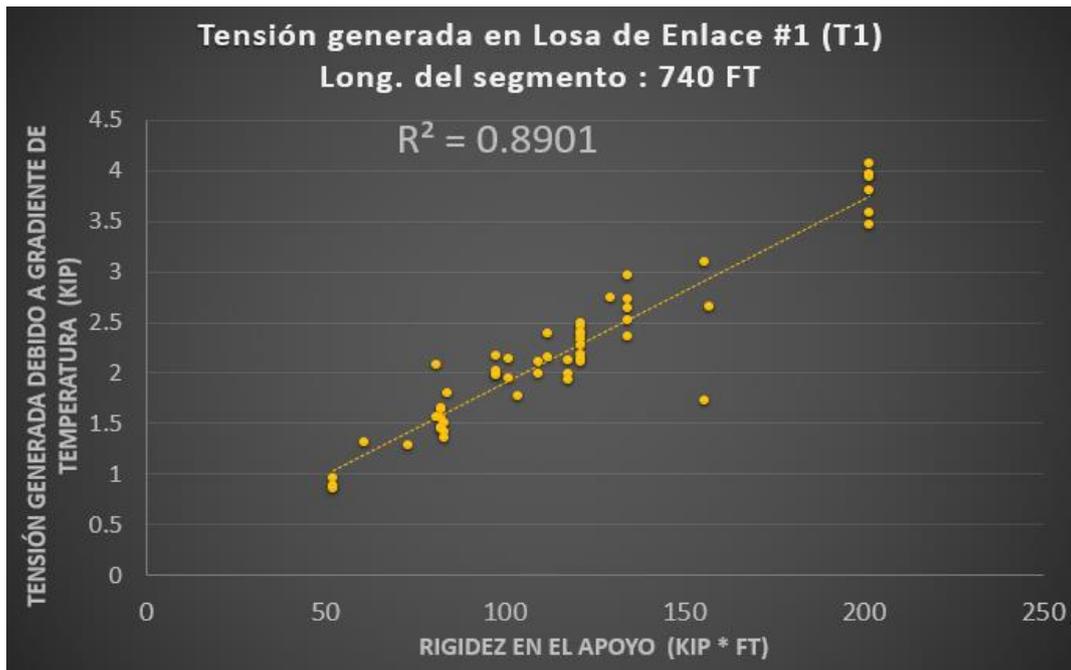


Gráfico 10. Tensión generada en T1, Grad. Temp. 740 ft

Fuente: (Propia).

Según los resultados obtenidos de las fuerzas tensionantes en la losa de enlace #1 en los gráficos número 8, 9 y 10 se observó que existe una correlación ascendente según se incrementan las rigideces de los apoyos, lo que demuestra que a mayor rigidez se tuvo, mayor tensión se generó.

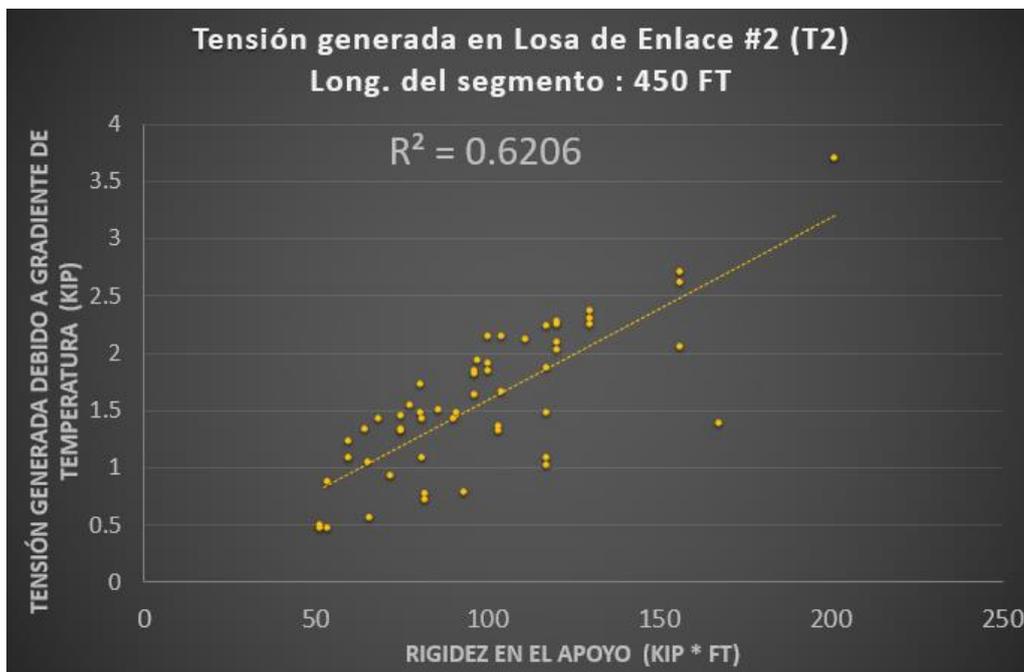


Gráfico 11. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 450 ft

Fuente: (Propia).

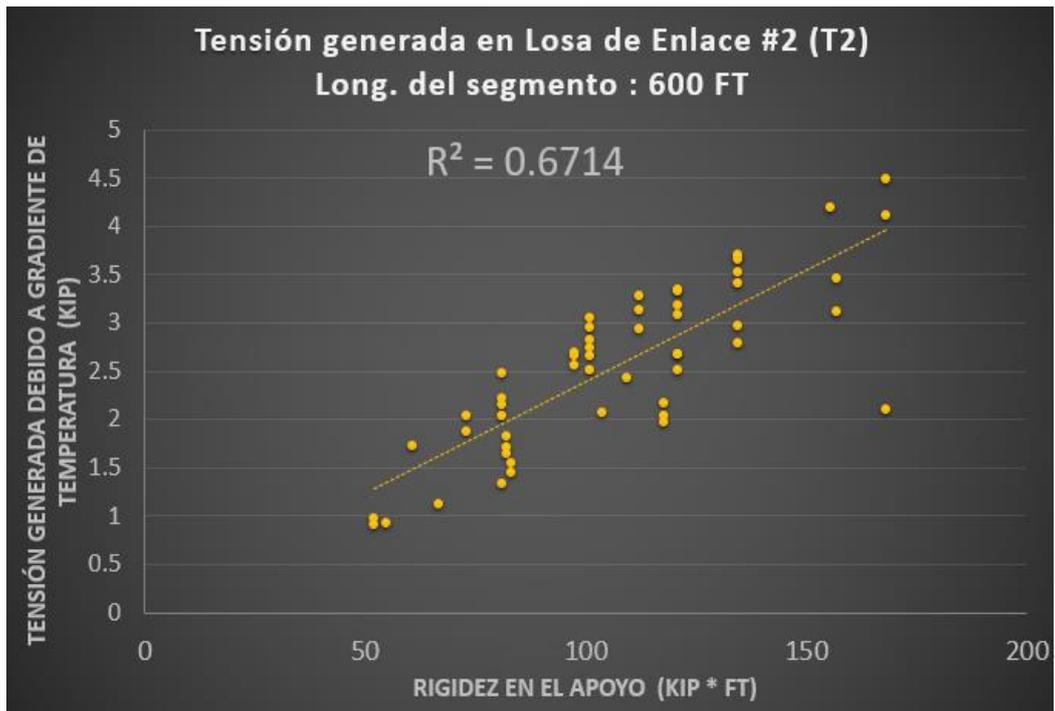


Gráfico 12. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 600 ft

Fuente: (Propia).

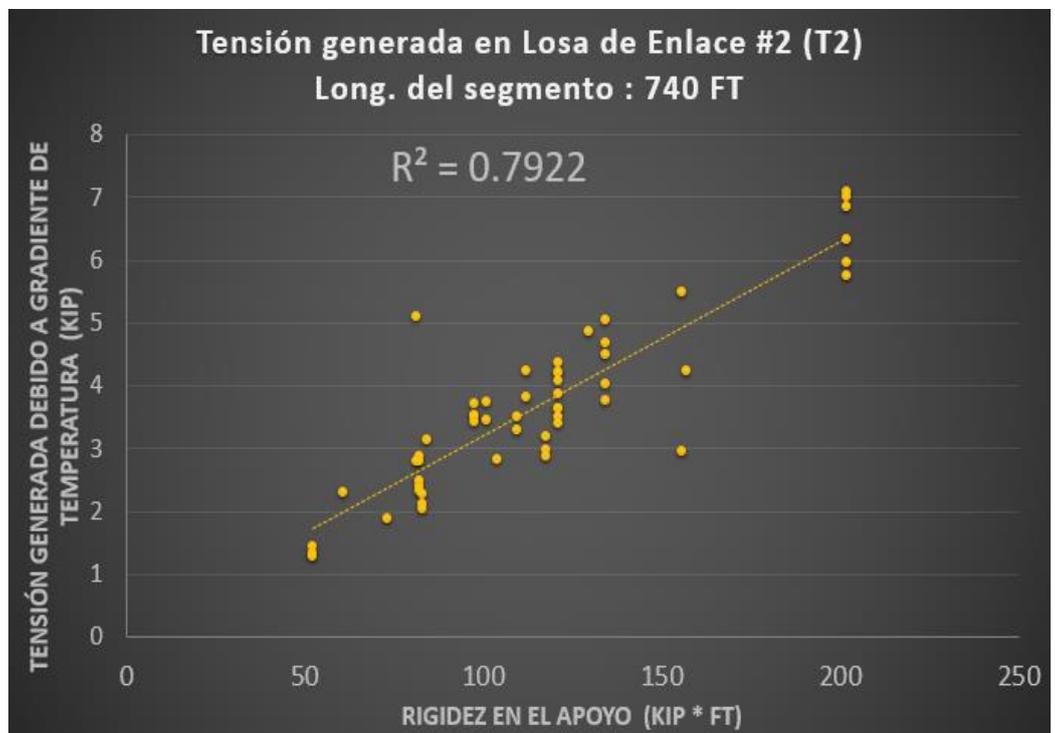


Gráfico 13. Tensión generada en T2, Grad. Temp. 740 ft

Fuente: (Propia).

Según las fuerzas tensionantes a la losa de enlace #2 (T2) en los gráficos 11, 12 y 13 se demostró que los resultados fueron similares a los obtenidos para la primera losa de enlace, debido a que el gradiente afecta a toda la estructura de forma sincrónica y uniforme por ende la correlación entre rigidez y tensión se mantuvo.

5.2.2 CARGAS VIVAS

La carga viva es una carga que existe debido a las cargas móviles involucradas con la estructura del puente. Al igual que para el gradiente de temperatura se realizó un análisis con los resultados obtenidos en donde se estudia la influencia que esta carga tuvo en la rigidez de los apoyos y las longitudes de tramos y segmentos:

- 1) Longitudes de tramos y segmentos.

Como se mencionó anteriormente existen 3 posibles longitudes de segmentos en la presente extensión los cuales son 450ft, 600ft y 740ft por ende el número de tramos y longitudes de estos varió en cada longitud total de igual manera. A continuación se muestran los esfuerzos de compresión generados en la losa de enlace #1 (T1) debido a las cargas vivas en los tramos.

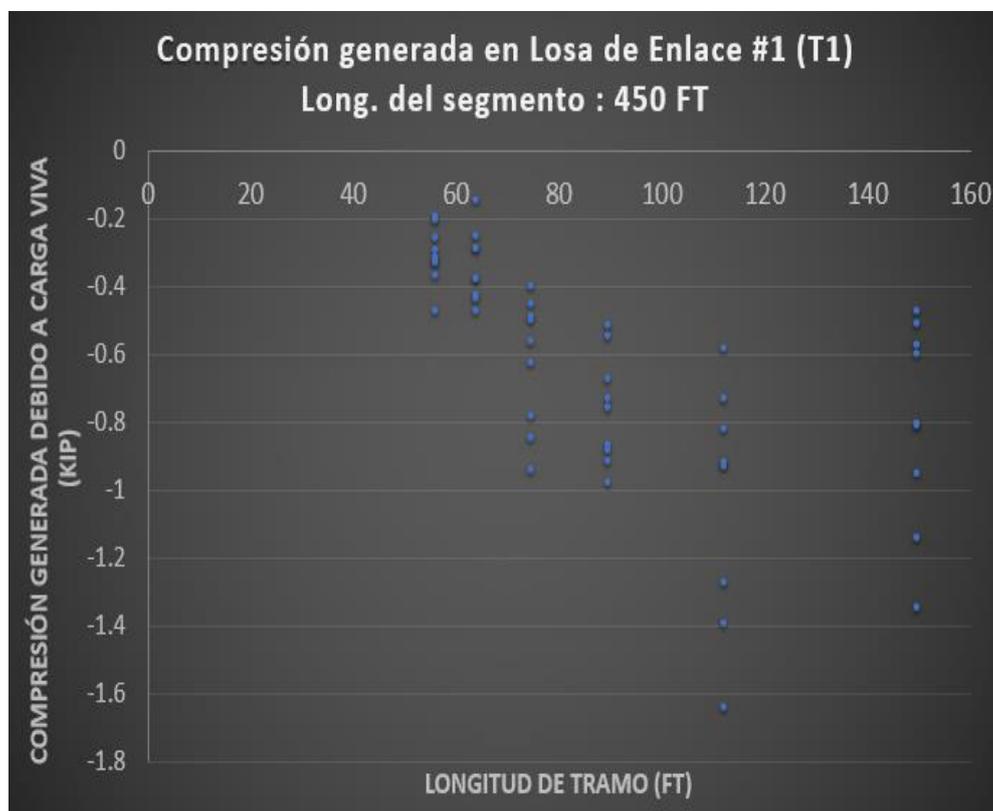


Gráfico 14. Compresión generada en T1, Carga Viva. 450 ft

Fuente: (Propia).

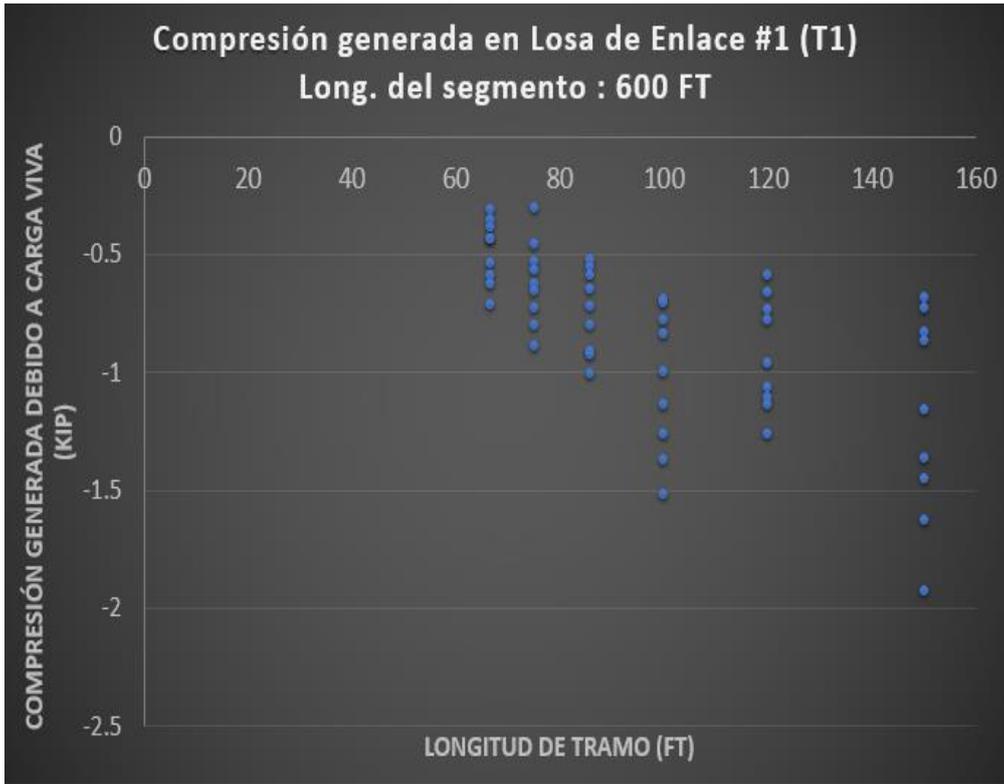


Gráfico 15. Compresión generada en T1, Carga Viva. 600 ft

Fuente: (Propia).

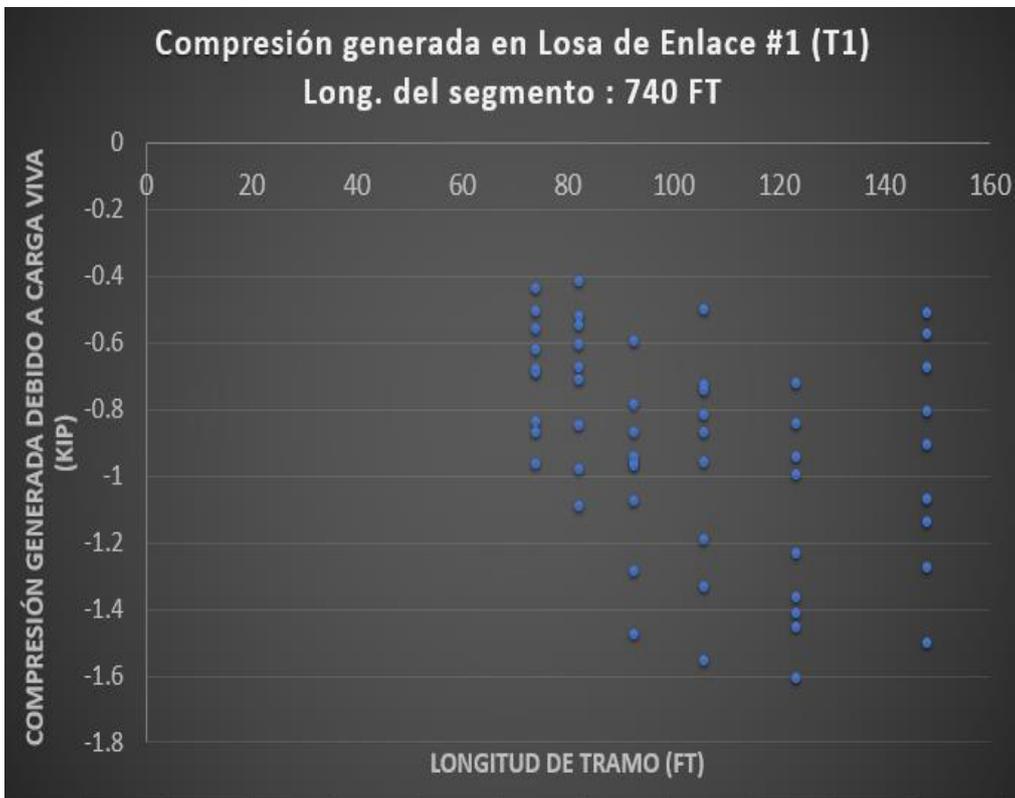
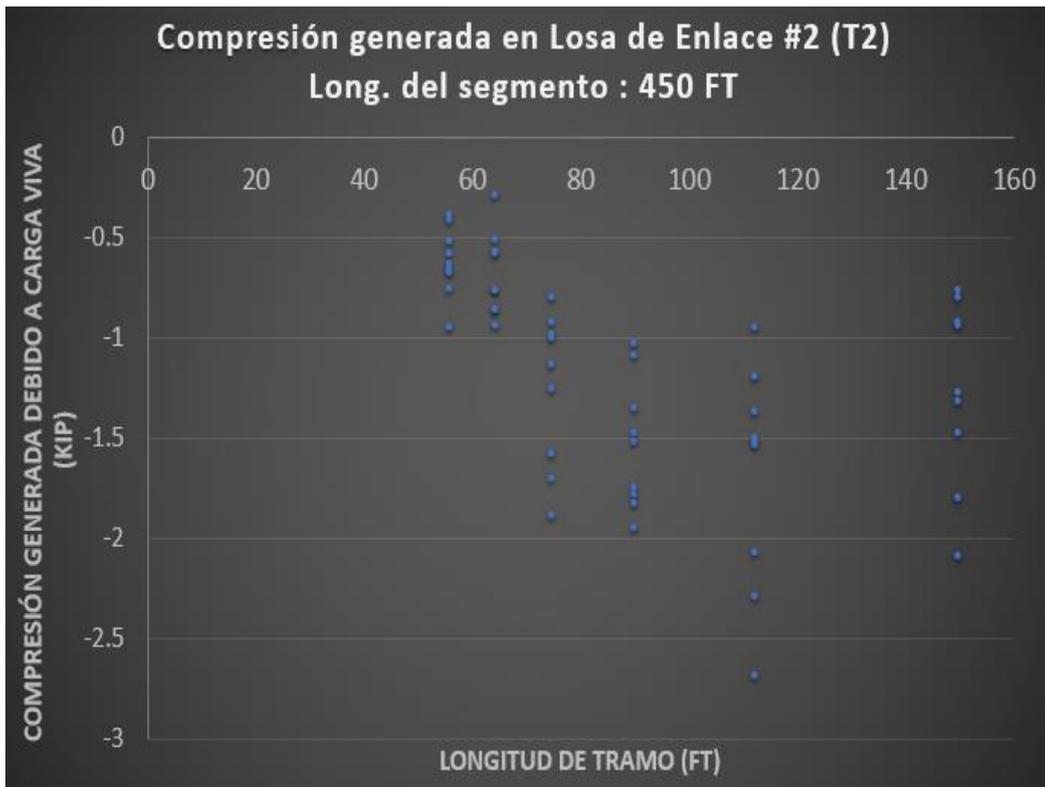


Gráfico 16. Compresión generada en T1, Carga Viva. 740 ft

Fuente: (Propia).



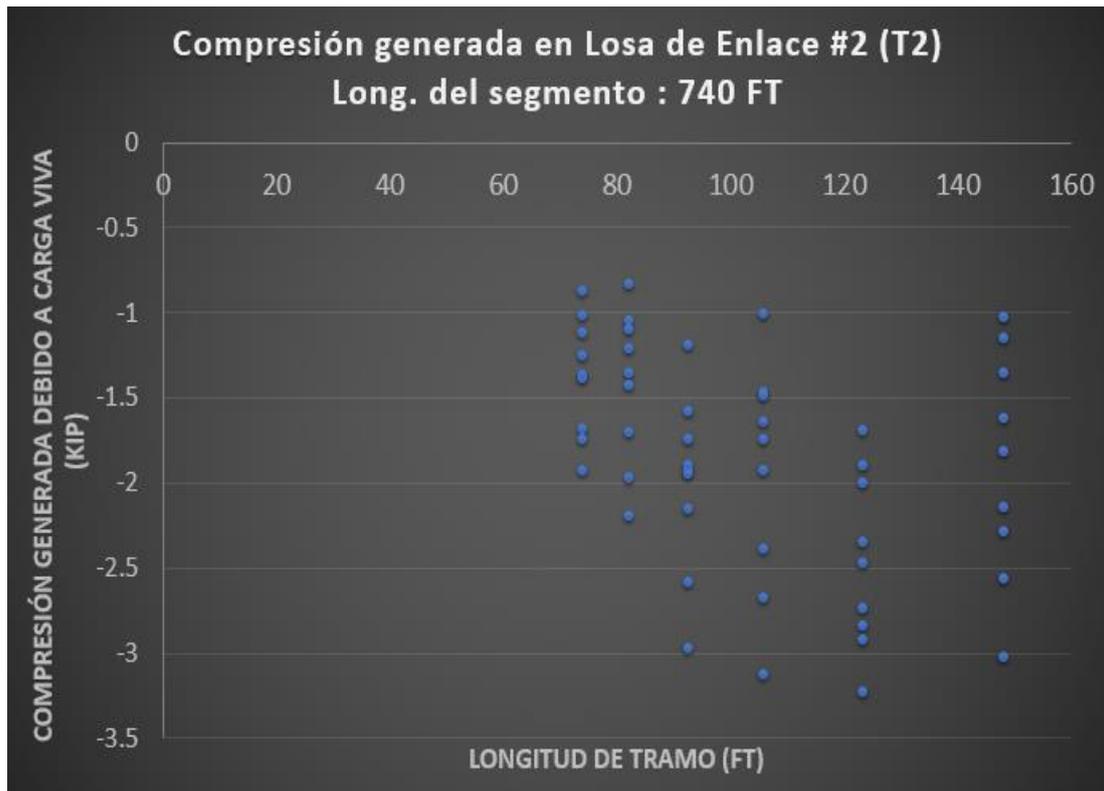


Gráfico 19. Compresión generada en T2, Carga Viva. 740 ft

Fuente: (Propia).

Debido a que las longitudes de los tramos varían según la longitud total del tramo, no se encuentra una correspondencia relevante en cuanto a la compresión generada según su longitud. Sin embargo, se observa que los valores de compresión son más altos en la segunda losa (T2) que en la primera (T1) debido a que se consideraron cargas más críticas.

2) Rigidez de los apoyos.

Como se definió anteriormente la rigidez de los apoyos se define como la resistencia de estos a doblarse o torcerse por la acción de las fuerzas exteriores actuantes en las superficies ejercidas a estos, a continuación se muestran los esfuerzos de compresión generados en la losa de enlace #1 (T1) y #2 (T2) debido a la carga viva y su magnitud en comparación con las distintas rigideces de los apoyos generadas en los modelos.

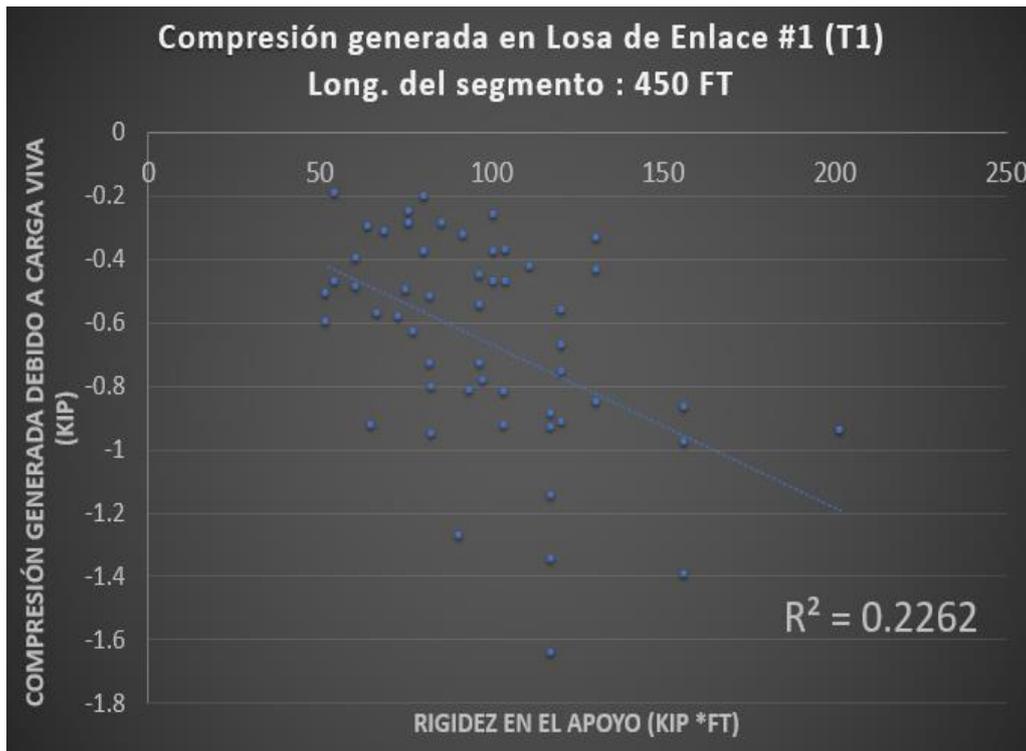


Gráfico 20. Compresión generada en T1, Carga Viva. 450 ft

Fuente: (Propia).

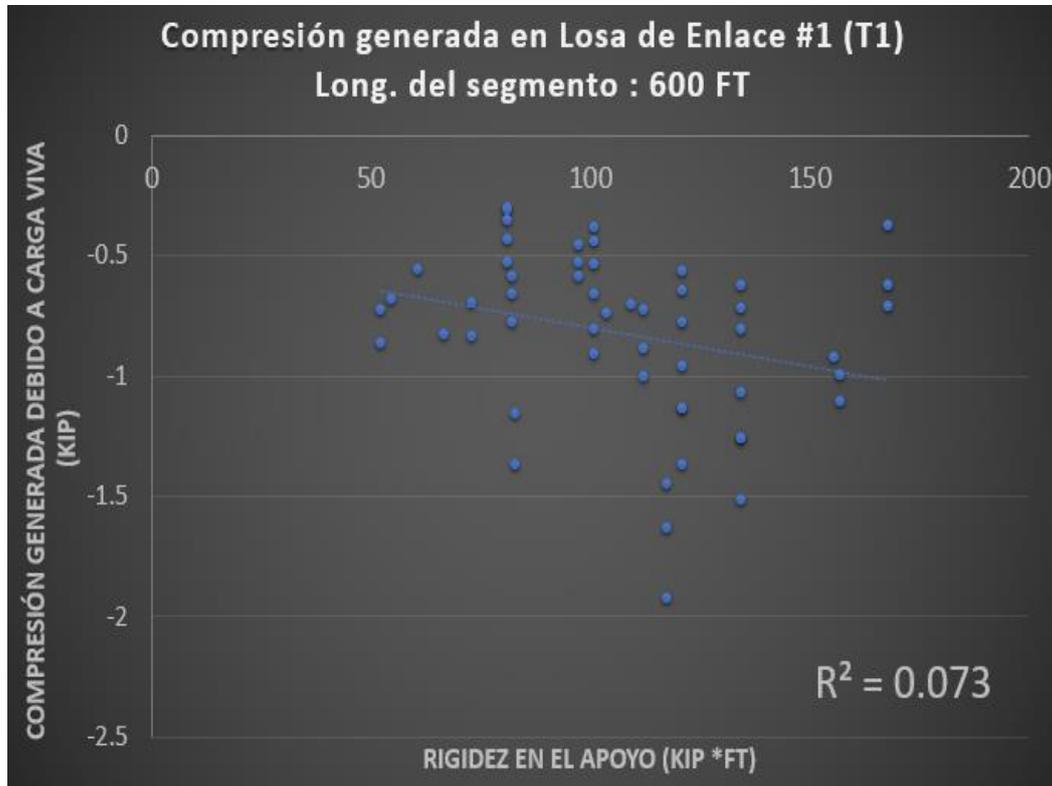


Gráfico 21. Compresión generada en T1, Carga Viva. 600 ft

Fuente: (Propia).

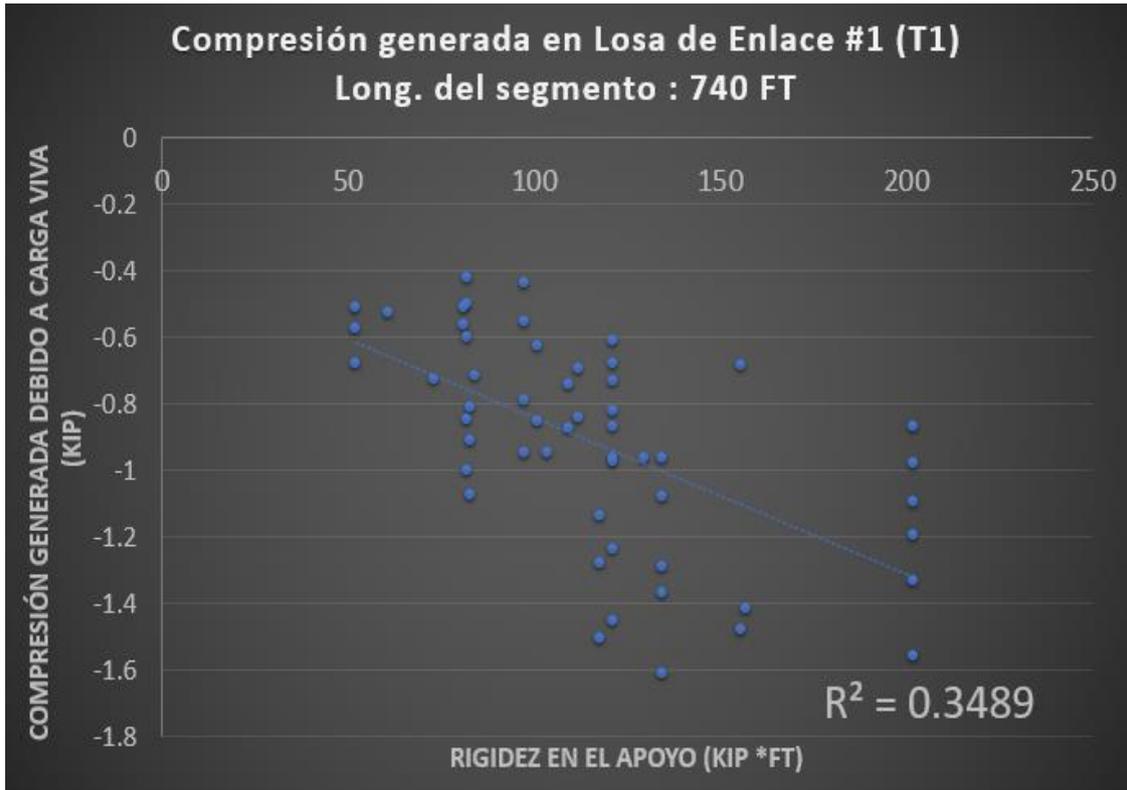


Gráfico 22. Compresión generada en T1, Carga Viva. 740 ft

Fuente: (Propia).

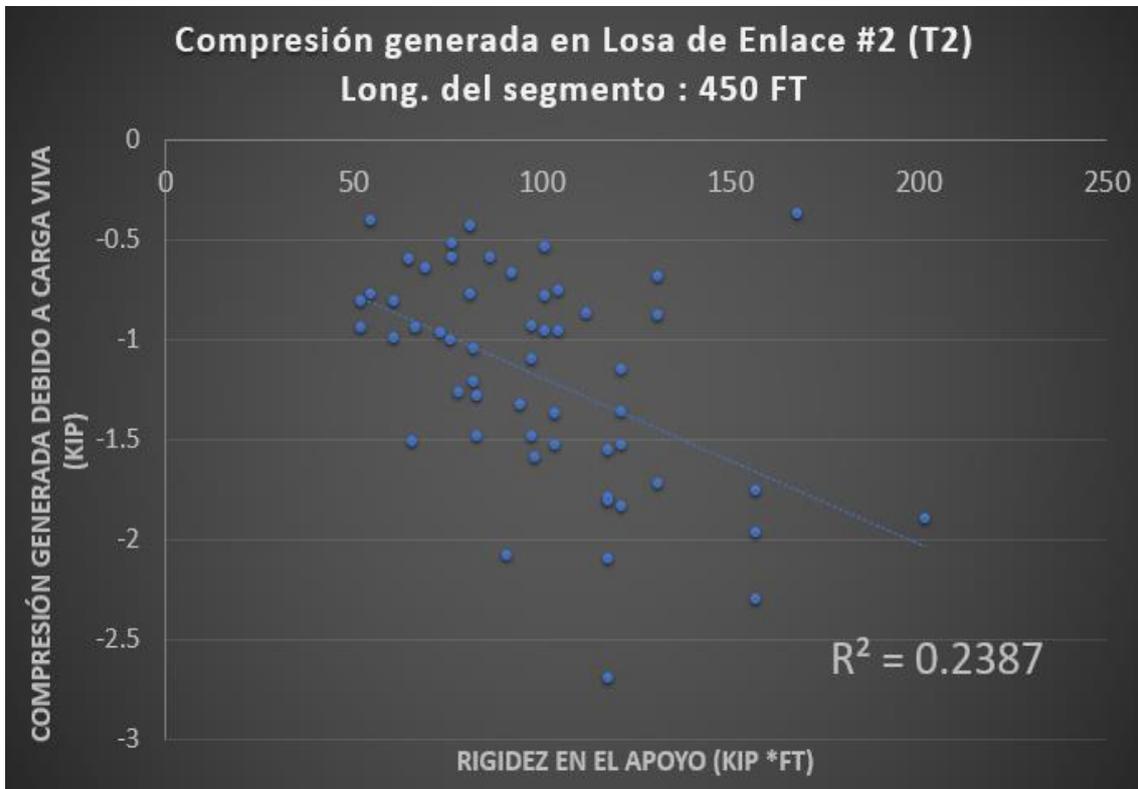


Gráfico 23. Compresión generada en T2, Carga Viva. 450 ft

Fuente: (Propia).

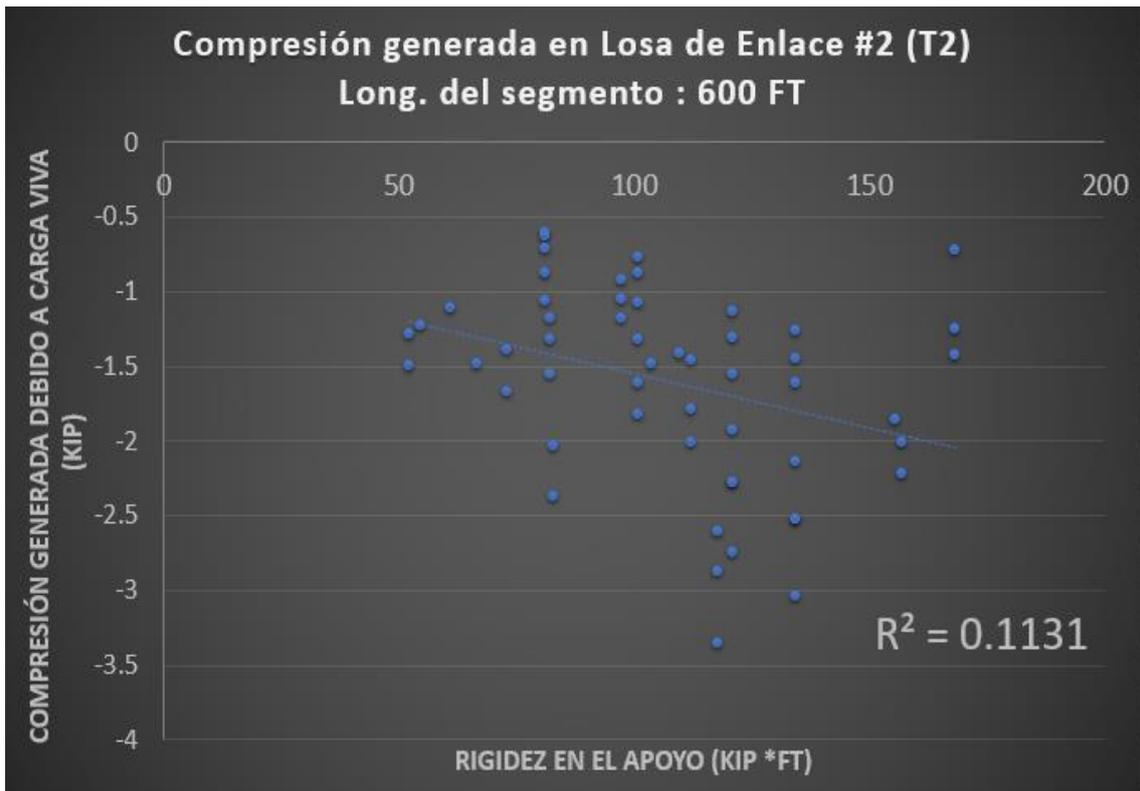


Gráfico 24. Compresión generada en T2, Carga Viva. 600 ft

Fuente: (Propia).

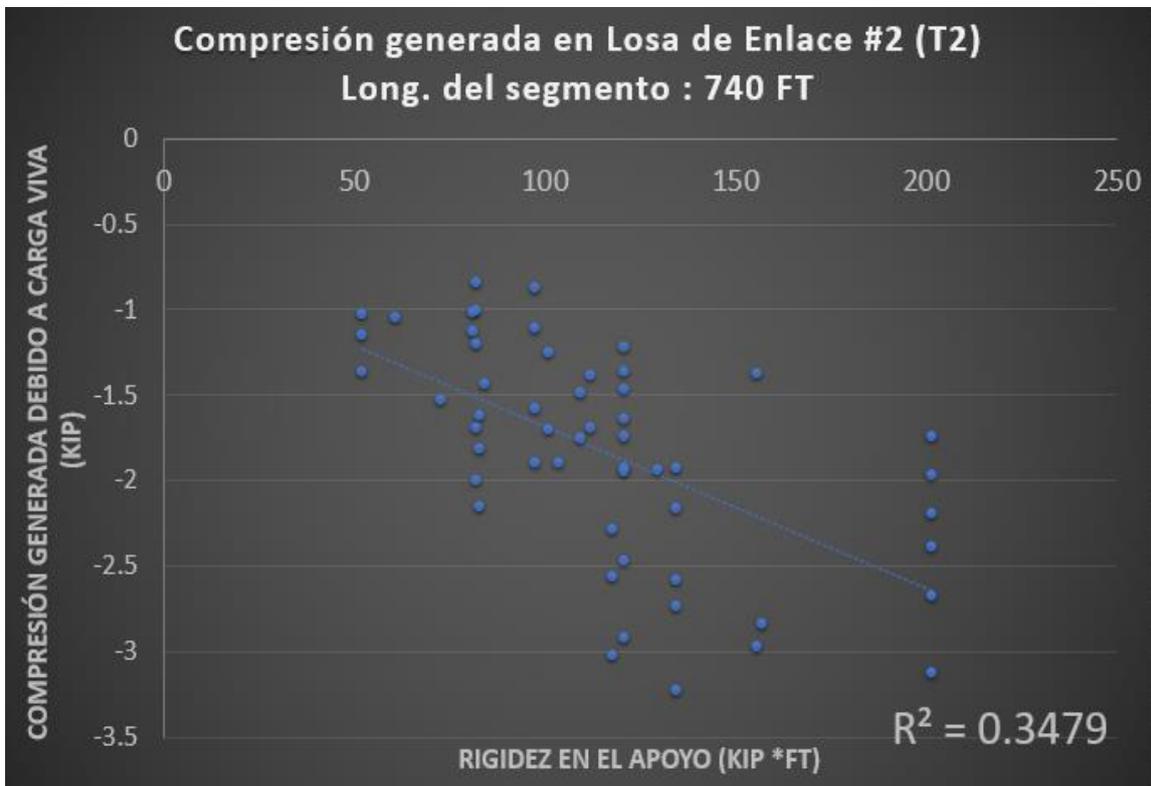


Gráfico 25. Compresión generada en T2, Carga Viva. 740 ft

Fuente: (Propia).

La carga viva se ve afectada de forma diferente ya que la carga no se encuentra presente en todos los tramos a un mismo tiempo, sino que según un análisis de carga móvil, consecuentemente no se encuentra ningún tipo de correlación entre las rigideces de los apoyos y la compresión generada.

En conclusión, basándose en los resultados obtenidos se concluyó que existe una correspondencia directa con la reacción en los apoyos y los esfuerzos en la losa de enlace. Esa correspondencia hace aplicables todas las siguientes observaciones a la relación entre las reacciones en los apoyos y las longitudes de tramos y segmentos.

- La fuerza de tensión/compresión que se generan en la losa de enlace está cercanamente relacionada con la rigidez de los apoyos, bajo la losa de enlace. A medida que el apoyo tenga mayor rigidez, se tendrá una fuerza mayor en la losa de enlace (Gráficos 8 al 13).
- La relación entre rigidez del apoyo y las fuerzas en la losa de enlace se ven en ambas combinaciones de fuerzas (gradiente de temperatura y carga viva), sin embargo es más clara en el gradiente de temperatura debido a que esta carga afecta a todos los tramos de forma equitativa y sincrónica. La carga viva se ve afectada de forma diferente ya que la carga no se encuentra presente en todos los tramos a un mismo tiempo, sino que según un análisis de carga móvil.
- Las longitudes de tramos y segmentos tienen poca relevancia en cuanto al desempeño de losas de enlace se refiere (Gráficos 2-7 y 14-19)

VI. CONCLUSIONES

1. Las losas de enlace han demostrado ser una alternativa viable en cuanto a continuidad de puentes. Según los resultados se ha notado que su comportamiento y desempeño esta cercanamente relacionado con los apoyos y sus rigideces además estas tienen un comportamiento resiliente frente a distintos tipos de interacciones de esfuerzos, longitudes y fuerzas; Por esta razón se ha concluido que son un sistema conveniente en términos estructurales y constructivos.
2. Las principales variables afectantes a las losas de enlace han sido consideradas para la realización del estudio paramétrico las cuales son las cargas tanto vivas y las cargas generadas por los cambios de volumen del concreto debido al gradiente de temperatura. También la influencia de las longitudes de los tramos y segmentos totales con el fin de medir los esfuerzos generados y finalmente el diseño de los apoyos cuya rigidez es de alta relevancia debido a su relación con las fuerzas generadas.
3. Un estudio paramétrico se ha llevado a cabo en donde se han visto reflejadas las consecuencias de cada particular variable en cuanto a deformaciones por temperatura y longitudes involucradas. Se ha determinado que la variable más propensa a tener mayor influencia en la fuerza de tensión en las losas de enlace es la temperatura, especialmente al alterar la rigidez horizontal de los apoyos debido a su correlación con estos.
4. Las variables principales relacionadas con los esfuerzos tensionantes y compresivos que han sido generados en las losas de enlace consecuencia de los cambios de volúmenes y las secciones transversales de las secciones compuestas han sido identificadas y analizadas en el estudio.
5. Se han construido 162 modelos estructurales cuyos resultados se han utilizado para analizar el desempeño de las losas de enlace sometidas a las distintas condiciones que las variables han planteado. Los resultados han demostrado que la presencia de las losas han causado una redistribución de las reacciones basándose en la rigidez de los apoyos, lo que ha demostrado la funcionalidad y conveniencia estructural del sistema si se tiene un correcto diseño de apoyos.

6. Los distintos tipos de apoyos posibles para los casos de continuidad estructurales se han estudiado y expuesto, además se ha realizado el diseño de los apoyos para cada tramo involucrado y así se han obtenido sus módulos de rigidez considerando las distintas variables de exposición. Se ha concluido que las rigideces axial y rotacional de la sección tienen una débil correlación con la fuerza de tensión desarrollada en la losa de enlace, consecuentemente la rigidez de los apoyos ha sido el término con más influencia en términos de desempeño en la losa de enlace.

VII. RECOMENDACIONES

- Considerar vigas AASHTO al momento de diseñar puentes de continuidad parcial para tener un óptimo desempeño de losas de enlace.
- Respetar las distancias de tramos con sus longitudes al momento de realizar el diseño para evitar desperfectos en los cálculos de absorción de fuerza en los apoyos debido a deformaciones y rotación.
- Revisar las dimensiones mínimas de los apoyos en el manual de puentes AASHTO.
- Realizar labores de monitoreo a corto y largo plazo de las losas de enlace para conocer su desempeño y desperfectos, para así mejorar el método en la construcción de futuras estructuras.
- Tomar las líneas de tendencia y mediante una ecuación lineal ser capaz de predecir las reacciones producidas en los cojinetes de apoyo. Este método será aplicable únicamente a las fuerzas de gradiente de temperatura por la conducta lineal de los resultados. En el caso de las fuerzas de carga viva los resultados son dispersos y por ende, no aplicable.

VIII. IMPLEMENTACIÓN

Durante el desarrollo de la presente extensión investigativa se definió la alternativa de losas de enlace propuesta involucra la unión del tramo original apoyado a una losa de concreto que viene siendo una continuación de la cubierta y tramos antecedentes.

Se mencionó que este método tiene alguna ventaja sobre los detalles que proporcionan la continuidad completa, como el fácil proceso de construcción y un pequeño manejo del

hormigón in situ. Las ventajas que brindan las losas de enlace son numerosas; estas incluyen reducción de costos asociados con la construcción y mantenimiento de juntas; eliminación de daño estructural causado por mantenimiento incorrecto, daños de corrosión causado a elementos estructurales debido a fugas de agua a través de la cubierta y reducción en las vibraciones y ruido producido por los vehículos al pasar sobre las juntas, por ende mejorando la experiencia del conductor. Debido a la continuidad de los tramos el momento generado en las vigas es reducido lo que incrementa la capacidad de carga.

Considerando las facilidades que el sistema estructural ofrece; su implementación debe de ser en puentes con múltiples tramos y extensa magnitud idealmente. Esto debido a que las ventajas que se presentan suelen ser a largo plazo y proporcionales a la magnitud estructural del sistema.

IX. TRABAJO FUTURO

El análisis realizado demostró que los apoyos ideales son capaces de sobre estimar el papel de las losas de enlace; además se concluyó que la presencia de las losas causa una redistribución de las reacciones basadas en la rigidez de los apoyos. Es decir que los apoyos juegan un rol fundamental en el desempeño de las losas de enlace, por ende se recomienda realizar una investigación cuyo enfoque directo sean los apoyos y sus distintas tipologías para así evaluar su desempeño considerando las losas de enlace.

Una vez obtenidos los resultados graficados se obtuvo una línea de tendencia. Para un trabajo futuro se recomienda utilizar una ecuación lineal para predecir las reacciones generadas.

Adicionalmente, tomando en cuenta la naturaleza extensiva de la investigación se incita a extender aún más el número de tramos y longitudes totales para obtener un panorama de tendencia de resultados cada vez más preciso.

X. BIBLIOGRAFÍA

- 1) AASHTO. (2012). *AASHTO LFRD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 2012*.
- 2) Amaya Pico, M. S. (2017). *Alternativa de Continuidad en Puentes con Vigas de Concreto Prefabricado*.
- 3) AU, A., & Lam, C. (2011). *Eliminating Deck Joints Using Debonded Link Slabs*.
- 4) Bernal, J. R. (2005). *Hormigón armado: Losas*. Editorial Nobuko.
- 5) Canales, M. T. (2019). *Performance Study of Link Continuity in Prestressed Concrete Bridges*. LSU.
- 6) Caner, A., & Zia, P. (1998). *Behavior and Design of Link Slabs for Jointless Bridge Decks [Investigación]*.
- 7) Chang, L.-M., & Lee, Y.-J. (2002). *Evaluation of Performance of Bridge Deck Expansion Joints*.
- 8) Chebole, V. (2011). *Long Term Continuity Moment Assesment in Prestressed Concrete Girder Bridges*.
- 9) DOTD. (2005). *State of Louisiana Department of Transportation and Development (BRIDGE DESIGN MANUAL): Vol. 1.4*.
- 10) ElSafty, A., & Okeil, A. (2005). *Partial Continuity in Bridge Girders with Jointless Decks*. ASCE.
- 11) Ghimire, S. (2014). *Restraint Moments due to Thermal Gradients in Continuos Prestressed Concrete Girder Bridges*.
- 12) Hossain, T. (2012). *Global and Local Performance of Prestressed Girder Bridges with Positive Moment Continuity Detail*. LSU.

- 13) Kowalsky, M., & Wing, K. (2005). *Behavior, Analysis, and Design of an Instrumented Link Slab Bridge*.
- 14) Matteo. (2015). *Use of Concrete Closure Pours to Eliminate Bridge Deck Expansion*.
- 15) Mothe, R. N. (2006). *Partial continuity in prestressed concrete girder bridges with jointless decks*. LSU.
- 16) Muñoz Díaz, E. E. (2011). *Ingeniería de puentes (Vol. 1)*.
- 17) Muscarella, J., & Yura, J. (1995). *Experimental study of elastomeric bridge bearings with design recommendations*. University of Texas.
- 18) Palacios Otero, M. (2012). *Puentes. Localización y Dimensionamiento*. UNITEC.
- 19) Salgado Zamorano, S. R. (2010). *Estudio de losa sin junta de expansión*. D - Universidad de Chile.
- 20) Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación (6ta ed.)*. McGraw Hill.
- 21) Suarez, L., Chirinos, Y., Lennemar, M., & González, E. (2013). *Puentes de armaduras*. Universidad Experimental Libertador.

XI. ANEXOS

11.1 MODELOS POR TRAMO.

Con el propósito de representar la correlación entre los títulos y los modelos finales obtenidos, se exponen los modelos realizados en el software estructural STAAD, donde es posible apreciar los tramos involucrados en cada modelo. Los modelos seleccionados para fines representativos corresponden a los modelos cuya separación entre vigas es de 6 ft y su temperatura es de 0 grados Fahrenheit.

Se presentan 8 distintos modelos, donde cada uno representa los 8 tramos realizados en la presente extensión investigativa.

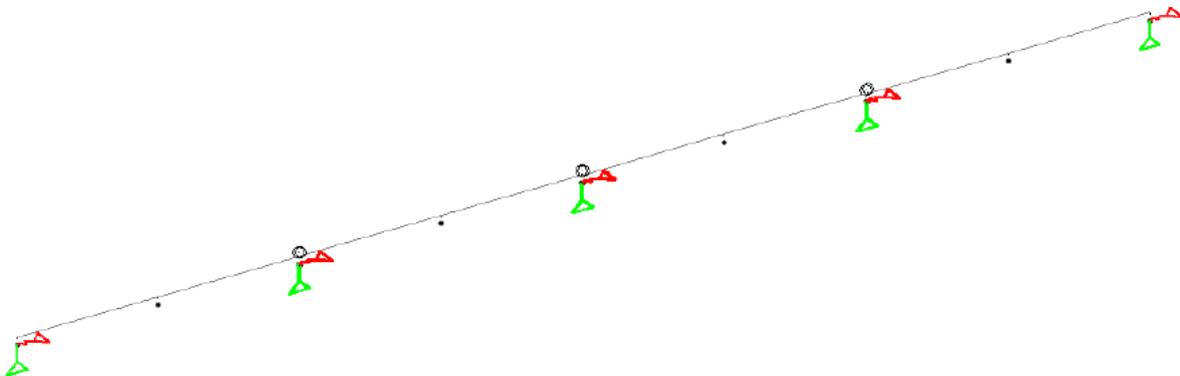
Figura 1. Modelo FL_0_6_19 (3 tramos)



Fuente: (Propia).

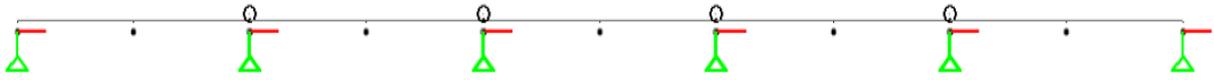
En la figura 1 se logran apreciar los 3 tramos, las vigas y los apoyos involucrados. El título del modelo corresponde a la temperatura (0 grados), la separación (6 ft) y su condición de apoyo flotante (FL). El numero 19 representa el número de modelo en el apartado. El proceso se repitió a lo largo de toda la elaboración de modelos.

Figura 2. Modelo FL_0_6_20 (4 tramos)



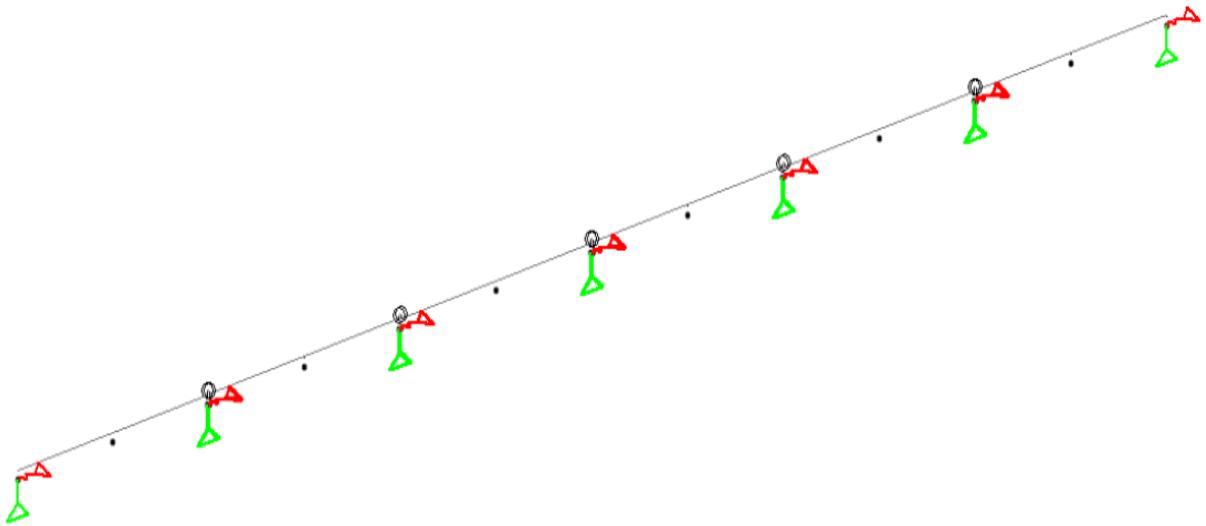
Fuente: (Propia).

Figura 3. Modelo FL_0_6_21 (5 tramos)



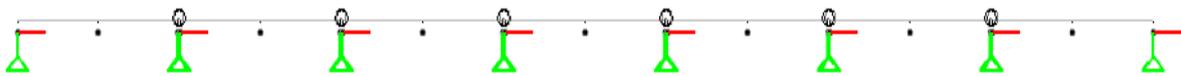
Fuente: (Propia).

Figura 4. Modelo FL_0_6_22 (6 tramos)



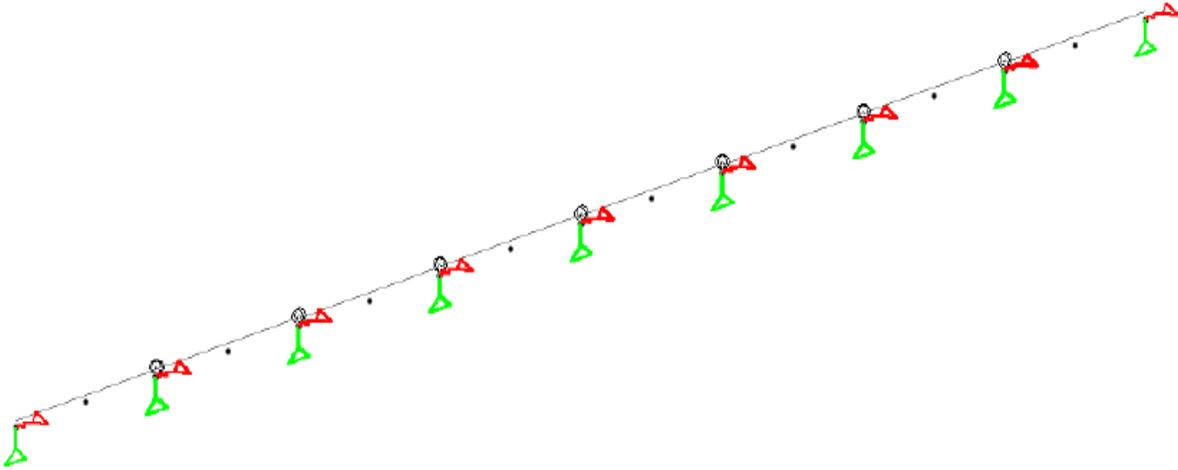
Fuente: (Propia).

Figura 5. Modelo FL_0_6_23 (7 tramos)



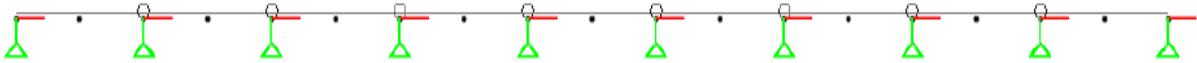
Fuente: (Propia).

Figura 6. Modelo FL_0_6_24 (8 tramos)



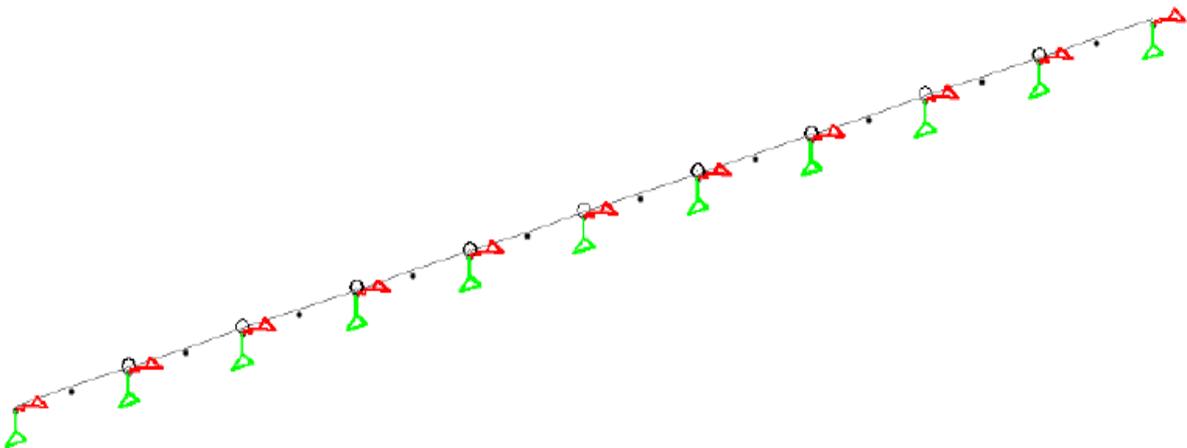
Fuente: (Propia).

Figura 7. Modelo FL_0_6_25 (9 tramos)



Fuente: (Propia).

Figura 8. Modelo FL_0_6_26 (10 tramos)



Fuente: (Propia).

11.2 ASESORAMIENTO Y VALIDACIÓN TÉCNICA.

NOMBRE DEL PROYECTO:

Continuidad Parcial en Puentes mediante Losas de Enlace

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Carlo Paolo Galicia González	11341084
Isaac Eduardo Dubón Mejía	11511060

ASESORAMIENTO	Nº: _____
ASESOR: Dr. Marco Tulio Canales Chávez	
RECOMENDACIONES DEL ASESOR	
1.	Realizar hoja de cálculo que contenga los datos variables de cada modelo.
2.	Hacer uso de los manuales constructivos proporcionados y llevar a cabo las revisiones de los apoyos, como se discutió en las reuniones.
3.	Realizar el dimensionamiento de los apoyos considerando ancho, largo y grosor.
4.	Determinar el módulo de rigidez de los apoyos con los datos obtenidos.
5.	_____
6.	_____
7.	_____
8.	_____
9.	_____
10.	_____
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO
Fecha: <u>9/6/2020</u>	

NOMBRE DEL PROYECTO:

Continuidad Parcial en Puentes mediante Losas de Enlace

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Carlo Paolo Galicia González	11341084
Isaac Eduardo Dubón Mejía	11511060

ASESORAMIENTO	Nº:
ASESOR: Dr. Marco Tulio Canales Chávez	
RECOMENDACIONES DEL ASESOR	
1. <u>Corregir los cálculos mencionados en la reunión.</u>	
2 <u>Realizar hojas de cálculo con los parámetros a considerar en cada modelo según las variantes involucradas.</u>	
3 <u>Determinar los parámetros necesarios para el diseño de cada modelo en una sola hoja que condense los datos anteriores según la especificación.</u>	
4 <u>Considerar los modelos en condición "flotante" únicamente.</u>	
5 <u>Diseñar los modelos estructurales en "STAAD" mediante archivos de entrada elaborados de forma individual para cada modelo según sus propiedades.</u>	
6 _____	
7 _____	
8 _____	
9 _____	
10 _____	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO
Fecha: <u>11/6/2020</u>	

NOMBRE DEL PROYECTO:

Continuidad Parcial en Puentes mediante Losas de Enlace

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Carlo Paolo Galicia González	11341084
Isaac Eduardo Dubón Mejía	11511060

ASESORAMIENTO	Nº:
ASESOR: Dr. Marco Tulio Canales Chávez	
RECOMENDACIONES DEL ASESOR	
1.	Elaborar hojas de extracción según las indicaciones dadas en "Excel" con el fin de optimizar el tiempo.
2.	Extraer manualmente los resultados de cargas y reacciones para gradientes de temperatura y cargas vivas en cada modelo.
3.	Ingresar los resultados de cada modelo en hoja de cálculo y posteriormente graficarlos.
4.	Incluir gráficos y conclusiones sobre los resultados discutidos en la reunión en el informe final.
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO
Fecha: <u>22/6/2020</u>	