

Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

Valoración de la efectividad de los diafragmas intermedios para soportar  
fuerzas sísmicas en puentes con superestructuras de concreto

Trabajo de Graduación

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Sofía Quirós Ivankovich

Director del Proyecto de Graduación:

Ing. Carlos Fernández Chaves M.Sc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

Octubre, 2020



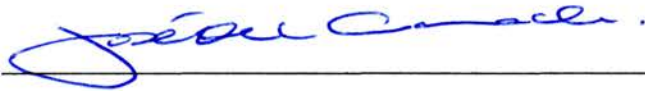
**Comité asesor**



---

Ing. Carlos Fernández Chaves, M.Sc.

Director Trabajo de Graduación



---

Ing. José Manuel Camacho Castro, M.Sc.

Asesor



---

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.

Asesor



Sofía Quirós Ivankovich

Estudiante

## Derechos de autor

La suscrita, Sofía Quirós Ivankovich, cédula 3-0497-0630, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B55638 manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación Valoración de la efectividad de los diafragmas intermedios para soportar fuerzas sísmicas en puentes con superestructuras de concreto, bajo la dirección del M.Sc. Carlos Fernández Chaves, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: **Según la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7, “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.**

## Dedicatoria

A la Virgen de los Ángeles.

## Agradecimientos

A Dios que es infinitamente bueno.

A mis papás, cuya guía, compañía, amor y apoyo se ven plasmados en este trabajo.

A mis hermanos, por inspirarme, motivarme y acompañarme.

A Pablo, por apoyarme incondicionalmente e impulsarme a ser la mejor versión de mí misma.

Al Ing. Carlos Fernández Chaves, por ser una inspiración en el ámbito profesional y por los conocimientos transmitidos como profesor y director de tesis.

Al Ing. José Manuel Camacho Castro, por su guía, enseñanzas y apoyo.

Al Ing. Alejandro Navas Carro, por su tiempo, dedicación y motivación.

A los amigos que me deja esta carrera, los cuales hicieron mi época universitaria hermosa y fructífera.

Y a todas las personas que han influenciado mi vida de una manera positiva y me ayudaron a alcanzar esta meta.

## Resumen

Quirós Ivankovich, Sofia

Valoración de la efectividad de los diafragmas intermedios para soportar fuerzas sísmicas en puentes con superestructuras de concreto.

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil- San José, C.R.:

S. Quirós I., 2020

vi, 81, [10]h; ils. col. – 36 refs.

Esta investigación pretende evaluar la influencia que tiene la presencia de diafragmas intermedios en la respuesta sísmica de puentes de vigas de concreto restringidos transversalmente en los apoyos. Los puentes de interés para este estudio varían su longitud en un rango de 15 m a 50 m y tienen una configuración geométrica de dos carriles y cinco vigas tipo I. Además, se hace referencia a los criterios actuales (tanto a nivel nacional como internacional) sobre el uso de diafragmas intermedios.

El desarrollo del estudio se lleva a cabo mediante modelaje estructural basado en el método pseudo dinámico o el método modal espectral. Para obtener una simulación del comportamiento de los puentes de interés ante cargas sísmicas se utilizará el software SAP 2000.

En la búsqueda de alcanzar los objetivos específicos definidos, se demuestra que los diafragmas intermedios contribuyen a la rigidez transversal, sin embargo, se descubre como inconveniente, que al usar diafragmas de concreto los desplazamientos transversales de la estructura incrementan debido a que la masa propia de los diafragmas es importante y genera un aumento en las fuerzas sísmicas.

Desde el punto de vista de disminución de esfuerzos en la conexión entre la losa y las vigas longitudinales se evidencia que los diafragmas intermedios contribuyen enormemente a esto, pues, cambian el esquema en el que se distribuyen los esfuerzos localmente. Finalmente, se concluye que la configuración más efectiva es la de colocar solamente un diafragma intermedio al centro del claro. S.Q.I.

Palabras claves: PUENTES DE CONCRETO CON DIAFRAGMAS INTERMEDIOS, RESPUESTA SÍSMICA, ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL.

Ing. Carlos Fernández Chaves, M.Sc.  
Escuela de Ingeniería Civil

## Abstract

Quirós Ivankovich, Sofía

Evaluation of the effectiveness of intermediate diaphragms to withstand seismic forces in bridges with concrete superstructures.

Graduation Project – Civil Engineering- San José, C.R.:

S. Quirós I., 2020

vii, 81, [8]h; ils. col. – 36 refs.

This research aims to evaluate the influence of the presence of intermediate diaphragms on the seismic response of concrete girder bridges restrained transversely in the supports. The bridges of interest for this study vary in length in a range of 15 m to 50 m and have a geometric configuration of two lanes and five type I beams. In addition, reference is made to current criteria (both nationally and internationally) on the use of intermediate diaphragms.

The development of the study is carried out using structural modeling based on the pseudo-dynamic method or the response spectrum method. To obtain a simulation of the behavior of the bridges of interest under seismic loads, the SAP 2000 software will be used.

In order to achieve the specific objectives herein defined, it is shown that the intermediate diaphragms contribute to the transverse stiffness, however, it is discovered as a drawback that when using concrete diaphragms, the transverse displacements of the structure increase due to the self-mass of diaphragms, which is important and generates an accretion in seismic forces.

From the point of view of stress reduction in the connection between the slab and the longitudinal beams, it is evident that the intermediate diaphragms contribute enormously to this, since they change the scheme in which the forces are locally distributed. Finally, it is concluded that the most effective configuration is to place only an intermediate diaphragm in the center of the span. S.Q.I.

Keywords: CONCRETE BRIDGES WITH INTERMEDIATE DIAPHRAGMS, SEISMIC RESPONSE, RESPONSE SPECTRUM ANALYSIS.

Ing. Carlos Fernández Chaves, M.Sc.  
Project director  
Escuela de Ingeniería Civil



## Tabla de Contenido

Capítulo I.	Introducción	1
1.1	Justificación	1
1.1.1	Problema Específico	1
1.1.2	Importancia	2
1.1.3	Antecedentes	2
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo General	4
1.2.2	Objetivos Específicos	4
1.3	Delimitación del Problema	4
1.3.1	Alcance	4
1.3.2	Limitaciones	5
Capítulo II.	Marco teórico	6
2.1	Aspectos generales	6
2.2	Puentes tipo viga	7
2.3	Vigas diafragma	9
2.4	Criterios actuales sobre el uso de diafragmas intermedios	10
2.5	Fuerzas sísmicas	12
2.6	Respuesta dinámica de la estructura	14
2.7	Análisis mediante el método modal espectral	16
2.8	Modelación por método de elementos finitos	17
2.9	Diseño sísmico de puentes: diseño basado en fuerzas	20
2.10	Eficacia, eficiencia y efectividad	22
Capítulo III.	Características de los puentes a modelar	24
3.1	Propiedades de los elementos	25

3.1.1	Materiales de los elementos	25
3.1.2	Parámetros geométricos	25
3.2	Demanda sísmica	27
3.2.1	Clasificación operacional	27
3.2.2	Espectro de diseño	28
3.2.3	Factores de modificación de la respuesta	29
3.2.4	Casos de carga sísmica	29
3.2.5	Distribución de la Carga sísmica lateral	30
3.3	Combinaciones de carga	30
Capítulo IV. Modelaje estructural en SAP 2000		32
4.1	Descripción de los modelos	32
4.1.1	Uniones	33
4.1.2	Apoyos	33
4.2	Discretización por el método de elemento finito	34
4.3	Lectura de fuerzas y esfuerzos internos	35
Capítulo V. Análisis de resultados		38
5.1	Aspectos Generales	38
5.2	Análisis pseudo dinámico o análisis modal espectral	38
5.3	Respuestas sísmicas debidas al sismo en Y	41
5.3.1	Desplazamientos máximos de la losa	41
5.3.2	Deformación relativa entre las partes superior e inferior de la superestructura	45
5.3.3	Demandas en la conexión entre la losa y las vigas principales	49
5.3.4	Cortantes en las conexiones entre vigas diafragma y vigas principales	58
5.3.5	Eficacia de las distintas configuraciones de diafragmas intermedios	66
Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones		71
6.1	Conclusiones	71

6.1.1	Desplazamientos en la dirección Y	71
6.1.2	Esfuerzos en la conexión entre la losa y las vigas principales	72
6.1.3	Cortante en las conexiones entre vigas diafragma y vigas principales	73
6.1.4	Efectividad de colocar diafragmas intermedios	74
6.2	Recomendaciones	76
	Bibliografía	78

## Tabla de Figuras

Figura 1. Partes principales de un puente tipo viga.....	6
Figura 2. Puente de vigas simplemente apoyadas.....	7
Figura 3. Puentes de vigas Gerber .....	7
Figura 4. Puente de vigas continuas.....	8
Figura 5. Diagrama de losa de un puente tipo viga.....	8
Figura 6. Tipos de vigas .....	8
Figura 7. Sección transversal del tablero de vigas.....	9
Figura 8. Sección longitudinal del tablero de vigas.....	10
Figura 9. Niveles de modelado para análisis sísmico de puentes .....	18
Figura 10. Análisis de la deformación de un puente por el método de elementos finitos .	20
Figura 11. Sección transversal de las vigas principales .....	26
Figura 12. Sección transversal de la superestructura a considerar en todos los modelos.	27
Figura 13. Procedimiento de determinación del espectro de diseño .....	28
Figura 14. Espectro de diseño resultante, suelo S3 y zona de amenaza sísmica III .....	29
Figura 15. Vista global del modelo L30-1 con la discretización de elementos finitos.....	34
Figura 16. Corte transversal en la zona del diafragma intermedio en el puente L30-1 ....	35
Figura 17. Componentes de los esfuerzos en el sistema de coordenadas locales del material .....	36
Figura 18. Esfuerzos y fuerzas internas resultantes en elementos tipo Área .....	37
Figura 19. Modo de oscilación 1 en el puente L40-1 .....	40
Figura 20. Modo de oscilación 5 en el puente L40-1 .....	40
Figura 21. Modo de oscilación 7 en el puente L40-0 .....	41
Figura 22. Ubicación del desplazamiento máximo de la losa en dirección Y .....	42
Figura 23. Ubicaciones en la que se midió la deformación relativa entre la parte superior e inferior de la superestructura .....	46
<b>Figura 24. Comparativa entre el porcentaje de disminución de <math>U_y</math> a nivel de losa y <math>\Delta U_y</math> al implementar un diafragma intermedio central y la razón de rigidez que presenta cada puente.....</b>	<b>48</b>
Figura 25. Franjas de conexión entre losa y vigas longitudinales.....	50
Figura 26. Acercamiento a una franja de conexión entre losa y vigas .....	50
Figura 27. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 50 m .....	51

Figura 28. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 35 m .....	52
Figura 29. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 15 m .....	52
Figura 30. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 50 m.....	53
Figura 31. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 35 m.....	53
Figura 32. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 15 m.....	54
Figura 33. Esfuerzo axial máximo en la conexión losa-viga registrado en el centro del claro .....	57
Figura 34. Esfuerzo cortante máximo en la conexión losa-viga registrado en el centro del claro.....	57
Figura 35. Zonas de conexión entre vigas longitudinales y viga diafragma .....	58
Figura 36. Cortante (Kgf/cm) entre vigas longitudinales y viga diafragma al colocar un diafragma .....	60
Figura 37. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma al colocar un diafragma .....	60
Figura 38. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma al colocar dos diafragmas.....	61
Figura 39. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma al colocar tres diafragmas.....	62
Figura 40. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma para puentes de 50 m .....	63
Figura 41. Variación del cortante entre vigas exteriores y vigas centrales de la sección transversal .....	64
Figura 42. Ubicación del cortante de diseño a considerar para los elementos transversales .....	65
Figura 43. Relación del factor k respecto al cambio de longitud del puente .....	66
Figura 44. Eficacia en el ámbito de desplazamientos.....	68
Figura 45. Eficacia respecto a los esfuerzos axiales .....	69
Figura 46. Eficacia respecto a los esfuerzos cortantes.....	69
Figura 47. Marco equivalente del comportamiento de la losa y dos vigas .....	76

## Tabla de Cuadros

Cuadro 1. Materiales y sus propiedades para cada elemento estructural .....	25
Cuadro 2. Características estructurales de los distintos puentes a modelar .....	26
Cuadro 3. Resumen de los modos más significativos para cada caso y su respectivo aporte de porcentaje de masa participativa.....	39
Cuadro 4. Desplazamientos máximos laterales a nivel de losa.....	43
Cuadro 5. Desplazamientos máximos laterales a nivel de losa considerando los diafragmas intermedios Sin Masa .....	44
Cuadro 6. Deformación transversal relativa máxima considerando los diafragmas intermedios Con Masa .....	46
Cuadro 7. Deformación transversal relativa máxima considerando los diafragmas intermedios Sin Masa .....	47
Cuadro 8. Porcentaje de reducción de los esfuerzos internos al colocar un diafragma intermedio .....	55
Cuadro 9. Porcentaje de reducción de los esfuerzos internos al colocar dos diafragmas intermedios.....	55
Cuadro 10. Porcentaje de reducción de los esfuerzos internos a L/4 de los apoyos al colocar tres diafragmas intermedios.....	56
Cuadro 11. Porcentaje de reducción de los esfuerzos internos a L/2 de los apoyos al colocar tres diafragmas intermedios.....	56

## Glosario

L = longitud del vano (m)

DI = diafragmas intermedios

LX-0 = puente de longitud de X metros con ningún diafragma intermedio

LX-1 = puente de longitud de X metros con un diafragma intermedio

LX-2 = puente de longitud de X metros con dos diafragmas intermedios

LX-3 = puente de longitud de X metros con tres diafragmas intermedios

S22 = esfuerzo axial en la conexión entre la losa y las vigas principales ( $\text{kg/cm}^2$ )

S23 = esfuerzo cortante en la conexión entre la losa y las vigas principales ( $\text{kg/cm}^2$ )

# Capítulo I. Introducción

---

## 1.1 *Justificación*

### 1.1.1 *Problema Específico*

La red de infraestructura vial es de suma importancia para la economía de un país y los puentes son un elemento esencial dentro de la misma. Estos controlan la capacidad del sistema de transporte, pues restringen el volumen y las cargas que pueden transitar por este. Además, el puente representa el mayor costo por unidad lineal del sistema. (LanammeUCR, 2019). En Costa Rica, para el año 2016 se registra un total de 1395 puentes en la Red Vial Nacional.

El territorio nacional se ubica en una zona de subducción de placas donde interactúan tres grandes placas tectónicas: Coco, Caribe y Nazca, lo que provoca que los sismos sean muy frecuentes (Red Sismológica Nacional, 2019). Dado este contexto de actividad sísmica, surge la importancia del diseño sismorresistente de estructuras.

El documento Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (2013), que es una versión preliminar y reducida de lo que será el Código Sísmico de Puentes en Costa Rica, establece los requisitos mínimos para asegurar el comportamiento sismorresistente de los puentes que se construyan en Costa Rica. Este emplea la metodología del diseño por factores de carga y resistencia (LRFD por sus siglas en inglés) y estipula que, para el diseño de puentes vehiculares nuevos, **se deben satisfacer los requisitos incluidos en "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Sixth Edition" y en "AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, Second Edition"**.

La viga diafragma es un elemento del puente que aporta conectividad entre las vigas principales de la superestructura y hace posible que estas funcionen como conjunto, por lo tanto, estas proveen resistencia a la aplicación de cargas transversales y excéntricas. Estas vigas se incluyen en los extremos de todos los puentes, sin embargo, en el tramo intermedio su incorporación queda a criterio del diseñador, llegando en algunos casos, a suprimir su uso por razones meramente económicas.

A partir de estos aspectos es que surge la necesidad de comparar el comportamiento sísmico que presentan los puentes cuyo diseño incorpora diafragmas intermedios contra los que no cuentan con dichos elementos.



### *1.1.2 Importancia*

Según lo establecido por AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 8th Edition, todo diseño estructural de un puente debe incluir vigas diafragma en sus extremos. Sin embargo, se permite obviar la inclusión de vigas diafragmas intermedias si se demuestra un adecuado comportamiento de los elementos principales sin estas.

Por otro lado, los Nuevos Criterios Sísmicos para el Diseño de Puentes en Chile definen la obligatoriedad de incluir vigas diafragma extremas y central, independientemente de la zona sísmica en la que se encuentre el puente.

A nivel nacional, los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes no hacen referencia a la inclusión o diseño de estos elementos. En general, las normativas actuales referentes al uso de diafragmas intermedios son poco técnicas y no indican una metodología clara para llegar a justificar su uso. A partir de esta situación, surge la importancia de la presente investigación con la cual se desea determinar qué esquemas estructurales y qué vinculaciones entre tablero de vigas y superestructura presentan mejor desempeño sísmico.

Los análisis estructural y sísmico se efectuarán mediante un programa de cómputo de modelaje de elemento finito, utilizando para todos los casos una sección típica de los puentes en Costa Rica, lo que es representativo de la práctica constructiva nacional. Con estos análisis se pretende obtener una serie de conclusiones relevantes a la realidad nacional que permitan mejorar el diseño y la construcción de puentes, de forma que sean capaces de resistir sismos de gran magnitud.

De esta manera, al ser Costa Rica un país sísmico, la contribución de esta investigación es un aporte significativo en esta área. Además, sirve de referencia para futuras investigaciones en el diseño y construcción de puentes en el país.

### *1.1.3 Antecedentes*

La revisión de literatura asociada a los diafragmas intermedios reveló que existe poca información publicada en lo que respecta a su respuesta sísmica y, en general, su desempeño ante cargas laterales. La mayoría de los estudios encontrados plantean, únicamente, un análisis con cargas gravitacionales, los trabajos de este tipo, más relevantes para esta investigación se exponen seguidamente.

- (Muñoz, J.R., 2010). En esta investigación se utiliza el método de elementos finitos para analizar tableros de puentes vehiculares con vigas de concreto presforzado y

poder determinar qué tanto influyen los diafragmas intermedios en la rigidez transversal de la superestructura y en la repartición de los esfuerzos a flexión en las distintas vigas. Para esto, el autor realiza tanto un análisis lineal como uno no lineal; del primero concluye que, en lo referente a la repartición de esfuerzos por flexión en las vigas principales, no son necesarios diafragmas intermedios para puentes que no estén en curva. Del segundo análisis, el autor concluye que ante cargas últimas los diafragmas intermedios sí son requeridos. Sin embargo, en este estudio se consideran únicamente cargas gravitacionales.

- (Cartes, R., 2010). Esta tesis define el espaciamiento que debe existir entre los diafragmas de puentes mixtos para impedir la distorsión o deformación transversal producida por cargas excéntricas. Para este estudio se utilizaron los siguientes métodos de análisis: método de Riks, imperfecciones geométricas equivalentes y el cálculo de segundo orden (Buckling) y se desarrollaron en un programa aplicando elementos finitos. Se concluye que la colocación de diafragmas en las líneas de apoyo, es decir en ambos bastiones y en la pila del puente analizado, es la disposición adecuada, ya que esta cumple con las verificaciones que exige la norma española **“Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras”** (RPX-95) y, por lo tanto, garantiza el óptimo comportamiento estructural de la obra estudiada, a saber, el paso a nivel Tenerife. Sin embargo, dicha norma estipula que el espaciamiento mínimo entre diafragmas para el puente analizado es de  $L_D \leq 2,76 m$ , lo cual implicaría un diseño con más de 10 diafragmas, por lo tanto, se demuestra que la norma RPX95 es sumamente conservadora respecto a esta especificación. Es importante resaltar que en esta investigación no se consideran cargas sísmicas.

A continuación, se expone la referencia revisada cuyas conclusiones hacen referencia al comportamiento sísmico de los tableros de puentes.

- (González, L., 2016). Este estudio examina el comportamiento sísmico de los tableros de puentes construidos mediante vigas doble T prefabricadas y losa de compresión in situ, a partir de inspecciones realizadas en Chile, meses después del terremoto de 27 de febrero de 2010. En las conclusiones se señala como problema principal una deficiente ingeniería de detalle en los elementos de retención transversal y longitudinal; ya que estos estuvieron relacionados en todos los casos de colapsos de tableros analizados. Por otra parte, respecto a los diafragmas o

travesaños intermedios se concluye que, su presencia no es necesaria para el funcionamiento monolítico del conjunto de vigas y losa. Sin embargo, los Nuevos Criterios Sísmicos para el Diseño de Puentes en Chile estipulan que se deben incluir vigas diafragma extremas y central, independientemente de la zona sísmica en la que se encuentre el puente.

## *1.2 Objetivos*

### *1.2.1 Objetivo General*

Evaluar la influencia que tiene la presencia de diafragmas intermedios en la respuesta sísmica de puentes de vigas de concreto, restringidos transversalmente en los apoyos, de longitud variable en un rango de 15 m a 50 m y con solo una configuración geométrica de dos carriles y cinco vigas, mediante modelaje estructural basado en el método pseudo dinámico.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

- Establecer la participación de los diafragmas intermedios en la rigidez transversal del puente según la variación de su longitud.
- Estimar las demandas en la conexión entre la losa y las vigas cuando se cuenta o no con diafragmas intermedios.
- Estimar la deformación relativa que se presenta entre la parte superior e inferior de la superestructura y su variación según la posición respecto a los apoyos, tanto para puentes con diafragmas intermedios como sin estos.
- Contrastar la efectividad de colocar un diafragma central contra considerar dos diafragmas posicionados a un tercio de cada extremo del puente.
- Determinar los cortantes que se presentan en las conexiones entre diafragmas y vigas principales.

## *1.3 Delimitación del Problema*

### *1.3.1 Alcance*

El alcance de este proyecto lo delimitan los siguientes aspectos:

- Se compararán los resultados obtenidos al modelar por el método pseudo dinámico, utilizando análisis de elemento finito, puentes con diafragmas intermedios, los cuales diferirán en longitud, en altura de vigas y en la posición de los diafragmas

(uno a la mitad o dos, a un tercio de los extremos), contra los resultados al analizar puentes sin estos elementos.

- Los resultados del análisis sísmico corresponderán a desplazamientos de la estructura, fuerzas internas y deformación relativa entre la parte superior de la superestructura y la parte inferior de las vigas, los cuales permitirán determinar la influencia de los diafragmas intermedios. Además, se obtendrá el cortante presente en las conexiones entre diafragmas y vigas principales para poder dar recomendaciones respecto al diseño de estas.
- Los puentes por modelar son de vigas de concreto, restringidos transversalmente en los apoyos, con solo una configuración geométrica, la cual considera dos carriles y 5 vigas en la superestructura, por otro lado, la longitud se variará en un rango de 15 m a 50 m.
- Se consideran vigas con secciones transversales típicas de puentes de concreto, simplificadas desde el punto de vista de análisis.

### *1.3.2 Limitaciones*

A continuación, se presentan algunas limitaciones y problemas que podrían surgir durante el desarrollo del proyecto:

- Se utilizará un modelo por el método pseudo dinámico para el análisis sísmico de los puentes. El mismo se desarrollará con un análisis modal espectral.
- No se considera la aceleración vertical por sismo.
- La carga de viento no se toma en cuenta para este estudio.
- Se excluye la inclusión de los efectos debido a cambios de temperatura.
- Solo se consideran puentes de concreto.
- No se considera el proceso constructivo en el modelaje de los puentes

2.1 Aspectos generales

En un puente se identifican tres partes principales: la superestructura, la subestructura y la cimentación o fundación. Los elementos estructurales que se diseñan para soportar directamente las cargas que se aplican al puente, componen la superestructura. Por otro lado, la subestructura está conformada por los bastiones y las pilas, quienes tienen la función de soportar la superestructura. A su vez, los bastiones y las pilas transmiten sus cargas a la cimentación y esta las transfiere al suelo soportante. En la Figura 1 se aprecia un diagrama en el cual se señalan las partes principales de un puente tipo viga.

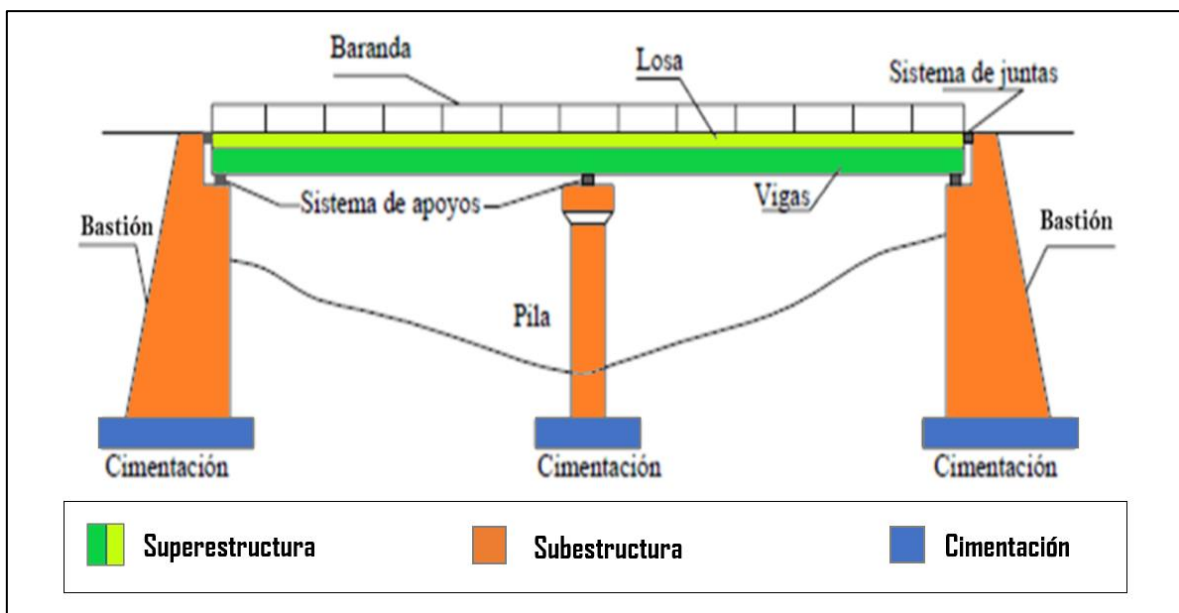


Figura 1. Partes principales de un puente tipo viga

Fuente: Seminario, 2004

Modificado por: Quirós, 2020

El tablero es el conjunto de elementos que conforma la superficie sobre la cual circulan los vehículos, el mismo puede estar formado estructuralmente por una losa, por un conjunto de vigas o por la combinación de ambas, siendo la losa el elemento estructural principal en el primero y las vigas en los dos últimos. Además de estos tres casos señalados, el tablero puede estar soportado estructuralmente por otros elementos principales tales como: arcos, cerchas, pórticos y cables en los puentes colgantes (Bellido, 2002).

Dentro de la composición del tablero destacan la losa, las vigas y los diafragmas. La losa es la parte superior del tablero sobre la que se ubica el pavimento, la misma es la encargada

de transmitir las solicitaciones a las vigas o directamente a los cabezales, si el puente no posee vigas (Bellido, 2002).

## 2.2 Puentes tipo viga

Según Ernesto Seminario (2004), los puentes tipo viga son el sistema estructural más utilizado. Estos se pueden dividir en:

- Puentes de tramos simplemente apoyados: Tienen una o varias luces simplemente apoyadas. Pueden ser de losa maciza o de losas y vigas. Su desventaja se encuentra en el mayor número de juntas y dispositivos de apoyo. En la Figura 2 se visualiza un diagrama de este tipo de puente.

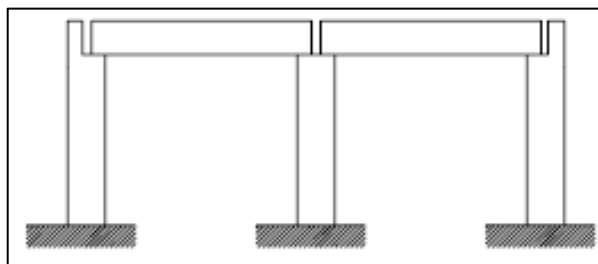


Figura 2. Puente de vigas simplemente apoyadas

Fuente: Seminario, 2004

- Puentes isostáticos con voladizos (Gerber) o de tramo central colgado: Contiene vigas Gerber de apoyo interno o externo, como se aprecia en la Figura 3. Tiene las mismas ventajas y desventajas de las vigas simplemente apoyadas. Por lo general, este tipo de puentes no son adecuados para zonas sísmicas.

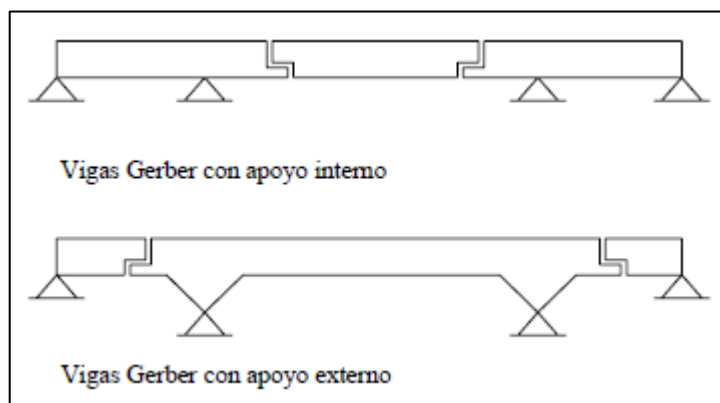


Figura 3. Puentes de vigas Gerber

Fuente: Seminario, 2004

- Puentes de vigas continuas: Este tipo de puentes constituyen estructuralmente la solución más eficiente. En la Figura 4 se muestra un diagrama de dicha configuración.

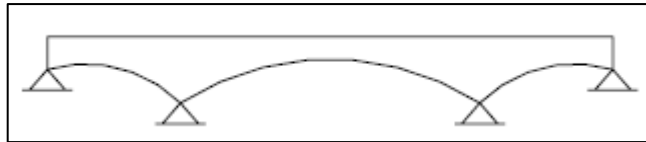


Figura 4. Puente de vigas continuas

Fuente: Seminario, 2004

Los principales elementos que conforman los puentes tipo viga se aprecian en la Figura 4 los cuales son: losa, vigas, bastiones y pilas, cimentaciones, sistemas de apoyos y juntas, y obras complementarias (barandas, separadores, drenaje, etc.).

- Losa: La losa es el elemento estructural que sirve para soportar el tránsito vehicular y peatonal, para luego transmitir sus cargas al sistema de vigas. Su función queda más clara al observar la Figura 5. Cabe resaltar que, la losa puede ser maciza o rígida y actuar como diafragma, arriostrando la cabeza superior de las vigas y reduciendo al mínimo la posible deformación del ala inferior en flexión lateral.

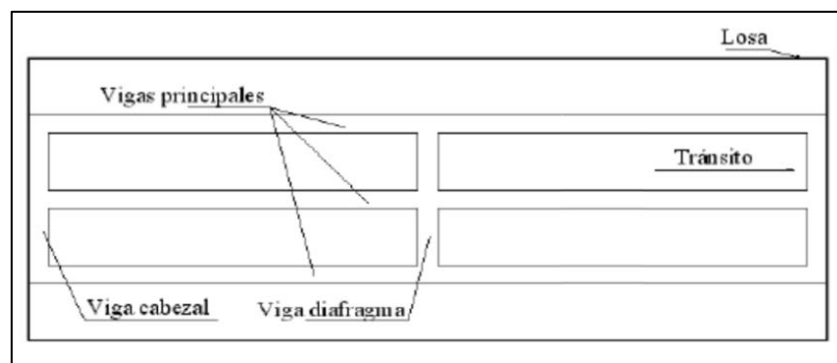


Figura 5. Diagrama de losa de un puente tipo viga

Fuente: Seminario, 2004

- Vigas: Las vigas constituyen el elemento estructural que soporta la losa. En la actualidad, existen muchos tipos de vigas.

Según la forma de su sección transversal, como se muestra en la Figura 6, las vigas pueden ser rectangulares, tipo tee, tipo I, cajón, etc. Según su material las vigas más comunes pueden ser de madera, concreto o acero. A su vez, las vigas de concreto pueden ser armadas, pretensadas o postensadas.

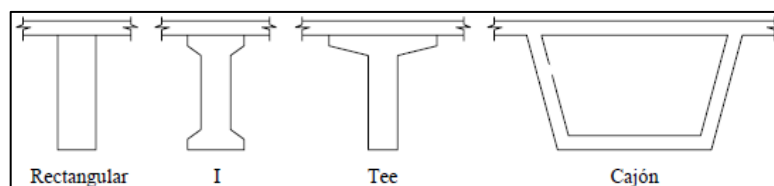


Figura 6. Tipos de vigas

Fuente: Seminario, 2004

### 2.3 Vigas diafragma

Las vigas diafragmas, vigas transversales o travesaños son elementos estructurales que se disponen en los tableros de puentes para conectar las vigas longitudinales entre sí; permitiendo que funcionen como un conjunto. Además, los diafragmas contribuyen a incrementar la rigidez transversal de la sección, con lo que proveen la resistencia necesaria ante las fuerzas laterales y excéntricas que actúan sobre la superestructura. Por otro lado, los diafragmas aseguran que la geometría de las secciones transversales se mantenga inalterada y sus desplazamientos controlados (Cartes, 2010).

En la Figura 7 se muestra un corte transversal de una superestructura tipo tablero de vigas, la cual incluye vigas diafragma. Al observar la Figura 8 se aprecia la sección longitudinal de esta misma superestructura; en esta destacan tres vigas diafragma intermedias y dos extremas.

Los diafragmas son considerados como elementos simplemente apoyados, que sirven como rigidizadores entre vigas, y que a su vez transmiten fuerzas a las vigas longitudinales a través del cortante vertical, el cual es transmitido por el apoyo directo de la losa sobre la viga y por medio de varillas de acero que traspasan la viga longitudinal. (Gudiño & Ayala, 2012)

Los diafragmas extremos o de apoyo desempeñan similares funciones que los diafragmas intermedios, pero se diferencian en que estos deben transmitir, adicionalmente, las reacciones de apoyo. Lo que provoca que actúen como un elemento de transición entre los apoyos y el resto de la superestructura (Cartes, 2010).

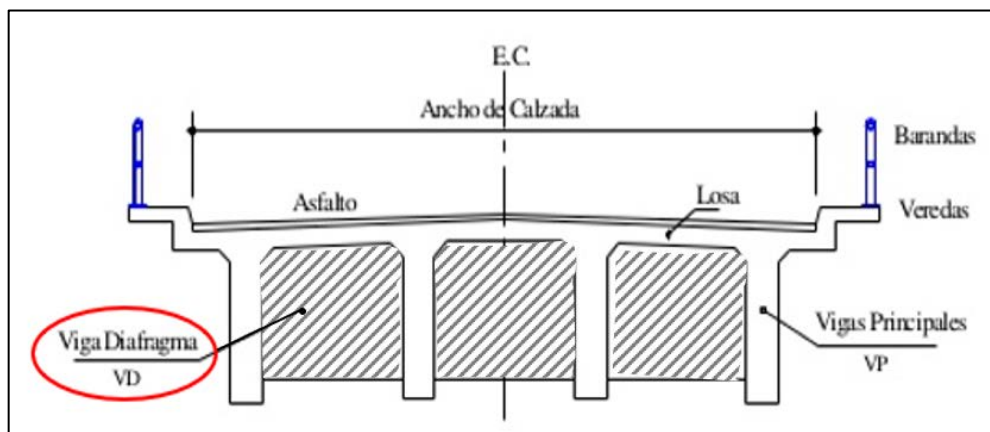


Figura 7. Sección transversal del tablero de vigas

Fuente: Carrera, 2013



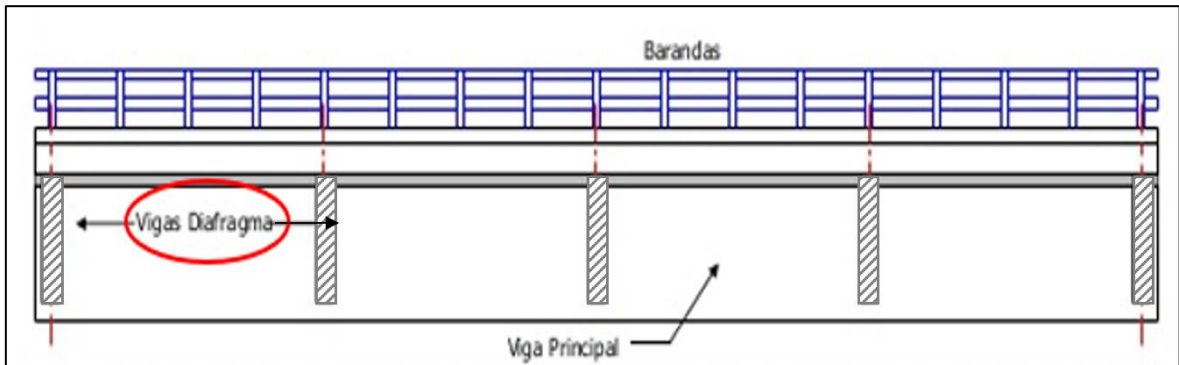


Figura 8. Sección longitudinal del tablero de vigas

Fuente: Carrera, 2013

#### 2.4 Criterios actuales sobre el uso de diafragmas intermedios

En Costa Rica, no existe ninguna normativa nacional que esclarezca en qué casos y en qué localizaciones del puente es necesario incluir diafragmas intermedios. En los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (2013) no se hace referencia a estos elementos, sin embargo, este documento indica que el diseño y la rehabilitación sismorresistente de puentes en Costa Rica deben satisfacer los requisitos incluidos en AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Sixth Edition, 2012 y AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, Second Edition, 2011.

Según lo establecido en AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, 2011, todo diseño estructural de un puente sometido a cargas sísmicas debe incluir vigas diafragma dúctiles en sus extremos, no obstante, en lo que respecta a los diafragmas intermedios, únicamente se mencionan consideraciones en la Sección 7 de Componentes Estructurales de Acero y no así en la sección 8 de Componentes de Concreto Reforzado, que es la de interés para este trabajo. A pesar de esto, se cita como referencia, la parte de la Sección 7 en la que se refieren a estos elementos: "Los diafragmas, marcos transversales, arriostramientos laterales, apoyos y elementos de la subestructura son parte del sistema sismo resistente del puente en el que las cargas laterales y el desempeño de cada elemento se ven afectados por las características de resistencia y rigidez de los otros elementos. Terremotos pasados han demostrado que cuando uno de estos elementos responde de manera dúctil o permite algún movimiento, el daño es limitado. (...) Es necesaria una trayectoria de carga continua para la transmisión de las fuerzas de inercia de la superestructura a la subestructura. Las losas de concreto tienen una rigidez significativa en su plano horizontal, y en tramos cortos a medianos de puentes tipo viga, su respuesta se

aproxima al movimiento de un cuerpo rígido. Por lo tanto, la carga lateral de los diafragmas intermedios es mínima, y consiste principalmente en las fuerzas de inercia tributarias locales de las vigas.” (p. 7-2)

En el documento AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Eighth Edition, 2017 se menciona en la sección 6.7.4.1 que los diafragmas o marcos transversales se podrán colocar al final de la estructura, sobre los apoyos interiores y de manera intermitente a lo largo del tramo. Sin embargo, la necesidad de utilizar diafragmas o marcos transversales se deberá investigar para todas las etapas correspondientes a los procedimientos constructivos supuestos y también para la condición final. En la sección 4.6.2.8. de esta norma se establece que estos elementos forman parte del sistema sismorresistente del puente de manera que las cargas laterales aplicadas a la losa se distribuirán a través de los diafragmas intermedios y los marcos transversales hasta el arriostramiento lateral inferior o el ala inferior, y luego a los apoyos, y a través de los diafragmas extremos y los marcos transversales, en proporción a su rigidez relativa y la respectiva masa tributaria del puente.

Por otro lado, en este mismo documento se indica de manera más específica, las zonas en **las que se deben proporcionar diafragmas, en general, “a menos que se especifique lo contrario, se deben proporcionar diafragmas en los bastiones, las pilas y las articulaciones para resistir las fuerzas aplicadas y transmitir las a los puntos de apoyo. Los diafragmas intermedios se pueden usar entre vigas en sistemas curvos o cuando sea necesario para proporcionar resistencia a la torsión y para apoyar la losa en puntos de discontinuidad o en puntos de discontinuidad en ángulo recto o en puntos de ángulo en vigas.”** (p. 5-220) (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2017).

En Chile, tras el terremoto que tuvo lugar en febrero del 2010 se realizaron estudios según los daños que sufrieron los puentes y como consecuencia se publicaron los Nuevos Criterios Sísmicos para el Diseño de Puentes (2010). En dicho documento se define la obligatoriedad de incluir vigas diafragma extremas y central, independientemente de la zona sísmica en la que se encuentre el puente y del tipo de viga (metálica, postensada o pretensada).

De acuerdo con la investigación de Roberto Aguiar (2011) llamada El megasismo de Chile 2010 y lecciones para Ecuador, tanto el Manual de Carreteras 2002 de Chile, como la norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2005 permitían diseñar puentes sin la presencia de diafragmas transversales, siempre y cuando se demostrara en forma detallada que la estructuración del puente en sentido transversal era capaz de soportar la acción sísmica. Si

el diseñador lo demostraba con la colocación de topes transversales o con el anclaje vertical, no tenía necesidad de colocar vigas transversales, ya que estos otros elementos serían capaces de soportar las fuerzas sísmicas transversales al puente. Sin embargo, con el análisis de puentes colapsados o dañados por el sismo de Chile 2010 se vio que esto no funcionó. Pues, cuando solo se colocan vigas en el sentido longitudinal, el puente se hace muy rígido en esa dirección, pero muy débil en el sentido transversal y muy probablemente la falla se vaya a dar en el sentido débil, sobre todo cuando el puente tiene cierta curvatura (Aguilar, 2011).

En el ámbito europeo, los Eurocódigos estructurales son los que rigen el diseño de los puentes. Cada Eurocódigo, excepto EN 1990, se divide en una serie de partes que cubren aspectos específicos. Los Eurocódigos para estructuras de hormigón, acero, materiales compuestos y madera y para el diseño sísmico comprenden una Parte 2 que cubre explícitamente el diseño de puentes de carreteras y ferrocarriles. Al consultar el documento EN 1992-2: Proyecto de estructuras de hormigón, puentes de hormigón no se encuentra una sola mención de las vigas diafragma o vigas transversales. En la norma EN 1993-2: Proyecto de estructuras de acero, puentes sí se habla de estos elementos, sin embargo, no se indica en dónde se deben colocar o en qué casos incluir o no diafragmas. Y finalmente, en el EN-1998-2: Proyecto de estructuras sismorresistentes, puentes tampoco se hace referencia a estos elementos.

En Nueva Zelanda, las superestructuras de puentes de vigas múltiples deben contar con diafragmas o una estructura equivalente en los extremos de cada tramo (NZ Transport Agency, 2018).

Este marco legal muestra que, tanto a nivel nacional como internacional, las normativas actuales referentes al uso de diafragmas intermedios son, en general, poco técnicas y no indican una metodología clara para llegar a justificar su uso.

## *2.5 Fuerzas sísmicas*

Los sismos son fenómenos que se presentan debido a la brusca liberación de energía de deformación acumulada durante largos periodos de tiempo en la zona superficial de la Tierra. Estos producen ondas de varios tipos, que se propagan desde su foco en todas las direcciones a través del suelo. La carga sísmica es la fuerza de inercia de la estructura cuya magnitud y distribución en la estructura cambia continuamente en el tiempo, desde el

comienzo de la vibración. Como fenómeno de la dinámica, la fuerza sísmica depende de la distribución de masa y rigidez a lo largo de la estructura, así como de la manera en que la plasticidad se extiende a través de la estructura (Cassano, 2009).

Según Bellido (2010), las estructuras de puentes deben ser capaces de resistir los esfuerzos provocados por un sismo sin que se afecte la circulación de los vehículos que lo utilizan una vez transcurrido el mismo. Esto implica que en los puentes no existen elementos secundarios que puedan sufrir daños significativos durante un sismo.

De acuerdo con Lluís González (2010) existen muchas razones por las que las vibraciones que recibe una estructura durante un movimiento sísmico pueden variar y afectar de forma muy distinta a estructuras homogéneas. Así, podemos identificar las más importantes, tales como la proximidad de la construcción a la fuente de origen, las características propias del lugar y del terreno sobre el que está emplazada la estructura o de la atenuación de la aceleración pico.

La aceleración, la frecuencia y el tiempo de duración de todo evento sísmico son parámetros clave para clasificar el movimiento. Parámetros que se pueden registrar con el uso de acelerogramas. A partir de estos registros, las normas sísmicas de cada país delimitan áreas o zonas con un potencial de riesgo sísmico similar, teniendo en cuenta la frecuencia de la ocurrencia, la predicción de la magnitud del sismo, la probabilidad de excedencia de esta magnitud, la distancia al origen, la localización de la falla de origen y las características geológicas del área. Estas demarcaciones son presentadas como mapas de riesgo sísmico que, a su vez, contienen zonas con valores propios de aceleraciones pico del suelo.

A diferencia de la carga de gravedad y la carga de viento, la carga sísmica en una estructura se genera por la deformación de la estructura en el momento en que esta vibra. Por consiguiente, la carga sísmica es parte de la dinámica de la estructura y se rige por la Segunda Ley de Newton. La gravedad y la carga efectiva de viento se rigen por la Tercera Ley de Newton (Cabrera, 2016). Debido a que la aceleración del suelo durante un sismo varía irregularmente, no es posible solucionar analíticamente la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento de las vibraciones, conocida como ecuación del movimiento. Por lo tanto, es necesario el empleo de métodos numéricos para determinar la respuesta estructural, como un espectro de respuesta; metodología que se explicará con mayor detalle más adelante en esta sección.

## 2.6 *Respuesta dinámica de la estructura*

Cuando una estructura se encuentra sometida a un movimiento producido por fuerzas externas o de excitación en su base, su posición de equilibrio se interrumpe por la aparición de fuerzas de inercia que afectan a las masas de la estructura (Cassano, 2009).

Según González (2010), se entiende como respuesta dinámica de la estructura el comportamiento de esta cuando se ve sometida a cargas dinámicas y, por tanto, variables en el tiempo. Dicha respuesta depende de varios factores, en particular: de la magnitud y duración de la excitación; de las propiedades estructurales, como la masa, la rigidez, el periodo fundamental y el amortiguamiento, y de las características de los estratos de suelo del lugar (potencia, tipología, consistencia, etc.).

La autora Alexandra Cabrera (2016) explica que los sistemas estructurales de varios grados de libertad no presentan un único movimiento armónico simple con una sola frecuencia de vibración. Por el contrario, no solo los desplazamientos varían con el tiempo, sino también la configuración deformada de la estructura.

Las formas de vibración son conocidas como modos naturales de vibración ( $\phi_n$ ) y cada modo presenta un periodo natural de vibración (T) característico. El cálculo de los modos y frecuencias naturales de vibración, en el análisis del comportamiento elástico de las estructuras cumplen un rol importante en la evaluación de la respuesta dinámica, ya que se encuentran relacionados con la forma que el sistema responde ante una sollicitación. Para encontrar los modos de vibración, con sus correspondientes periodos o frecuencias, hay que resolver el problema de análisis modal de las ecuaciones dinámicas de movimiento para un sistema de múltiples grados de libertad en el caso de oscilación libre.

Por lo tanto, el análisis modal se reduce a un problema de autovalores (también conocidos como valores propios o eigenvalues) y autovectores (también conocidos como vectores propios o eigenvectors). La interpretación física de los autovalores y autovectores representan las frecuencias y modos de vibración, respectivamente y estos valores dependen de las características geométricas y de materiales (rigidez) y de la inercia que la estructura opone al movimiento (masa) (Cabrera, 2016).

Existe también el fenómeno del amortiguamiento o resistencia a la fricción de la estructura a la vibración impuesta. Este efecto influye en la magnitud y duración del movimiento inducido sobre la construcción, siendo variable para distintos tipos de estructuras. El mismo

hace decrecer el movimiento oscilatorio y se expresa normalmente como una fracción del amortiguamiento crítico ( $\xi$ ). Este último es aquel que provoca que el movimiento resultante decrezca exponencialmente con el tiempo hasta hacerse cero. La magnitud de la disminución de estos efectos es difícil de cuantificar con precisión y, además, aun entrando en la no linealidad, no es significativa, por lo que la mayoría de los reglamentos indican aproximadamente un amortiguamiento igual al 5 % del crítico (González, 2016).

Cuanto mayor es la energía disipada por medio de deformaciones plásticas, menor es la energía disipada por el amortiguamiento. Esto significa que, a medida que un evento sísmico provoca mayores deformaciones en la estructura y esta responde mediante la formación de rótulas plásticas, el amortiguamiento va disminuyendo. Cuando la estructura incursiona en el rango inelástico, su rigidez se va degradando, por lo tanto, las partículas que componen las secciones, que ya están agrietándose progresivamente, contribuyen menos al fenómeno. Dicho de otra forma, la degradación de la rigidez provoca la pérdida de resistencia y de amortiguamiento.

Ante una misma acción exterior, las estructuras reaccionan de formas distintas, ya que su respuesta está íntimamente relacionada con sus formas o modos de vibrar y sus correspondientes frecuencias o periodos propios.

Si una estructura perfectamente rígida sufre una vibración por efecto de un sismo, esta se vería afectada por el mismo valor de vibración que la transmitida por el terreno. Sin embargo, esta situación dista mucho de ser real, ya que todas las estructuras tienen cierto grado de elasticidad, por lo que la vibración de la estructura no coincide con la del terreno y tanto el periodo de vibración como las aceleraciones de suelo y estructura son diferentes.

Para estructuras muy rígidas se tendrán periodos muy cortos de vibración, de manera que la oscilación de la estructura se asemeja mucho a la del terreno situación ante la cual el puente responde de manera más intensa. En cambio, en periodos mucho más largos, la vibración es mucho más lenta que la del terreno, lo que determina que la estructura se independiza y el espectro elástico de respuesta será muy reducido. Los mayores valores de espectro elásticos se dan para periodos de oscilación intermedios, en torno a 0,3 a 0,6 segundos.

El objetivo de la simulación es predecir el comportamiento o respuesta de un sistema ante cierta excitación (Maldonado, 2004). Para el caso específico de la cuantificación de la respuesta sísmica de un puente se analizan los desplazamientos globales de la estructura,

las fuerzas de los miembros y las deformaciones locales por medio de la implementación de modelos matemáticos y técnicas de análisis.

Para obtener una simulación del comportamiento de los puentes de interés para esta investigación ante cargas sísmicas se utilizará el software SAP 2000, el cual permite predecir por medio de diferentes metodologías la respuesta de estructuras ante distintas excitaciones. En las siguientes secciones se explican los distintos métodos y técnicas de análisis a implementar en este trabajo.

### *2.7 Análisis mediante el método modal espectral*

El análisis sísmico de estructuras tiene como objetivo encontrar las fuerzas y momentos internos debidos a la carga sísmica, en cada uno de los elementos del sistema estructural para luego proceder al diseño.

Según el trabajo final de graduación de Carlos Mesa (2005) dada la sencillez de aplicación y los buenos resultados que proporciona, el método de cálculo recomendado por la mayoría de las normas sísmicas es el análisis modal espectral. Es la forma más usual de definir una acción sísmica, dado que se obtienen descripciones de las características más importantes de la respuesta estructural sin la necesidad de disponer de una historia en el tiempo de la excitación y la respuesta.

El espectro de respuesta se utiliza en el análisis sísmico para medir la reacción de una estructura ante la vibración del terreno sobre la que está construida. El espectro elástico de respuesta es el que se utilizará para esta investigación. Este se relaciona con la aceleración y mide el comportamiento o respuesta de la estructura a las acciones que son inducidas exteriormente por el terremoto. El espectro elástico de respuesta determina el valor absoluto de la aceleración máxima de vibración con el que se debe diseñar la estructura. (González, 2016).

La respuesta máxima del sistema se obtiene combinando las respuestas máximas calculadas para cada uno de sus modos más significativos, en base a una acción sísmica caracterizada por su espectro de respuesta. Dado que, en análisis lineal, cualquier sistema de  $n$  grados de libertad puede expresarse como superposición de  $n$  sistemas de un grado de libertad – asociados a sus modos de vibración–, y puesto que el espectro sísmico de respuesta permite determinar la respuesta máxima de cada uno de estos sistemas de un grado de libertad a la acción sísmica, es posible obtener la respuesta máxima de la estructura completa –con

n grados de libertad— superponiendo las aportaciones de los n sistemas de un grado de libertad en que se ha descompuesto el sistema original.

La obtención de la contribución máxima debida a cada modo en la respuesta es exacta, aunque dichos valores no se dan en el mismo instante y no pueden sumarse directamente. Por esta razón, para obtener la respuesta total al implementar el cálculo modal espectral se emplean reglas de combinación de naturaleza estadística y basadas en el principio de superposición. (Mesa, 2005).

Mediante los criterios de combinación, se puede obtener la respuesta máxima esperada tanto para las fuerzas internas en los elementos componentes de la estructura, como para los parámetros globales del puente entre los que se pueden mencionar: fuerza cortante en la base, cortantes en las conexiones entre elementos, momentos de volcamiento, desplazamientos totales y relativos (Cabrera, 2016).

Como se menciona en la investigación de Alexandra Cabrera (2016), las normativas sísmicas establecen que debe emplearse el método de la Combinación Cuadrática Completa (CQC, por sus siglas en inglés) en el caso de estructuras con un acoplamiento modal significativo. Con el cual se consigue combinar los diferentes valores calculados para cada modo y así obtener una máxima respuesta elástica.

Además, se debe asegurar que en cada dirección se consideren aquellos modos de vibración cuya suma de masas efectivas sea por lo menos el 90 % de la masa de la estructura y siempre deberá tomarse en cuenta, como mínimo, los tres primeros modos predominantes en la dirección de análisis.

## *2.8 Modelación por método de elementos finitos*

Dentro del proceso de análisis sísmico de puentes, el modelo es la herramienta que facilita la formulación matemática de las características geométricas y comportamiento de la estructura del puente prototipo. La formulación de un modelo matemático para describir el dominio geométrico de la estructura de un prototipo se denomina discretización, ya que se utilizan elementos matemáticos discretos, sus conexiones e interacciones para describir el comportamiento del mismo (Priestley, Seible, & Calvi, 1996).

Existen varios niveles de discretización posibles dentro del desarrollo del modelo matemático para el análisis sísmico de puentes, estos van desde modelos de parámetros concentrados y modelos de componentes estructurales hasta modelos detallados de



elementos finitos; siendo este último el grado de discretización a utilizar en la presente investigación. En la Figura 9 se aprecian diagramas de estos distintos niveles de modelado.

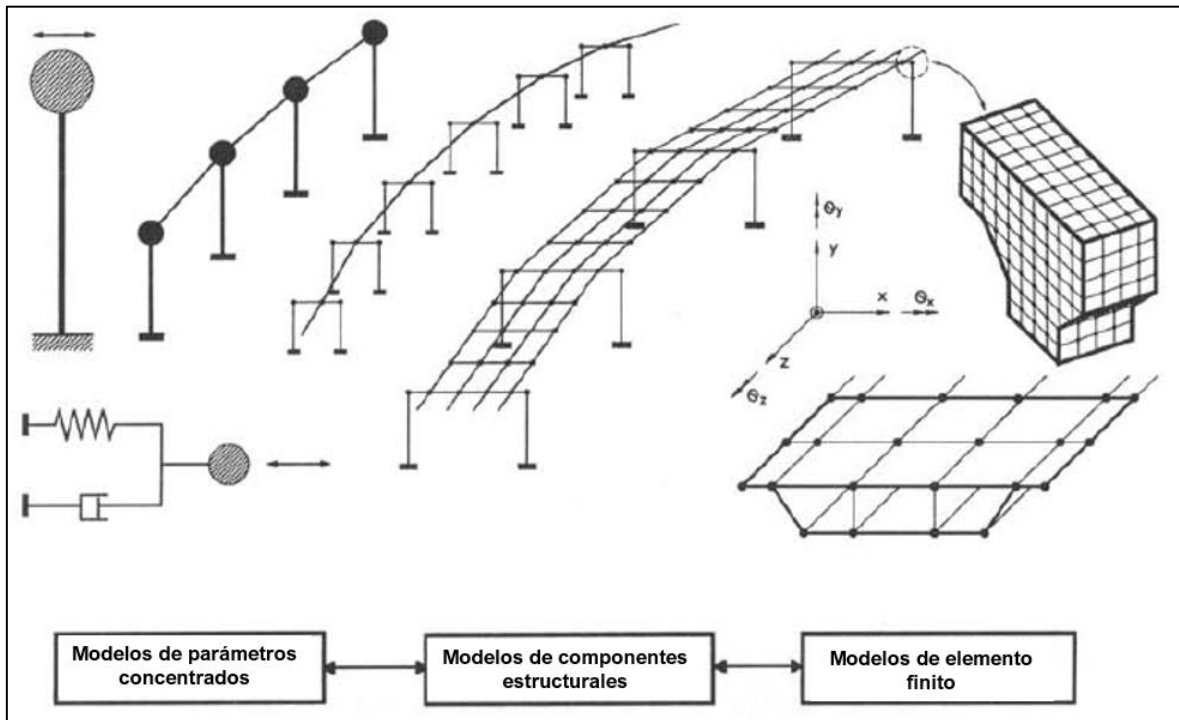


Figura 9. Niveles de modelado para análisis sísmico de puentes

Fuente: Priestley, Seible & Calvi, 1996

En el libro "Seismic Design and Retrofit of Bridges" se explican estos niveles de modelado para análisis sísmico de puentes. Iniciando por el nivel que representa una formulación matemática más simple, los modelos de parámetros concentrados se identifican por agrupar o concentrar convenientemente las características del puente como la masa, la rigidez y la amortiguación en ubicaciones discretas; a pesar de su simpleza matemática se requiere un grado de conocimiento y experiencia significativo para formular relaciones fuerza-deformación equivalentes de los pocos elementos idealizados para poder representar adecuadamente el comportamiento del puente prototipo. Por otro lado, los modelos de componentes estructurales se basan en subsistemas estructurales idealizados que están conectados para parecerse a la geometría general del puente modelo y la caracterización de la respuesta dinámica se proporciona por medio de relaciones fuerza-deformación en los extremos del miembro para cada componente estructural o subsistema. Finalmente, los modelos de elementos finitos (MEF) discretizan el dominio geométrico real de la estructura del puente con una gran cantidad de elementos pequeños con características de desempeño derivadas directamente de los materiales estructurales constituyentes. El grado de

discretización geométrica puede cuantificarse por el número de cantidades de respuesta desconocidas definidas. Como la mayoría de los modelos de análisis de puentes se basan en desplazamientos, estas cantidades de respuesta desconocidas se expresan típicamente en forma de deformaciones independientes en las uniones o nodos del modelo y se conocen como grados de libertad (Priestley, Seible, & Calvi, 1996).

Según Maldonado (2004), el método de los elementos finitos puede llegar a ser un método matemático muy complejo, debido a la discretización de los cuerpos en estudio y a la existencia de muchas divisiones. Se debe realizar una o más ecuaciones para representar el comportamiento de cada división del cuerpo.

Para poder emplear el método se deben tener presentes las siguientes asunciones:

1. Una función continua bajo un dominio global puede aproximarse por una serie de funciones operando bajo un número finito de pequeños subdominios, estas series de funciones son continuas y pueden aproximarse a la solución exacta, así como el número de subdominios se aproxima infinitamente a la pieza de estudio.
2. El dominio global del cuerpo está dividido en subdominios llamados *elementos*.
3. Los puntos que definen las uniones y conexiones entre los elementos son llamados *nodos o puntos nodales*.
4. Los elementos son especificados como uniones en sus nodos comunes y son asumidos de esta manera para ser agrupaciones continuas a lo largo de sus fronteras, y cualquier función que represente el comportamiento de este nodo es asumida para ser igualmente continua en las fronteras.
5. La función que existe bajo el dominio es resuelta explícitamente para los puntos nodales. Se asume que el valor de la función en cualquier punto interno puede ser definida en términos de variables nodales del elemento en estudio.
6. Las variables nodales se refieren a los grados de libertad y estos son 3 de desplazamiento y 3 rotaciones, para el sistema de coordenadas cartesianas. Para el análisis de esfuerzos, las variables nodales son deflexiones sufridas por la estructura en los puntos nodales.
7. La colección completa de elementos representa una aproximación de los dominios de la geometría, y con ello se tiene gran exactitud de la estructura en estudio.
8. Los puntos nodales se refieren a puntos para una evaluación de la función y no representan físicamente puntos de conexión en el dominio.

En la Figura 10 se muestra, de forma esquemática, el proceso de análisis de la estructura de un puente por el Método de Elementos Finitos. A partir de la geometría inicial del puente se obtiene una malla de elementos finitos rectangulares que discretizan la losa superior y las vigas. Finalizado el proceso de cálculo, se obtiene una información completa del comportamiento del puente bajo las cargas aplicadas. (Oñate, 1992). Cabe destacar que, el método de elementos finitos utiliza todos los modos de vibración de la estructura, lo que asegura resultados más exactos.

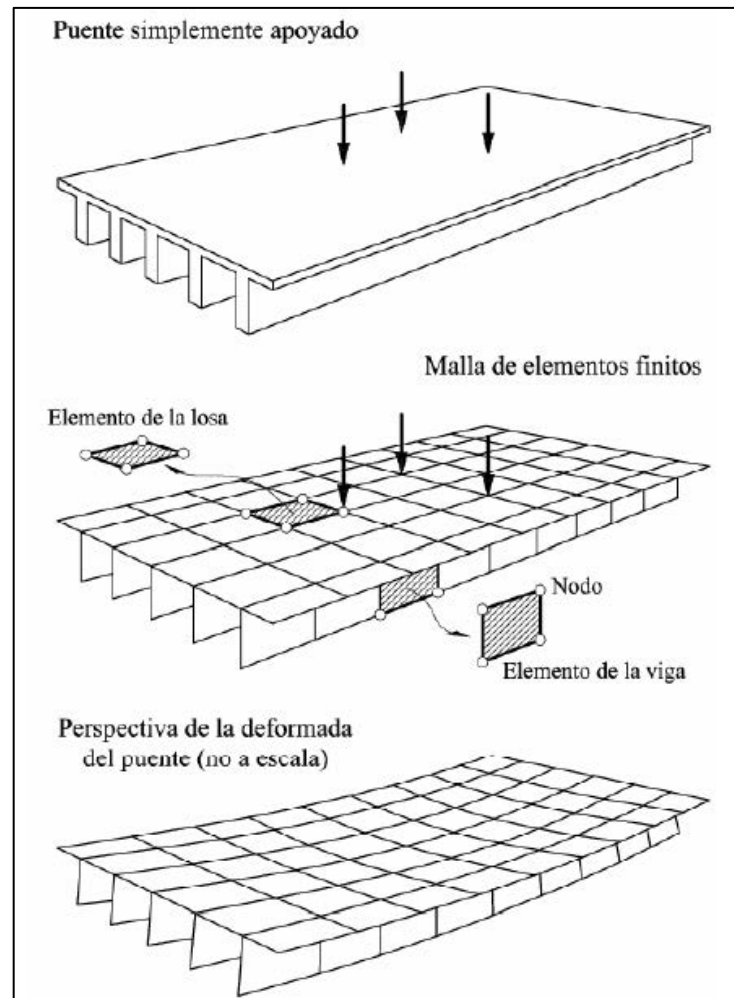


Figura 10. Análisis de la deformación de un puente por el método de elementos finitos

Fuente: Oñate, 2006

## 2.9 Diseño sísmico de puentes: diseño basado en fuerzas

Los puentes del territorio nacional deben proyectarse utilizando metodologías de diseño basadas en comportamiento, que le permitan al diseñador estimar el desempeño de la estructura ante un evento sísmico en términos del nivel de daño esperado. En esta sección

se incluye una síntesis del método de diseño basados en fuerzas, el cual determina la demanda sísmica en la forma de las fuerzas y deformaciones requeridas por los miembros.

Todas las normativas de diseño sísmico se concentran en el detallado del elemento dúctil, para asegurar un nivel de comportamiento específico definido por el diseñador en el marco de lo que la normativa permita que se utilice.

Según los autores Betancour, Serrano & Galvis (2015), en esta metodología se busca que la resistencia de los elementos dúctiles sea mayor o igual a las solicitaciones generadas por las cargas considerando los efectos del sismo en un análisis espectral (elástico lineal por definición), de uno o varios grados de libertad, y dividida por el Coeficiente de Modificación de Respuesta,  $R$ , que representa la ductilidad de las columnas y la redundancia de la estructura. Si las rótulas son a flexión (como en casi todos los casos), el coeficiente  $R$  se aplica al momento flector obtenido por sismo, mientras que el cortante en el elemento dúctil y los elementos adyacentes se diseñan por capacidad para asegurar la formación de la rótula plástica con el mecanismo y la zona supuesta, y evitar fallas no deseables, como la falla por cortante.

Este método se basa en las siguientes suposiciones (Priestley, Calvi y Kowalsky, 2007):

- Principio de iguales desplazamientos válido para todos los puentes.
- La capacidad de ductilidad y redundancia es única por tipo de subestructura.
- Esta capacidad de ductilidad se selecciona con base a la importancia del puente y su tipología y en ningún momento es verificada.
- La rigidez de un elemento es independiente de su capacidad.

Sin embargo, cabe destacar algunas limitaciones de esta metodología:

- ❖ El  $R$  en el método de fuerzas nunca es verificado y se ha demostrado que es diferente para el mismo tipo de subestructura, es decir, no es independiente del período estructural (Miranda y Bertero, 1994) como lo supone la metodología.
- ❖ El uso del  $R$  implica que la rigidez de elementos de concreto reforzado es independiente del refuerzo longitudinal, lo cual no es cierto, diagramas momento curvatura demuestran que la rigidez incrementa a mayor refuerzo longitudinal, mientras que la curvatura de fluencia permanece más o menos constante.
- ❖ El diseño por fuerzas no proporciona información sobre el mecanismo de falla más probable de la estructura.

Este método de diseño se encuentra reglamentado en la norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2012). El cual se explica brevemente a continuación.

El proceso de análisis y diseño inicia con la construcción del espectro de diseño elástico para un amortiguamiento estructural del 5 %. Esta normativa utiliza un único nivel de amenaza correspondiente a un porcentaje de excedencia del 7 % en 75 años (equivalente a un período de retorno de aproximadamente 1000 años). Una vez definido el espectro, la estructura se clasifica en una de cuatro zonas de comportamiento o desempeño sísmico, siendo la Zona 1 la más baja y la Zona 4 la más alta. Seguidamente, se debe seleccionar la Categoría Operacional del puente entre ordinario, esencial o crítico. Con base en esto y al tipo de subestructura se selecciona el Coeficiente de Modificación de Respuesta,  $R$ , utilizado para reducir los efectos del sismo. Una vez definido el  $R$ , se procede con la selección del método de análisis dinámico del puente que depende de la Zona de Comportamiento Sísmico, la Clasificación Operacional y la regularidad del puente. El método más común en puentes regulares es el método espectral elástico multimodal, el cual será el utilizado en este estudio. Con todo lo anterior, se procede a diseñar el puente de acuerdo con los Estados Límites correspondientes, particularmente el Estado Límite de Evento Extremo I que es el único con carga sísmica. La carga sísmica para el diseño a flexión del elemento dúctil es la fuerza sísmica dividida por  $R$ , mientras que, para el resto de las solicitaciones y el diseño de los otros elementos, la carga sísmica corresponde a la capacidad máxima de las rótulas plásticas (Betancour, Serrano, & Galvis, 2015).

Cabe resaltar que para el desarrollo de los modelos de esta investigación se considera una zona III de amenaza sísmica y una operación esencial, lo que corresponde a una zona 3 de desempeño sísmico y a una categoría C de diseño sísmico.

### *2.10 Eficacia, eficiencia y efectividad*

Como en esta investigación se pretende evaluar la influencia que tiene la presencia de diafragmas intermedios en la respuesta sísmica de puentes de vigas de concreto y uno de los objetivos específicos es contrastar la eficacia de colocar un diafragma central contra considerar dos diafragmas posicionados a un tercio de cada extremo del puente. Es pertinente aclarar la diferencia entre eficacia, eficiencia y efectividad.

Tras consultar el artículo Efectividad, eficacia y eficiencia en equipos de trabajo (2018) en el cual se presentan definiciones de distintos autores para estos términos, se decide trabajar con las siguientes:

- Eficacia: se define como la capacidad de lograr el efecto que se desea o se espera (Real Academia Española, 2014).
- Eficiencia: se refiere a la expresión que mide la capacidad de un sistema para lograr el cumplimiento de un objetivo determinado, minimizando el empleo de recursos (Fernández-Ríos & Sánchez, 1997).

En términos generales, ambos conceptos son complementarios y su principal diferencia es que la eficacia se centra en el alcance y logro de resultados, mientras la eficiencia en la utilización de recursos (Fernández-Ríos & Sánchez, 1997).

- Efectividad: esta se refiere al resultado de la eficacia y la eficiencia, definiendo la eficacia como la relación entre las salidas obtenidas y las salidas esperadas (SO/SE); y la eficiencia como la relación de salidas obtenidas entre los insumos utilizados (SO/IU) (Quijano, 2006).

Más adelante, en la Sección 4.3.5 de la presente investigación, se expone la manera en la que se cuantifica la eficacia para poder realizar comparaciones y conclusiones.

## Capítulo III. Características de los puentes a modelar

---

A continuación, se enlistan una serie de características estructurales de cada uno de los puentes a modelar:

- El puente es recto, ya que los puentes curvos o sesgados complican la respuesta sísmica.
- La losa es continua y el puente tiene un solo tramo; por lo tanto, no se cuenta con pilas.
- Se considera, según los Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes, una zona III de amenaza sísmica y un sitio geotécnico de cimentación  $S_3$ , el cual se asocia a un perfil estratigráfico de un suelo rígido, lo que es beneficioso para la respuesta sísmica de la estructura, ya que, los suelos blandos amplifican los desplazamientos estructurales y pueden ser propensos a aglomerarse y licuarse.
- Los bastiones están orientados perpendicularmente al eje del puente; pues, los soportes oblicuos tienden a provocar una respuesta rotacional, con mayores desplazamientos.
- Las vigas principales de la superestructura tienen una conexión del tipo semi-integral con los bastiones (restringen los movimientos, no así las rotaciones); de esta manera, se permite el giro relativo entre las vigas principales y los bastiones.
- Únicamente se analizará el movimiento transversal de los modelos.
- Se clasifica como puente esencial, los cuales se ubican en rutas primarias y secundarias con un tránsito promedio diario (TPD)  $> 5000$  vehículos y no clasifican como puentes críticos. La mayoría de los puentes en Costa Rica entra en esta clasificación.

En general, se realizarán modelos globales de la estructura para evaluar la influencia que tiene la presencia de diafragmas intermedios en la respuesta de los puentes ante demandas sísmicas. Para esto, se empleará un análisis basado en el método pseudo dinámico o análisis modal espectral.

Cabe destacar que los componentes estructurales de los modelos serán discretizados como elementos finitos. Este método se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua

en un modelo discreto aproximado, es decir, en un gran número de subelementos con las mismas características del material estructural constitutivo del miembro. Esta práctica se conoce como discretización del modelo y la emplea el programa SAP 2000.

### 3.1 Propiedades de los elementos

#### 3.1.1 Materiales de los elementos

Los puentes por modelar se componen de un único material, el concreto. No obstante, se asignan distintas resistencias de este según la función estructural de los elementos, tal como se muestra en el Cuadro 1.

Las vigas principales son los elementos que utilizan el concreto de mayor resistencia debido a que se desea, en todos los casos, que la losa no tome esfuerzos de flexión en sentido longitudinal. Además, al considerar el diseño de la superestructura como sección compuesta se quiere que las vigas tomen las cargas verticales y las transmitan a la subestructura.

Cuadro 1. Materiales y sus propiedades para cada elemento estructural

Elementos	Material	Propiedades	Valores	Unidades
Losa	Concreto	Resistencia a compresión ( $f'c$ )	280	kg/cm <sup>2</sup>
		Densidad ( $\gamma_c$ )	2400	kg/m <sup>3</sup>
Vigas Diafragma		Módulo de Elasticidad (E)	267731,2	kg/cm <sup>2</sup>
Bastiones		<b>Relación de Poisson (<math>\nu</math>)</b>	0,2	
Vigas longitudinales		Resistencia a compresión ( $f'c$ )	420	kg/cm <sup>2</sup>
		<b>Densidad (<math>\gamma_c</math>)</b>	2400	kg/m <sup>3</sup>
		Módulo de Elasticidad (E)	327902	kg/cm <sup>2</sup>
		<b>Relación de Poisson (<math>\nu</math>)</b>	0,2	

#### 3.1.2 Parámetros geométricos

Para cumplir los objetivos de la presente investigación se variarán las siguientes características en los modelos: la longitud en un rango de 15 m a 50 m, la altura de las vigas longitudinales y la cantidad de diafragmas intermedios del puente. En el siguiente Cuadro se resumen las características de los puentes a modelar.



Cuadro 2. Características estructurales de los distintos puentes a modelar

Longitud (m)	Ancho (m)	Cantidad de vigas principales	Altura de las vigas principales H (m)	Espesor de la losa (m)	Cantidad de diafragmas
15	10,5	5	0,80	0,20	0 y 1
20	10,5	5	0,95	0,20	0 y 1
25	10,5	5	1,20	0,20	0 y 1
30	10,5	5	1,55	0,20	0 y 1
35	10,5	5	1,60	0,20	0, 1 y 2
40	10,5	5	1,85	0,20	0, 1 y 2
45	10,5	5	2,00	0,20	0, 1, 2 y 3
50	10,5	5	2,15	0,20	0, 1, 2 y 3

Con el fin de facilitar la identificación de los puentes y la presentación de los resultados se define la siguiente nomenclatura. El código inicia con una letra L, seguida de la longitud del puente en metros, después se coloca un guion y finalmente, se coloca el número de diafragmas intermedios del modelo. De esta manera, para los puentes de 45 m se tendrían 4 modelos: L45-0, L45-1, L45-2 y L45-3. En total se realizarán 22 prototipos, de los cuales 14 incluyen diafragmas intermedios.

Respecto a las secciones transversales de las vigas principales, las dimensiones de las alas permanecen constantes, por lo tanto, lo único que varía es la altura del alma, la cual en la Figura 11 se indica como "H variable". Siendo "H" la altura total de las vigas principales, para todos los modelos se cumple que,  $H \text{ variable} = H - 0.6 \text{ m}$ .

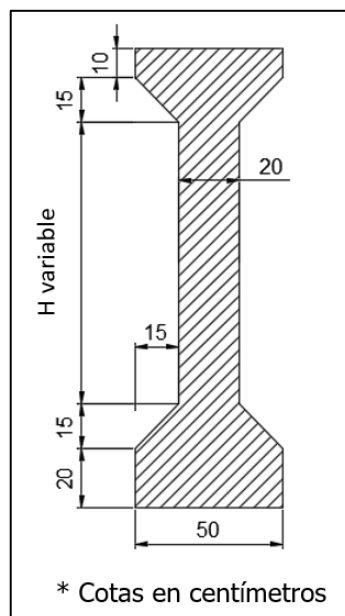


Figura 11. Sección transversal de las vigas principales

Como se observa en el Cuadro 2, el ancho del puente y la cantidad de vigas principales permanecen constantes en todos los modelos, lo único que varía es la altura de estas últimas. En general, para la totalidad de los prototipos es válida la sección transversal de la superestructura que se observa en la Figura 12.

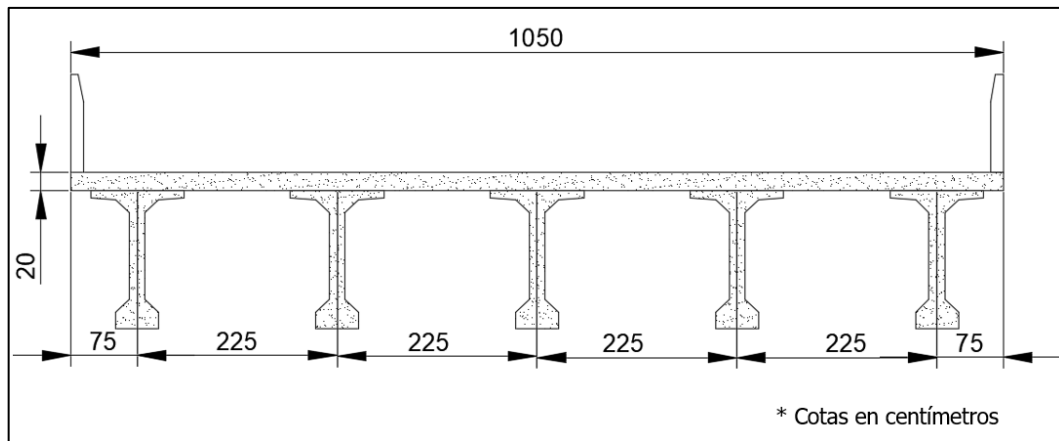


Figura 12. Sección transversal de la superestructura a considerar en todos los modelos

Todos los puentes contarán con diafragmas en sus extremos y algunos con diafragmas intermedios, siguiendo lo estipulado en la tabla del Cuadro 2. La sección transversal de las vigas diafragma es rectangular, de 35 cm de ancho en todos los puentes y altura variable, de manera que sea igual a la altura de las vigas principales en cada caso.

### 3.2 Demanda sísmica

Se debe procurar que toda la estructura y cada una de sus partes sea proyectada, diseñada y construida para que alcance objetivos de desempeño específicos, acordes con su importancia, tanto durante las condiciones de emergencia inmediata al evento como durante el posterior proceso de recuperación social y económica (Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos (CFIA), 2013).

Para la determinación de la demanda sísmica se utiliza el procedimiento establecido en los Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes, el cual utiliza un espectro de respuestas de aceleraciones que depende de la amenaza sísmica y las características geotécnicas del suelo donde se cimenta la obra.

#### 3.2.1 Clasificación operacional

Las necesidades de funcionamiento de la estructura antes, durante y después de un sismo definen el factor de importancia operacional (I) que se le asigna al puente. Según los

Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes (2013), en puentes esenciales y ante sismos con un período de retorno de aproximadamente 1000 años ( $I=1.0$  según Tabla 3.1), se protege la vida y se permite una segura evacuación de quienes circulan o están a punto de circular por el puente en el momento del sismo.

### 3.2.2 Espectro de diseño

Para la determinación del espectro de diseño se sigue el procedimiento general establecido en los Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes (2013) y el cual se aprecia gráficamente en la Figura 10. Los espectros construidos mediante este procedimiento corresponden a un amortiguamiento del 5 % y no incluyen las modificaciones que pueden implicar la presencia de una falla en la cercanía del sitio.

Las condiciones locales del terreno, tales como grosor y propiedades de los estratos modifican los espectros de respuesta, por esta razón, los coeficientes sísmicos espectrales para los períodos corto y largo,  $C_a$  y  $C_v$ , respectivamente, se obtienen de la Tabla 2.4-1, utilizando un sitio de cimentación  $S_3$  y una zona de amenaza sísmica III. Para estas condiciones se obtienen los siguientes valores:  $C_a = 0.410$  y  $C_v = 0.605$ .

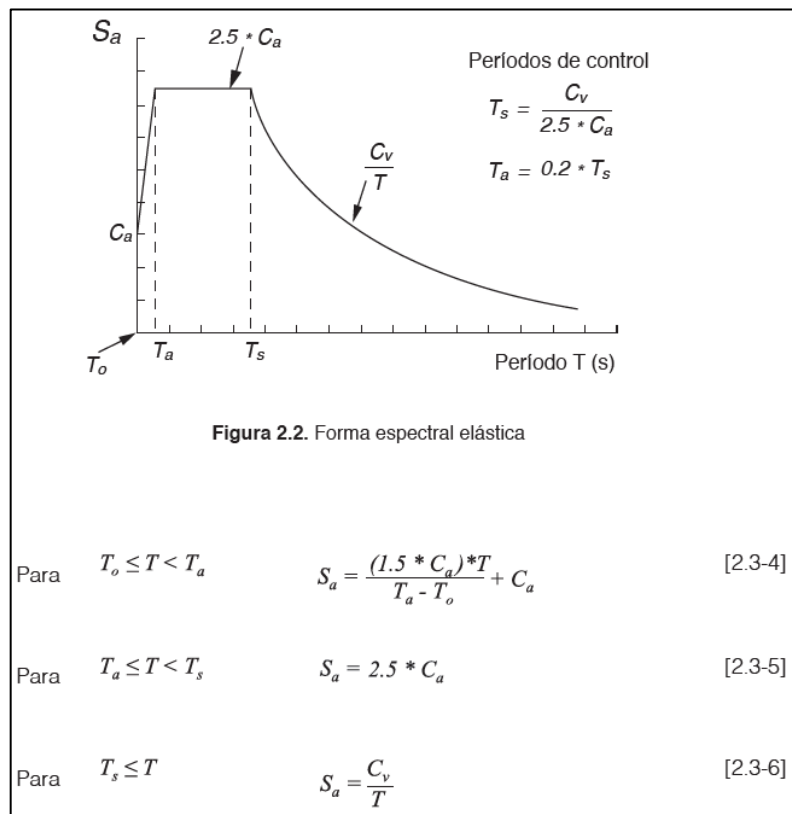


Figura 13. Procedimiento de determinación del espectro de diseño

Fuente: CFIA, 2013

Al sustituir los valores de coeficientes sísmicos espectrales obtenidos en las ecuaciones de la Figura 13 y considerando un período bajo  $T_0 = 0.01$  segundos, se obtiene el espectro de diseño de la Figura 14. Se grafica  $S_a$ , la forma espectral de pseudoaceleración expresada como fracción de  $g$ , contra  $T$ , el período fundamental de vibración del puente en la dirección considerada.

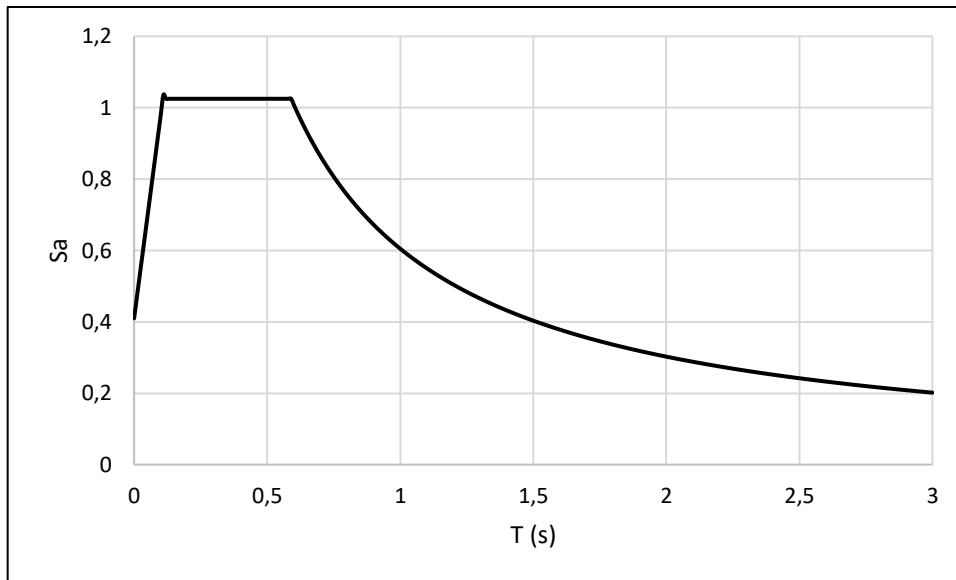


Figura 14. Espectro de diseño resultante, suelo S3 y zona de amenaza sísmica III

### 3.2.3 Factores de modificación de la respuesta

En la norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications para aproximar los efectos verdaderos que tienen las subestructuras y las conexiones por la fuerza de diseño sísmico se toman los resultados del análisis elástico (momento, cortante, etc.) y se dividen por el factor de modificación de respuesta correspondiente,  $R$ , según lo especificado en la Tabla 3.4 de los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes. Este factor depende de la categoría operacional del puente, el cual, para esta investigación se toma como Esencial.

Sin embargo, como en esta investigación se comparan los resultados obtenidos a partir de distintos modelos, no es necesaria la utilización de  $R$ , pues el factor se cancela al emplear razones entre los resultados de los distintos prototipos.

### 3.2.4 Casos de carga sísmica

Para determinar los efectos de las fuerzas sísmicas en cada uno de los ejes principales de los miembros del puente, se combinan las dos direcciones perpendiculares para formar los

dos casos de carga que se definen en la sección 3.10.8 del AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Sin embargo, en esta investigación se trabaja únicamente con la segunda de las siguientes combinaciones.

- 100 % del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos en los elementos, obtenidos del análisis en la dirección longitudinal y 30 % del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos correspondientes al análisis en la dirección transversal.
- 100 % del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos en los elementos, obtenidos del análisis en la dirección transversal y 30 % del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos correspondientes al análisis en la dirección longitudinal.

### *3.2.5 Distribución de la Carga sísmica lateral*

Estas disposiciones se aplican a los diafragmas, marcos cruzados, y arriostramientos laterales, que son parte del sistema sismorresistente en puentes de losa y vigas.

En puentes en los que la losa de concreto pueda proveer una acción de diafragma horizontal, se supondrá que las cargas laterales aplicadas a la losa se transmiten directamente a los apoyos a través de los diafragmas extremos. Por otro lado, en los puentes en los que la losa no presente suficiente rigidez transversal, las cargas laterales aplicadas a la losa se deben distribuir a los diafragmas intermedios y después llegan a los apoyos y a través de los diafragmas extremos, en proporción a su rigidez relativa y la respectiva masa tributaria del tablero (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2017).

### *3.3 Combinaciones de carga*

En la sección 3.4 del AASHTO LRFD Bridge Design Specifications se especifican las combinaciones de carga que se pueden utilizar en un análisis de cargas mayoradas para puentes, sin embargo, como en esta investigación se desea estudiar y comparar la respuesta de los distintos prototipos ante fuerzas sísmicas, se aplicará únicamente un análisis por espectro de diseño para analizar la respuesta de los distintos puentes ante cargas de sismo.

Se considera la combinación llamada Evento Extremo I, que es la que incluye el sismo. A continuación, se aprecia su ecuación.

$$C_{EEI} = 1 DC + 1 DW + 1 EQ + \gamma_{EQ} LL$$

Ecuación 1

Donde:

DW: peso permanente de superficie de rodamiento y elementos accesorios.

DC: peso permanente de elementos estructurales y no estructurales.

EQ: carga por sismo.

LL: carga viva vehicular. El factor de carga para la carga viva se tomará como  $\gamma_{EQ}=0,5$ .

### 4.1 Descripción de los modelos

La finalidad de los modelos estructurales analíticos es cuantificar la respuesta sísmica de los puentes en función de los desplazamientos, reacciones, fuerzas internas y deformaciones de los elementos. Para su realización se utiliza el programa SAP 2000, específicamente, la versión 14.2.2. que incluye herramientas de diseño de puentes de utilidad para esta investigación.

Las estructuras en estudio son puentes de un solo claro, simplemente apoyado, por lo que se requiere únicamente el modelaje de sus superestructuras. En todos los casos se trabajará con una superestructura compuesta, constituida por la losa de concreto, vigas tipo I de concreto y diafragmas extremos de concreto. De acuerdo con lo establecido en el programa SAP 2000, para cada modelo global se emplean elementos tipo Sólido, y elementos tipo Área o membrana. Específicamente, se utilizan elementos tipo *Sólido* para la losa y las vigas longitudinales y elementos tipo *Área* para los diafragmas extremos e intermedios.

El elemento *Sólido* se utiliza para modelar estructuras y sólidos tridimensionales. Este tiene seis caras cuadriláteras, con una articulación ubicada en cada una de las ocho esquinas. Este es un elemento de ocho nodos que activa los tres grados de libertad de traslación en cada una de sus articulaciones conectadas. Los grados de libertad de rotación no se activan. Este elemento aporta rigidez a todos estos grados de libertad de traslación. Cabe destacar que, se utiliza un esquema de integración numérica de  $2 \times 2 \times 2$  para el sólido. Los esfuerzos en el sistema de coordenadas locales del elemento se evalúan en los puntos de integración y se extrapolan a las articulaciones del elemento (Computers & Structures Inc. (CSI), 2010).

Por otro lado, el elemento Shell es un tipo de objeto de área que se utiliza para modelar el comportamiento de la membrana, la placa o el caparazón en estructuras planas y tridimensionales. El elemento Shell es una formulación de tres o cuatro nodos que combina el comportamiento de flexión de la membrana y la placa. El elemento de cuatro articulaciones no tiene que ser plano. Se utiliza una formulación de integración numérica de cuatro puntos para la rigidez del Shell. Respecto a los esfuerzos, fuerzas y momentos internos, en el sistema de coordenadas locales del elemento, estos se evalúan en los puntos de integración de Gauss  $2 \times 2$  y se extrapolan a las articulaciones del elemento

(Computers & Structures Inc. (CSI), 2010).

Se puede estimar un error aproximado en los esfuerzos a partir de la diferencia en los valores calculados de diferentes elementos unidos a una junta común. Esto dará una indicación de la precisión de la aproximación de elementos finitos y luego se puede utilizar como base para la selección de una malla de elementos finitos nueva y más precisa (Computers & Structures Inc. (CSI), 2010).

Por otra parte, según lo establecido en AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, 2011, se estipula que, para llevar a cabo un análisis dinámico elástico en puentes, se debe realizar un análisis espectral multimodal elástico lineal utilizando el espectro de respuesta apropiado (es decir, 5 por ciento de amortiguación). El número de grados de libertad y el número de modos considerados en el análisis deberán ser suficientes para capturar al menos el 90 por ciento de la participación de la masa en las direcciones longitudinal y transversal.

Para encontrar los modos de vibración con sus correspondientes periodos o frecuencias, se empleó en el software un análisis con vectores propios o eigenvectors para resolver el problema de análisis modal de las ecuaciones dinámicas de movimiento para un sistema de múltiples grados de libertad en el caso de oscilación libre.

#### *4.1.1 Uniones*

Las uniones en el modelo de análisis corresponden a objetos puntuales en el modelo de objeto estructural. Usando la interfaz de SAP2000, las articulaciones o uniones se crean automáticamente en los extremos de cada objeto tipo Línea y en las esquinas de cada objeto tipo Área y Sólido (Computers & Structures Inc. (CSI), 2010).

Para esta investigación se aseguró que, en todos los casos, las articulaciones de un objeto tipo Sólido o Área coincidieran con las uniones de los elementos contiguos a este.

#### *4.1.2 Apoyos*

Los apoyos son sistemas mecánicos que transmiten las cargas de la superestructura a la subestructura. Según el tipo de apoyo se permite o restringe la traslación y/o rotación.

Para el modelaje de los puentes prototipo se asignan apoyos en los extremos de las vigas longitudinales, es decir, en los bastiones. Estos elementos garantizan la condición de traslación en el sentido longitudinal del puente, con libertad de rotar y con restricción para



trasladarse transversalmente al eje longitudinal del puente.

#### 4.2 Discretización por el método de elemento finito

En regiones donde los esfuerzos están cambiando rápidamente, una malla de área o elemento sólido debe refinarse utilizando elementos pequeños y juntas poco espaciadas. Esto puede requerir cambiar la malla después de uno o más análisis preliminares. (Computers & Structures Inc. (CSI), 2010).

La discretización que se decide utilizar en todos los modelos es la siguiente. Para los elementos tipo Sólido, inicialmente la losa y las vigas se dividen en 12 a lo largo del eje longitudinal (eje x), con esta primera partición se obtienen los resultados relacionados con los desplazamientos transversales, seguidamente, se seleccionan todos los sólidos del modelo y cada uno se divide en 3 a lo largo del eje transversal (eje y) y en 4 a lo largo del eje z. Respecto a los elementos tipo Área, es decir, los que componen los diafragmas intermedios, estos se dividen en 4 a lo largo del eje z y en 3 a lo largo del eje transversal (eje y). Esta discretización final es la que se utiliza para realizar las lecturas de los esfuerzos y fuerzas internas de la estructura en las distintas zonas de interés. En las siguientes figuras se aprecia la discretización final del modelo L30-1 a manera de ejemplo.

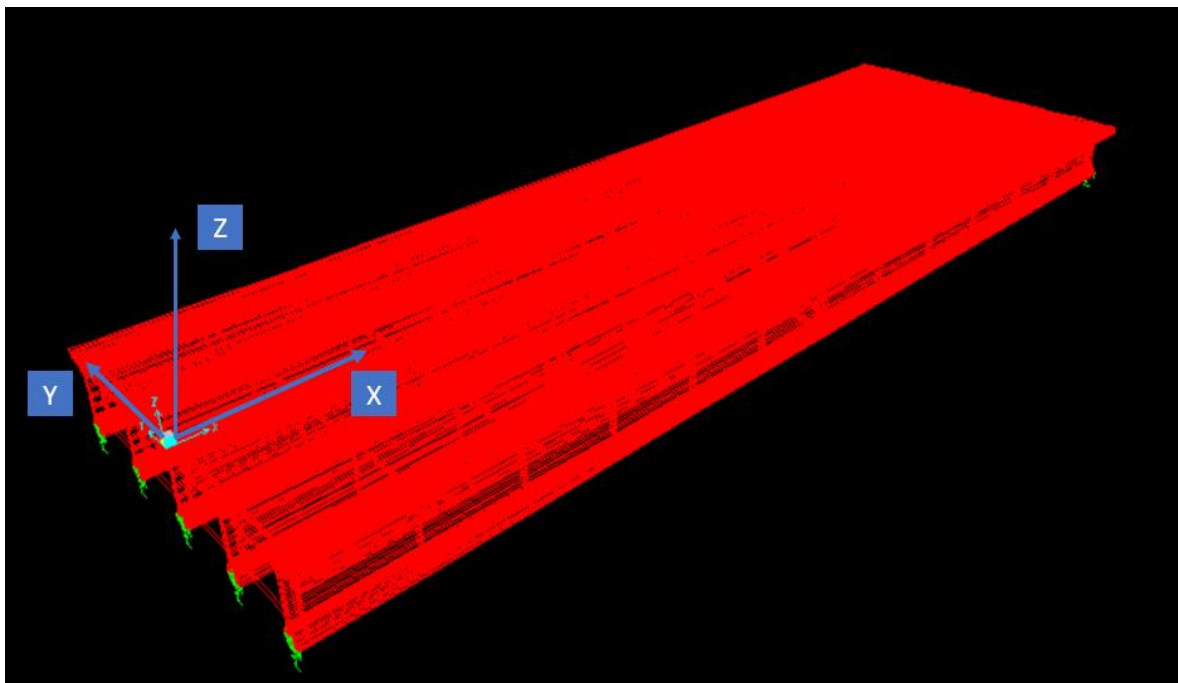


Figura 15. Vista global del modelo L30-1 con la discretización de elementos finitos

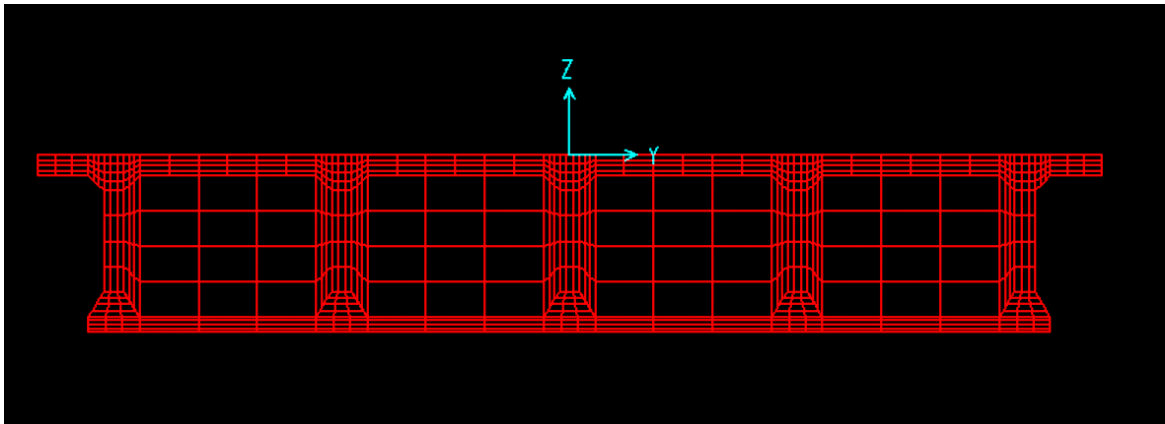


Figura 16. Corte transversal en la zona del diafragma intermedio en el puente L30-1

#### 4.3 *Lectura de fuerzas y esfuerzos internos*

Para el presente estudio es de interés leer los esfuerzos axiales y cortantes en la zona de conexión entre la losa y las vigas longitudinales y la fuerza cortante que se da en la unión entre vigas principales y diafragmas intermedios.

La nomenclatura que utiliza el programa para referirse a los esfuerzos internos de elementos tipo Sólido se relaciona con el sistema de coordenadas local del material, el cual se muestra en la Figura 17. Según el documento CSI Analysis Reference Manual (2010) el sistema de coordenadas local 1-2-3 del elemento sólido es normalmente el mismo que el sistema de coordenadas global X-Y-Z. Condición que se cumple para los modelos desarrollados y cabe recordar que, el sistema de coordenadas global de los puentes se aprecia en la Figura 15.

Si se observa la sección transversal de la Figura 16 se aprecia la partición de la losa en subelementos de los cuales se desea obtener los esfuerzos paralelos a la dirección Z (cortantes) y a la dirección Y (axiales). Por lo tanto, si se toma de referencia el sistema de coordenadas locales del material expuesto en la Figura 17, se definen como lecturas de interés los componentes de esfuerzos S23 (esfuerzo cortante) y S22 (esfuerzo axial).

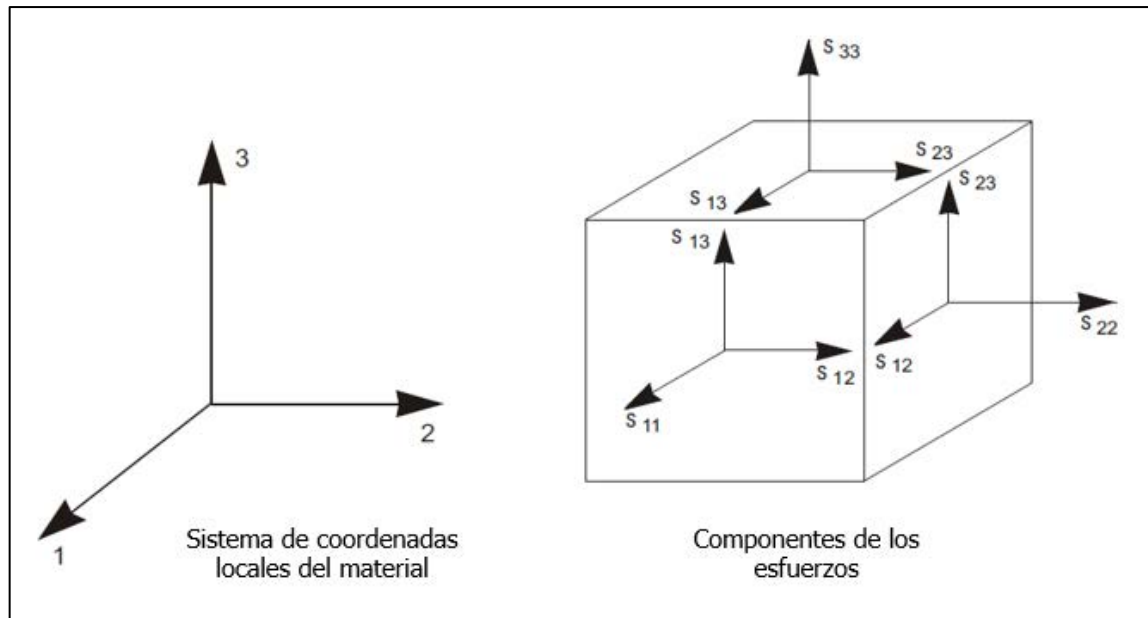


Figura 17. Componentes de los esfuerzos en el sistema de coordenadas locales del material

Fuente: Computers & Structures Inc, 2010

Modificado por: Quirós, 2020

Respecto a la obtención de las fuerzas internas presentes en los diafragmas intermedios, se debe entender la convención de signos aplicable a los componentes tipo Área. El manual de referencia de análisis de SAP 2000 indica que cada elemento de Área tiene su propio sistema de coordenadas local que se utiliza para definir las propiedades, cargas y resultados del material. Los ejes de este sistema local se denominan 1, 2 y 3. En donde los dos primeros ejes se encuentran en el plano del elemento y el tercer eje es normal. La convención de signos para los esfuerzos y fuerzas internas de un elemento tipo Área se observa en la Figura 18. Con base a la información que se presenta en este diagrama se define la Fuerza F12 como la lectura pertinente a la fuerza cortante que se da en la unión entre vigas principales y diafragmas intermedios.

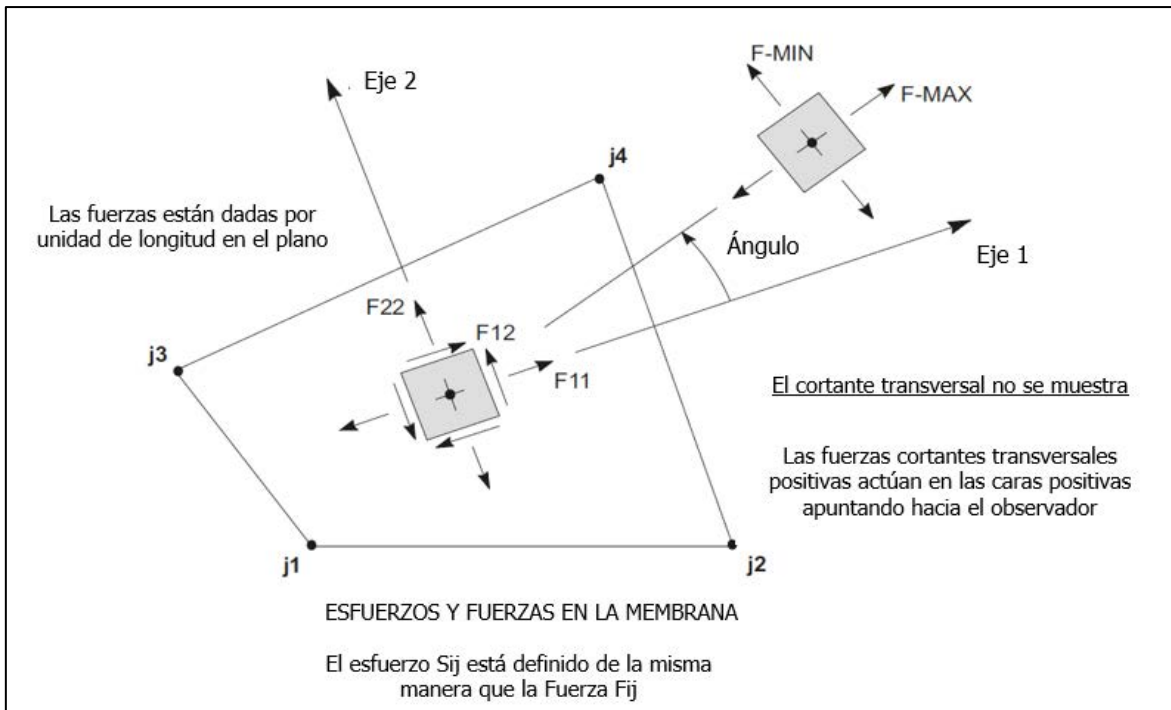


Figura 18. Esfuerzos y fuerzas internas resultantes en elementos tipo Área

Fuente: Computers & Structures Inc, 2010

Modificado por: Quirós, 2020

## Capítulo V. Análisis de resultados

---

### *5.1 Aspectos Generales*

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos para evaluar la influencia que tiene la presencia de diafragmas intermedios en la respuesta sísmica de puentes de vigas de concreto restringidos transversalmente en los apoyos. Estos prototipos estructurales fueron elaborados mediante el programa SAP 2000 y se modelaron por el método pseudo dinámico, utilizando análisis de elemento finito. Las características específicas de los puentes modelados se exponen en los Capítulos III y IV del presente trabajo.

En total, se elaboraron 22 modelos, cuyas respuestas sísmicas se resumen y se agrupan según su longitud, la presencia o no de diafragmas intermedios y la posición de los diafragmas intermedios (uno a la mitad, dos a un tercio de los extremos o tres divididos cada  $L/4$ ).

Los resultados del análisis sísmico corresponden a desplazamientos de la estructura, fuerzas internas (esfuerzos axiales y cortantes) y deformación relativa entre la parte superior de la superestructura y la parte inferior de las vigas, los cuales permitirán determinar la influencia de los diafragmas intermedios. Además, se analiza el cortante presente en las conexiones entre diafragmas intermedios y vigas principales para poder dar recomendaciones respecto al diseño de estas.

En este Capítulo no se presentan todos los resultados obtenidos, sino que se muestran casos representativos y el resto se encuentran en los Apéndices A, B y C.

### *5.2 Análisis pseudo dinámico o análisis modal espectral*

Para asegurar que los resultados obtenidos del análisis multimodal espectral sean representativos, se debe verificar que cada modelo trabaje con una cantidad de modos de oscilación que en conjunto aporten, como mínimo, una masa participativa total de al menos un 90 % de la masa dinámica.

En esta investigación se definieron 350 modos de oscilación en cada modelo, con lo que se alcanza en todos los casos, para la dirección de interés de análisis (Uy), una masa participativa de 99 % o mayor; tal como se observa en el Cuadro 3 que se muestra a continuación.

Se destaca, para cada modelo, cuáles fueron los modos con mayor porcentaje de masa participativa a la dirección transversal (Uy). Al observar el Cuadro 3 se aprecia que los modos con mayor peso que más se repiten en los distintos puentes son los modos 7,5 y 1, especialmente en los puentes con longitud igual o mayor que 30 m. Para las estructuras con una luz menor a esta, empiezan a tener mayor influencia los modos 8 y 6. Pero, en general, el Cuadro muestra que en todos los casos que se tiene la presencia de uno o más diafragmas intermedios, los primeros dos modos más significativos son suficientes para aportar más del 80 % de la masa de la estructura. Los puentes sin diafragmas intermedios alcanzan este mismo porcentaje de masa participativa con la consideración de los tres modos más significativos de la estructura. Estas observaciones son útiles si se quisiera hacer un análisis dinámico simplificado.

Cuadro 3. Resumen de los modos más significativos para cada caso y su respectivo aporte de porcentaje de masa participativa

	Cantidad de modos utilizados	% Masa participativa Uy	Primer modo significativo	% Masa participativa primer modo significativo	Segundo modo significativo	% Masa participativa segundo modo significativo	Aporte de los dos modos más significativos	Tercer modo significativo	% Masa participativa tercer modo significativo	Aporte de los tres modos más significativos
L50-0	350	100%	6	38%	1	25%	63%	7	17%	80%
L50-1	350	100%	5	54%	1	25%	79%	27	5%	84%
L50-2	350	100%	5	55%	1	26%	81%	22	5%	86%
L50-3	350	100%	5	54%	1	27%	81%	27	5%	86%
L45-0	350	100%	7	33%	6	24%	57%	1	22%	79%
L45-1	350	100%	5	57%	1	23%	80%	27	3%	83%
L45-2	350	100%	5	57%	1	23%	80%	22	5%	85%
L45-3	350	100%	5	57%	1	24%	81%	27	5%	86%
L40-0	350	100%	7	44%	1	19%	63%	5	17%	80%
L40-1	350	100%	5	60%	1	20%	80%	47	5%	85%
L40-2	350	100%	5	61%	1	21%	82%	22	5%	87%
L35-0	350	100%	7	50%	1	15%	65%	5	15%	80%
L35-1	350	100%	5	65%	1	15%	80%	49	5%	85%
L35-2	350	100%	5	66%	1	16%	82%	22	6%	88%
L30-0	350	99%	7	59%	1	14%	73%	4	8%	81%
L30-1	350	100%	4	67%	1	14%	81%	47	5%	86%
L25-0	350	99%	7	68%	2	8%	76%	28	7%	83%
L25-1	350	99%	5	74%	2	9%	83%	28	4%	87%
L20-0	350	99%	8	77%	31	7%	84%	2	5%	89%
L20-1	350	99%	6	78%	2	5%	83%	30	4%	87%
L15-0	350	99%	8	82%	31	5%	87%	2	3%	90%
L15-1	350	99%	6	80%	8	6%	86%	29	4%	90%

Generalmente, los modos de vibración que interesan corresponden a periodos mayores y menores frecuencias, ya que suelen ser los modos predominantes en la vibración de la estructura (Cabrera, 2016). Lo que se confirma al observar el Cuadro 3, pues la numeración de los modos de vibración se inicia con el número 1 siendo el modo de oscilación que registra mayor periodo y en este caso finaliza con el número 350 siendo el modo con menor periodo.

En las siguientes Figuras se muestran imágenes con las deformaciones que se obtienen de los modos con mayor aporte de masa participativa en los modelos desarrollados. Se utiliza el puente L40-1 para mostrar los modos de oscilación 1, 5 y 7.

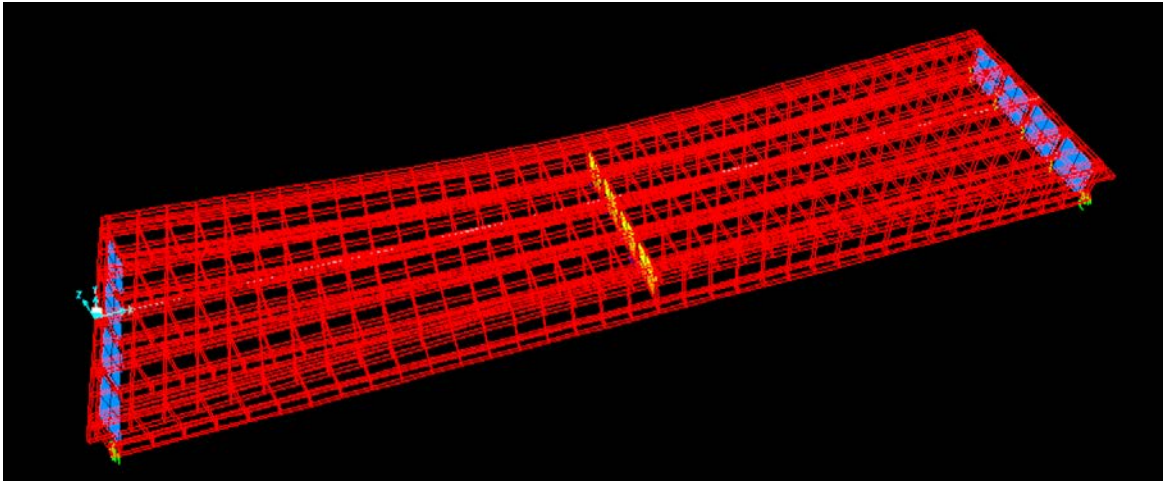


Figura 19. Modo de oscilación 1 en el puente L40-1

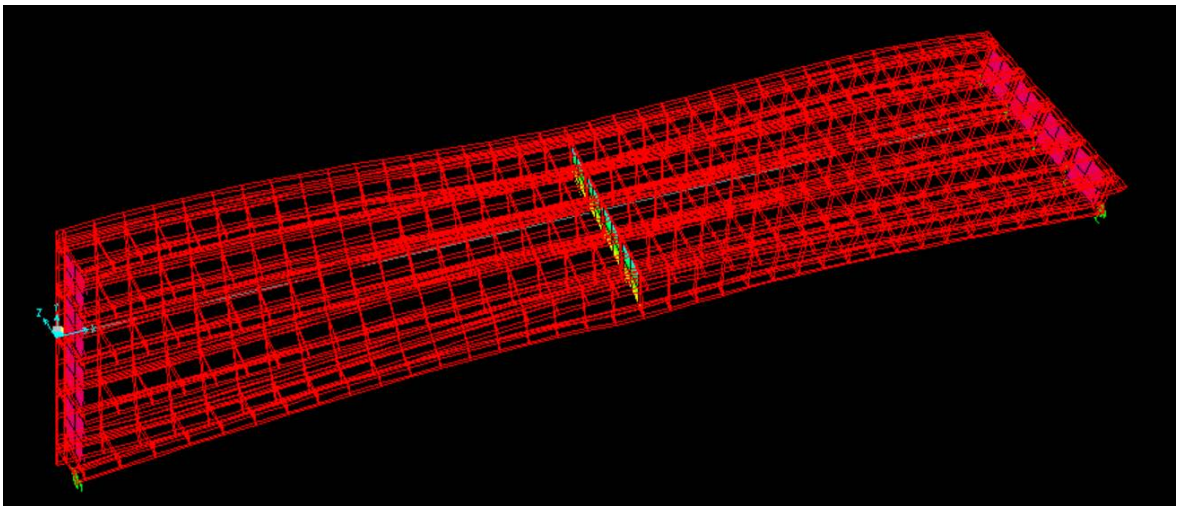


Figura 20. Modo de oscilación 5 en el puente L40-1

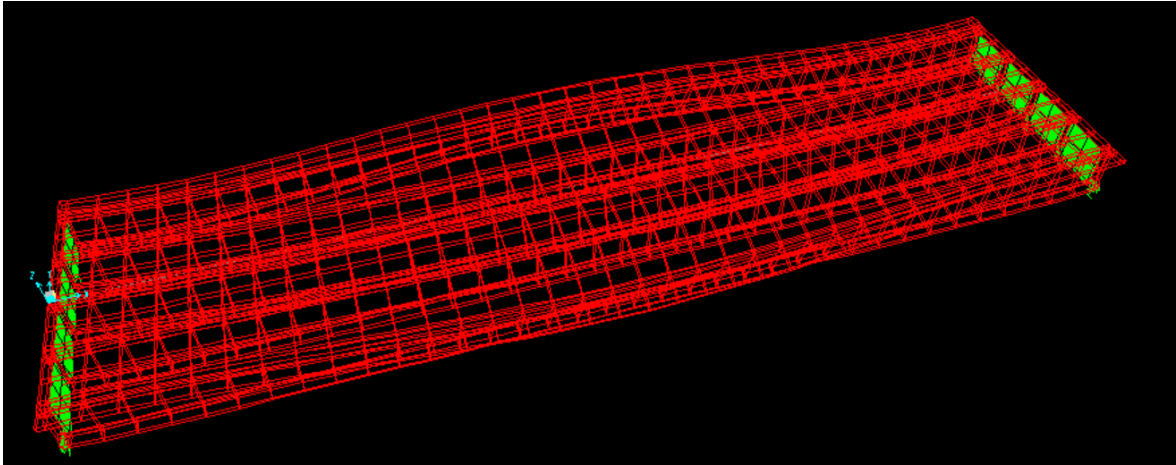


Figura 21. Modo de oscilación 7 en el puente L40-0

Cabe destacar que los grados de libertad dinámicos son los grados de libertad que tienen asociada masa y para los cuales puede conocerse las vibraciones o movimientos a lo largo del tiempo. No siempre todos los grados de libertad estáticos que definen el comportamiento de la **estructura tienen asociada "masa", es decir que no son necesarios** en el análisis dinámico.

### *5.3 Respuestas sísmicas debidas al sismo en Y*

Para esta investigación es únicamente de interés estudiar la respuesta en los modelos debido al Sismo en Y, pues una de las limitaciones es que no se considera la aceleración vertical por sismo.

#### *5.3.1 Desplazamientos máximos de la losa*

Se obtuvo el desplazamiento lateral máximo que se presenta en la losa y en todos los casos, tanto en los modelos con diafragmas intermedios como en los que no los incluyen, este valor se presentó a la mitad del vano. Esta ubicación se puede observar señalada con una flecha en la Figura 22.



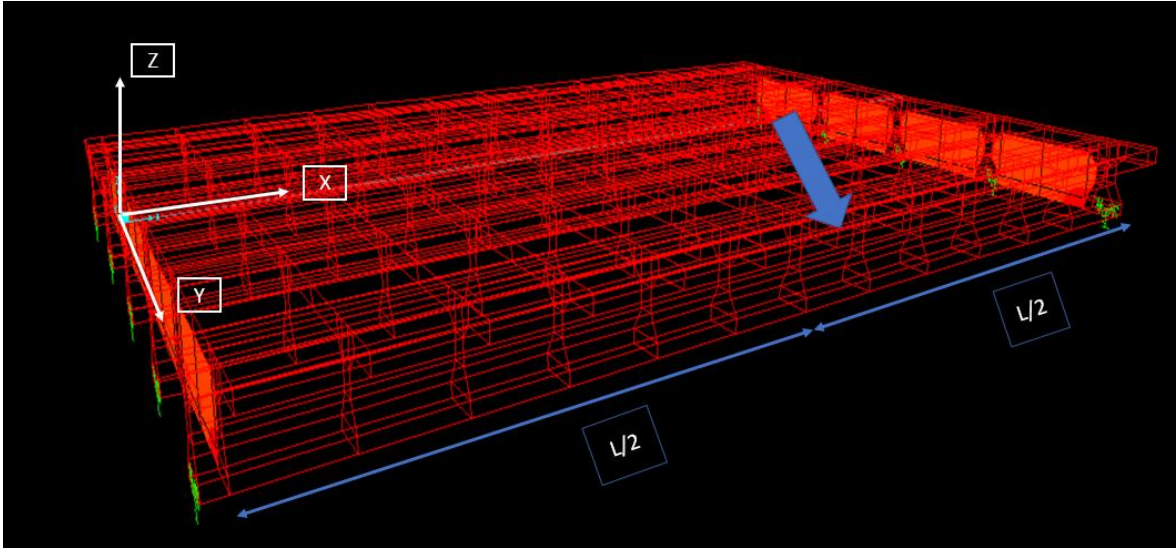


Figura 22. Ubicación del desplazamiento máximo de la losa en dirección Y

Los valores máximos de desplazamientos transversales registrados en cada caso en la zona anteriormente mostrada se aprecian en el Cuadro 4. Como, según lo indica la teoría, los diafragmas intermedios ayudan a que la geometría de las secciones transversales se mantenga inalterada y sus desplazamientos controlados. Se espera que, al agregar diafragmas intermedios, exista un porcentaje de disminución del desplazamiento transversal máximo respecto al valor que se presenta en el caso sin la presencia de estos elementos. En la definición de dicho porcentaje, un valor positivo representa una disminución y un valor negativo un aumento.

Cuadro 4. Desplazamientos máximos laterales a nivel de losa

	L50-0	L50-1	L50-2	L50-3
Uy máx (cm)	1.5754	1.6636	1.6844	1.7102
% Disminución de Uy		-5.6%	-6.9%	-8.6%
	L45-0	L45-1	L45-2	L45-3
Uy máx (cm)	1.0177	1.0846	1.1014	1.121
% Disminución de Uy		-6.6%	-8.2%	-10.2%
	L40-0	L40-1	L40-2	
Uy máx (cm)	0.628	0.6739	0.6887	
% Disminución de Uy		-7.3%	-9.7%	
	L35-0	L35-1	L35-2	
Uy máx (cm)	0.3483	0.3783	0.3866	
% Disminución de Uy		-8.6%	-11.0%	
	L30-0	L30-1		
Uy máx (cm)	0.1975	0.2155		
% Disminución de Uy		-9.1%		
	L25-0	L25-1		
Uy máx (cm)	0.0879	0.0978		
% Disminución de Uy		-11.3%		
	L20-0	L20-1		
Uy máx (cm)	0.0374	0.0417		
% Disminución de Uy		-11.5%		
	L15-0	L15-1		
Uy máx (cm)	0.0149	0.0162		
% Disminución de Uy		-8.7%		

Nota: Todos los valores máximos se presentaron a L/2

Al observar el Cuadro 4 se aprecia que, en todos los casos, al agregar uno o más diafragmas intermedios, en lugar de obtener un porcentaje de disminución del desplazamiento máximo, se presenta un aumento de este valor. Esta tendencia no tiene sentido según los fundamentos teóricos expuestos en la Sección 2.3 de esta investigación. Donde se menciona que, los diafragmas contribuyen a incrementar la rigidez transversal de la sección, con lo que proveen la resistencia necesaria ante las fuerzas laterales y excéntricas que actúan sobre la superestructura.

Entonces, se sabe que el puente es más rígido transversalmente al agregar diafragmas intermedios, por lo tanto, no tiene sentido, que se presenten mayores desplazamientos en una estructura más rígida. Este comportamiento solo se puede deber a un aumento en las demandas producto de una mayor magnitud de masa dinámica, que se presenta al agregar las vigas diafragma, especialmente cuando se coloca en una posición crítica (al centro del claro).

De acuerdo con esto, la hipótesis explicativa para esta tendencia es que los desplazamientos transversales máximos aumentan en un puente al agregar uno o más diafragmas intermedios debido al aumento de demandas que la adición de cargas concentradas/puntuales genera. Para probar esta hipótesis se cambió el material de los diafragmas intermedios por uno Sin Masa, pero con la rigidez real que aporta el considerar este elemento de concreto. Los resultados obtenidos en este caso se aprecian a continuación.

Cuadro 5. Desplazamientos máximos laterales a nivel de losa considerando los diafragmas intermedios Sin Masa

	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
	L50-0	L50-1	L50-2	L50-3
Uy máx (cm)	1.5754	1.5863	1.5005	1.4408
% Disminución de Uy		-0.7%	4.8%	8.5%
	L45-0	L45-1	L45-2	L45-3
Uy máx (cm)	1.0177	1.031	0.9754	0.9365
% Disminución de Uy		-1.3%	4.2%	8.0%
	L40-0	L40-1	L40-2	
Uy máx (cm)	0.628	0.6374	0.606	
% Disminución de Uy		-1.5%	3.5%	
	L35-0	L35-1	L35-2	
Uy máx (cm)	0.3483	0.3567	0.3378	
% Disminución de Uy		-2.4%	3.0%	
	L30-0	L30-1		
Uy máx (cm)	0.1975	0.2017		
% Disminución de Uy		-2.1%		
	L25-0	L25-1		
Uy máx (cm)	0.0879	0.0915		
% Disminución de Uy		-4.1%		
	L20-0	L20-1		
Uy máx (cm)	0.0374	0.0391		
% Disminución de Uy		-4.5%		
	L15-0	L15-1		
Uy máx (cm)	0.0149	0.0153		
% Disminución de Uy		-2.7%		

Nota: Todos los valores máximos se presentaron a L/2

En el Cuadro 5 se aprecia que al colocar un diafragma intermedio (Columna 2) se obtiene un pequeño aumento en la deformación lateral máxima de la parte superior de la superestructura; el valor aumenta entre 0.7 % y 4.5 %. Sin embargo, al observar los casos en los que se consideran dos diafragmas intermedios, colocados a L/3 de los apoyos

(Columna 3) o tres ubicados a cada  $L/4$  (Columna 4) sí se aprecia una disminución de la deformación máxima de los puentes, respecto a la que se obtiene en los puentes sin diafragmas intermedios. Según los datos obtenidos para las distintas luces definidas, el implementar dos diafragmas intermedios disminuye la deformación máxima transversal entre un 3 % y un 5 % aproximadamente y al incorporar tres vigas diafragma se reduce entre un 8 % y un 9 %. En cuanto a las magnitudes de los desplazamientos máximos, se observa que estos aumentan conforme incrementa la longitud del puente, lo que es el comportamiento esperado, pues a mayor masa del sistema, mayores fuerzas sísmicas.

Al comparar los resultados obtenidos en el Cuadro 4 contra los del Cuadro 5, se demuestra que los desplazamientos transversales aumentan significativamente al agregar diafragmas intermedios debido al incremento en las demandas de la estructura por la masa(s) concentrada(s) que se le está(n) introduciendo al sistema. Sin embargo, asignarle una masa de cero a estos elementos transversales de concreto no es una condición real. Por lo tanto, esta diferenciación entre los valores obtenidos considerando o no la masa que agregan los diafragmas solo se presentara para resultados relacionados con desplazamientos. En lo que respecta a fuerzas internas, se trabajará únicamente con los modelos que sí consideran la masa de los diafragmas, pues estos son los que asemejan la realidad.

### *5.3.2 Deformación relativa entre las partes superior e inferior de la superestructura*

Respecto a la deformación transversal relativa, esta se obtiene como la diferencia entre los desplazamientos que se presenten en la parte superior de la losa y la parte inferior de las vigas extremas. Las lecturas se realizaron, en todos los casos, en las siguientes siete ubicaciones del claro: a  $L/4$ ,  $3L/4$ ,  $L/3$ ,  $2L/3$  y  $L/2$  y en ambos apoyos. Estos puntos se pueden identificar señalados con un círculo en la Figura 23.

Al obtener, para cada modelo, las lecturas de deformaciones relativas en estas siete ubicaciones, se extrae la deriva máxima, la cual en cada caso correspondió con la lectura a  $L/2$  de los extremos. En el Cuadro 6 que se muestra a continuación se comparan las deformaciones relativas máximas que se obtuvieron en los distintos prototipos, sin modificar la masa de los diafragmas. Sin embargo, por las razones expuestas en la sección anterior, también se analizan los resultados que se obtienen al asignarle a las vigas transversales una masa de cero; estos se aprecian en el Cuadro 7.

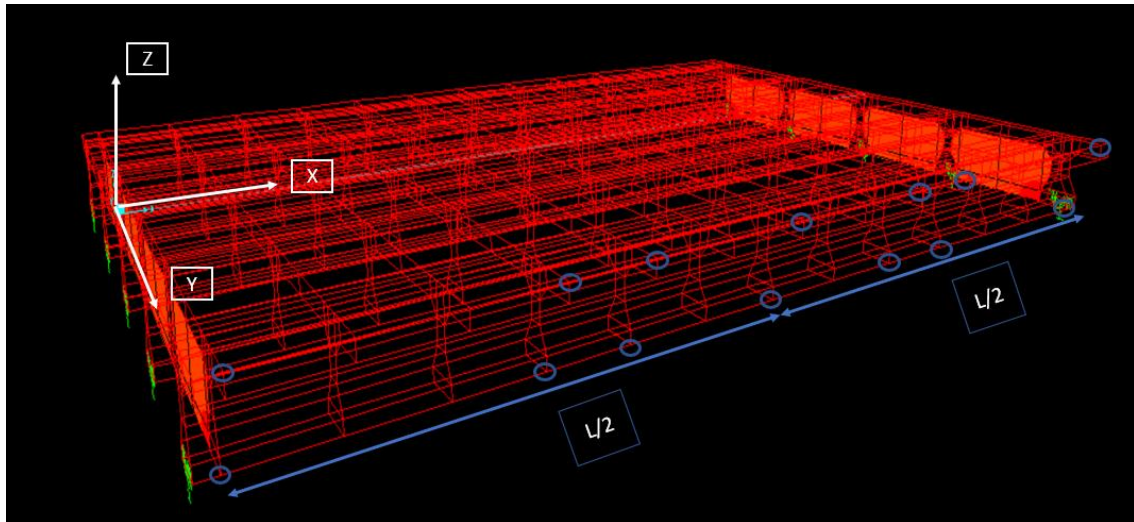


Figura 23. Ubicaciones en la que se midió la deformación relativa entre la parte superior e inferior de la superestructura

Cuadro 6. Deformación transversal relativa máxima considerando los diafragmas intermedios Con Masa

	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
	L50-0	L50-1	L50-2	L50-3
$\Delta U_y$ máx (cm)	2.373	2.3628	2.3704	2.3798
% Disminución de $\Delta U_y$		0.4%	0.1%	-0.3%
	L45-0	L45-1	L45-2	L45-3
$\Delta U_y$ máx (cm)	1.564	1.5394	1.547	1.5567
% Disminución de $\Delta U_y$		1.6%	1.1%	0.5%
	L40-0	L40-1	L40-2	
$\Delta U_y$ máx (cm)	0.981	0.9603	0.9707	
% Disminución de $\Delta U_y$		2.1%	1.0%	
	L35-0	L35-1	L35-2	
$\Delta U_y$ máx (cm)	0.541	0.5392	0.5408	
% Disminución de $\Delta U_y$		0.3%	0.0%	
	L30-0	L30-1		
$\Delta U_y$ máx (cm)	0.308	0.305		
% Disminución de $\Delta U_y$		1.0%		
	L25-0	L25-1		
$\Delta U_y$ máx (cm)	0.1218	0.1307		
% Disminución de $\Delta U_y$		-7.3%		
	L20-0	L20-1		
$\Delta U_y$ máx (cm)	0.0407	0.0478		
% Disminución de $\Delta U_y$		-17.4%		
	L15-0	L15-1		
$\Delta U_y$ máx (cm)	0.0109	0.013		
% Disminución de $\Delta U_y$		-19.3%		

Cuadro 7. Deformación transversal relativa máxima considerando los diafragmas intermedios Sin Masa

	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
	L50-0	L50-1	L50-2	L50-3
<b><math>\Delta U_y</math> máx (cm)</b>	2.373	2.243	2.049	1.924
<b>% Disminución de <math>\Delta U_y</math></b>		5.5%	13.7%	18.9%
	L45-0	L45-1	L45-2	L45-3
<b><math>\Delta U_y</math> máx (cm)</b>	1.564	1.455	1.323	1.241
<b>% Disminución de <math>\Delta U_y</math></b>		7.0%	15.4%	20.7%
	L40-0	L40-1	L40-2	
<b><math>\Delta U_y</math> máx (cm)</b>	0.981	0.904	0.827	
<b>% Disminución de <math>\Delta U_y</math></b>		7.8%	15.7%	
	L35-0	L35-1	L35-2	
<b><math>\Delta U_y</math> máx (cm)</b>	0.541	0.505	0.454	
<b>% Disminución de <math>\Delta U_y</math></b>		6.7%	16.1%	
	L30-0	L30-1		
<b><math>\Delta U_y</math> máx (cm)</b>	0.308	0.283		
<b>% Disminución de <math>\Delta U_y</math></b>		8.1%		
	L25-0	L25-1		
<b><math>\Delta U_y</math> máx (cm)</b>	0.1218	0.1201		
<b>% Disminución de <math>\Delta U_y</math></b>		1.4%		
	L20-0	L20-1		
<b><math>\Delta U_y</math> máx (cm)</b>	0.0407	0.0429		
<b>% Disminución de <math>\Delta U_y</math></b>		-5.4%		
	L15-0	L15-1		
<b><math>\Delta U_y</math> máx (cm)</b>	0.0109	0.0105		
<b>% Disminución de <math>\Delta U_y</math></b>		3.7%		

Cuando se comparan los resultados mostrados en el Cuadro 6 contra los del Cuadro 7 se identifica el mismo comportamiento que el discutido en la Sección 4.3.1, el hecho de agregar masas puntuales a los puentes al incluir los diafragmas intermedios provoca que las derivas relativas máximas se mantengan prácticamente constantes, o que aumenten (como sucede en el caso de los puentes L25, L20 y L15). Por otro lado, al modificar las propiedades de los diafragmas con una masa igual a cero se obtiene en todos los casos (a excepción del puente L20) una disminución de las deformaciones laterales relativas máximas de la superestructura.

Según los datos que se exponen en el Cuadro 7, al agregar un diafragma intermedio en el centro del vano se consiguen reducciones de las deformaciones transversales relativas de entre un 1 % y un 8 %, al incluir dos travesaños se disminuyen los valores en un rango de 13 % a 16 % y finalmente, cuando se cuenta con vigas transversales separadas cada L/4

las deformaciones relativas máximas son entre un 19 % y un 21 % menores a las que se dan en los puentes de la misma longitud que no cuentan con ningún diafragma intermedio.

En busca de esclarecer la razón por la cual en el Cuadro 7, los resultados del puente L20 muestran un aumento en la deformación relativa máxima a pesar de que, se llevara a cabo un análisis que no tomara en cuenta la masa de las vigas transversales. Se decide obtener la razón de rigidez que existe entre la longitud y la altura de las vigas definida para cada caso. Ya que la rigidez transversal de la sección se relaciona con la altura de las vigas al cubo, la razón se calcula como  $\left(\frac{L}{H}\right)^3$ . En la Figura 24 se muestra el resultado de graficar simultáneamente cómo cambia el porcentaje de disminución de  $\Delta U_y$  al incorporar una viga diafragma al centro del claro con la longitud de los puentes y la variación de la razón de rigidez que se presenta en los distintos puentes. También se deciden agregar a esta gráfica los datos del porcentaje de disminución de  $U_y$  a nivel de losa, los cuales se presentan en la Columna 2 del Cuadro 5.

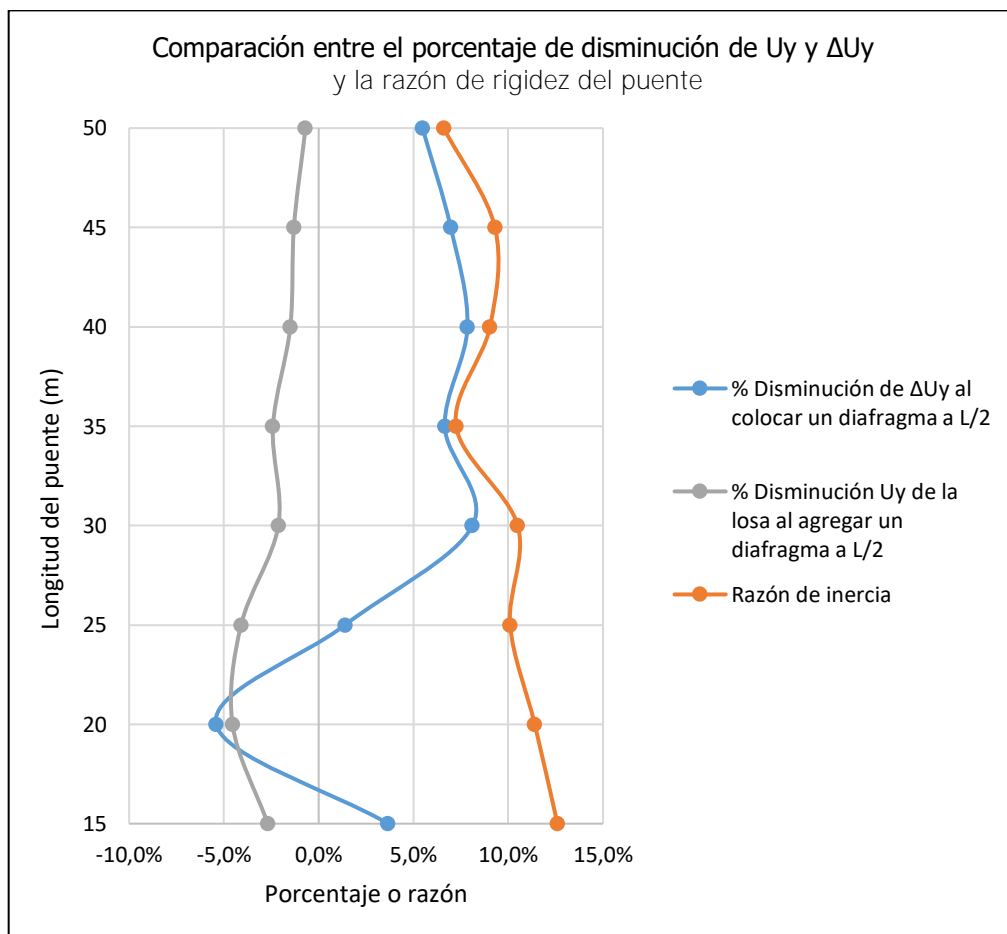


Figura 24. Comparativa entre el porcentaje de disminución de  $U_y$  a nivel de losa y  $\Delta U_y$  al implementar un diafragma intermedio central y la razón de rigidez que presenta cada puente

Al observar la Figura 24 se comprende que los resultados de los desplazamientos guardan una relación con la rigidez que presenta la sección transversal de cada puente. Además, se aprecia como la tendencia se hace más marcada cuando se analiza la deformación relativa de la superestructura, esto probablemente se debe a que esta medición toma en cuenta los desplazamientos en la zona inferior de las vigas longitudinales y este valor se ve modificado a mayor grado con la implementación de los diafragmas intermedios, ya que estas se colocan transversales a las vigas principales. Por lo tanto, el efecto en el cambio de desplazamientos será mayor en puntos de las vigas que en puntos de la losa.

### *5.3.3 Demandas en la conexión entre la losa y las vigas principales*

Para determinar la influencia de los diafragmas intermedios en las fuerzas internas que se presentan en la conexión entre la losa y las vigas principales se analizan los esfuerzos axiales y cortantes que se presentan en distintas ubicaciones del tablero, según las configuraciones de diafragmas de los distintos modelos.

Para los prototipos, LX-0, es decir, de cualquier longitud pero que no considere diafragmas intermedios se tomaron mediciones en las siguientes cinco ubicaciones del claro: A  $L/4$ ,  $3L/4$ ,  $L/3$ ,  $2L/3$  y  $L/2$ . Donde los resultados obtenidos a  $L/2$  se comparan con los de los modelos LX-1, los que se registraron a  $L/3$  y a  $2L/3$  contra los de las pruebas LX-2 y finalmente, los valores leídos en estructuraciones que consideran tres diafragmas intermedios (LX-3) se contrastan contra los de las lecturas a  $L/4$ ,  $L/2$  y a  $3L/4$  en los prototipos LX-0.

Cabe destacar que en los casos en los que se colocaron dos o tres diafragmas intermedios, se obtuvieron los mismos valores en las secciones transversales simétricas respecto al centro del claro. Es decir, los esfuerzos que se presentan a una distancia de  $L/3$  son los mismos que se dan a una distancia de  $2L/3$  y lo mismo sucede con  $L/4$  y  $3L/4$ .

En la Figura 25 se detallan las franjas de conexión entre la losa y las vigas principales en las que se midieron los esfuerzos internos axiales y cortantes. Sin embargo, para hacer las comparaciones entre distintos modelos, se trabajó para cada caso con la franja que presentó mayores magnitudes. Si se observa la Figura 26 se aprecia un acercamiento a una de las franjas en la cual se señala la numeración asignada a los distintos puntos, con el fin de registrar la variación de los esfuerzos a lo largo del espesor de la losa.



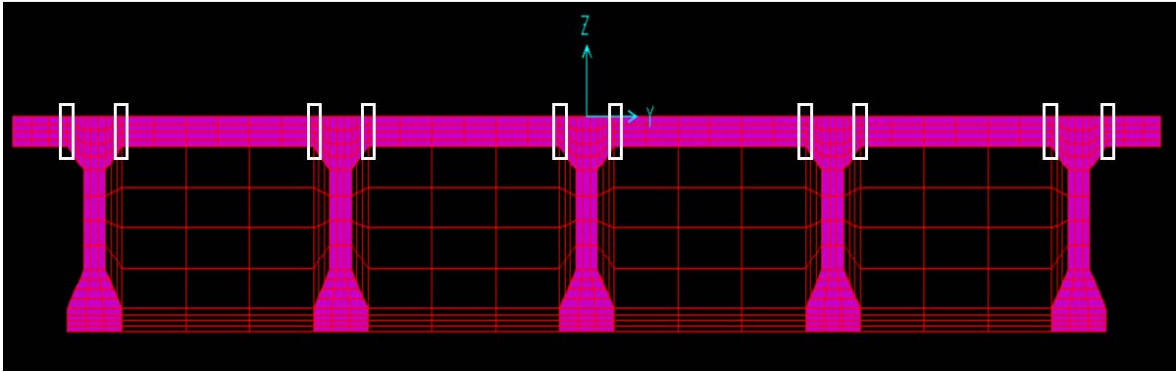


Figura 25. Franjas de conexión entre losa y vigas longitudinales

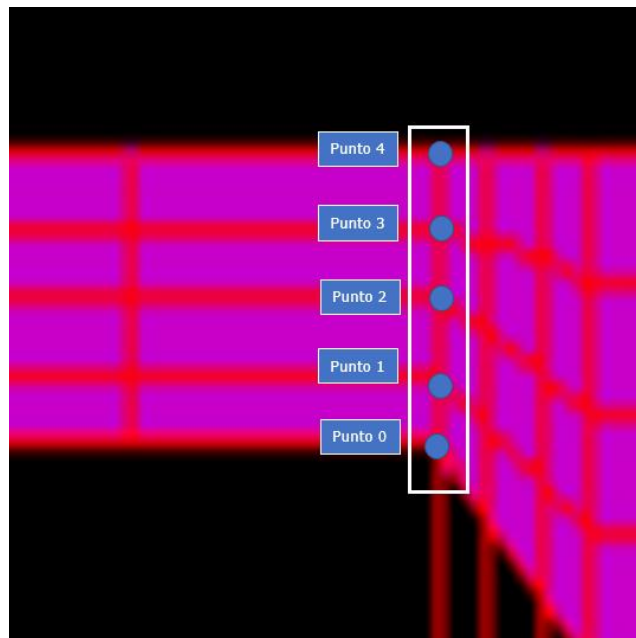


Figura 26. Acercamiento a una franja de conexión entre losa y vigas

Se decidió comparar gráficamente los resultados obtenidos para puentes con diafragmas intermedios contra los que se presentan cuando no se emplean estos elementos. En esta sección se muestran los esfuerzos que se observaron para longitudes representativas (la mayor, la menor y una longitud intermedia del rango analizado), sin embargo, el resto de estos resultados se pueden encontrar en el Apéndice A.

La totalidad de estas gráficas comparativas siguen el siguiente código de color: en anaranjado se grafican los resultados obtenidos cuando se contó con la presencia de uno o más diafragmas intermedios, mientras que las líneas de tendencias azules muestran los datos obtenidos ante la ausencia de diafragmas intermedios. En las Figuras 27, 28 y 29 se aprecian los esfuerzos cortantes ( $S_{23}$ ) máximos que se registraron en la conexión losa y vigas de cada configuración de puente de 50 m, 35 m y 15 m, respectivamente. En lo que

respecta a los esfuerzos axiales (S22), estos se exponen en las Figuras 30, 31 y 32.

Cabe destacar que los esfuerzos arrojados por el programa son todos de signo positivo debido a que, para obtener la respuesta máxima causada por el Sismo en la dirección Y se aplicó un criterio de combinación de los resultados de cada modo de vibración que corresponde al método de la Combinación Cuadrática Completa (COC), el cual se explica en la Sección 2.7 del presente trabajo.

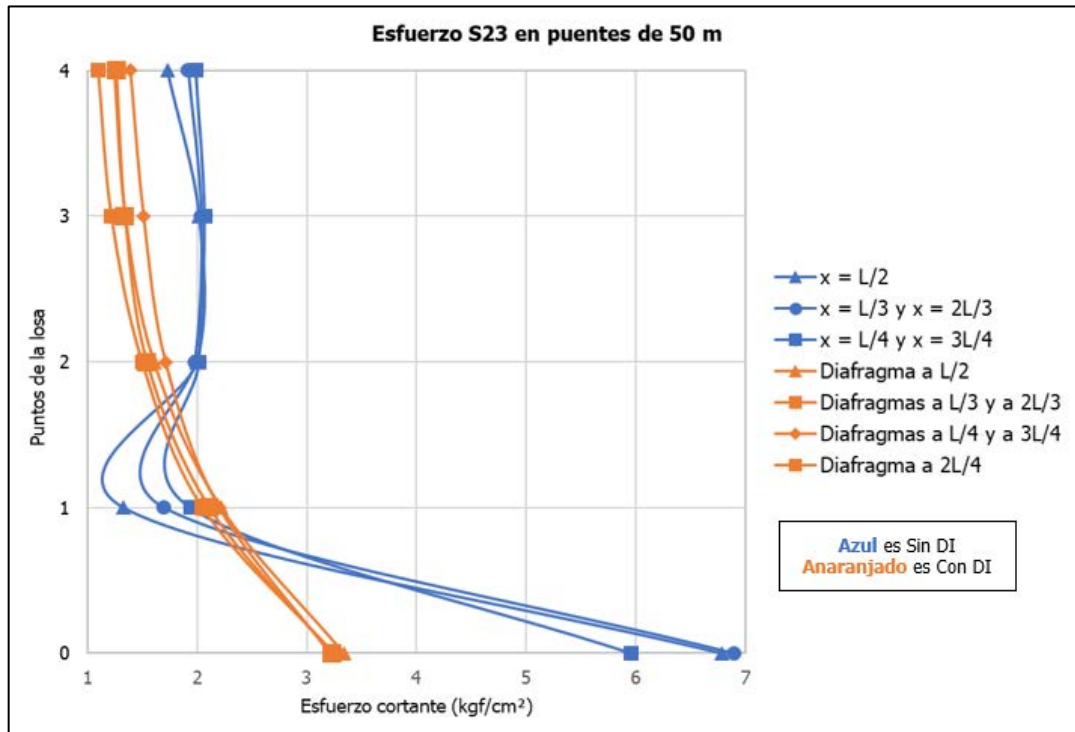


Figura 27. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 50 m

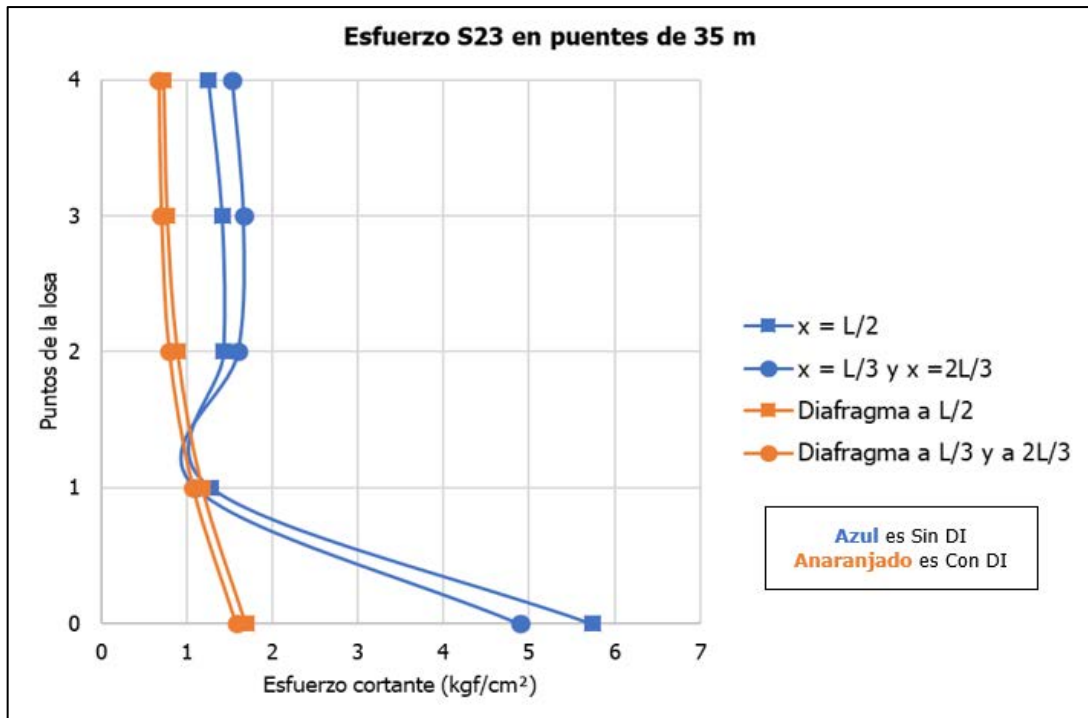


Figura 28. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 35 m

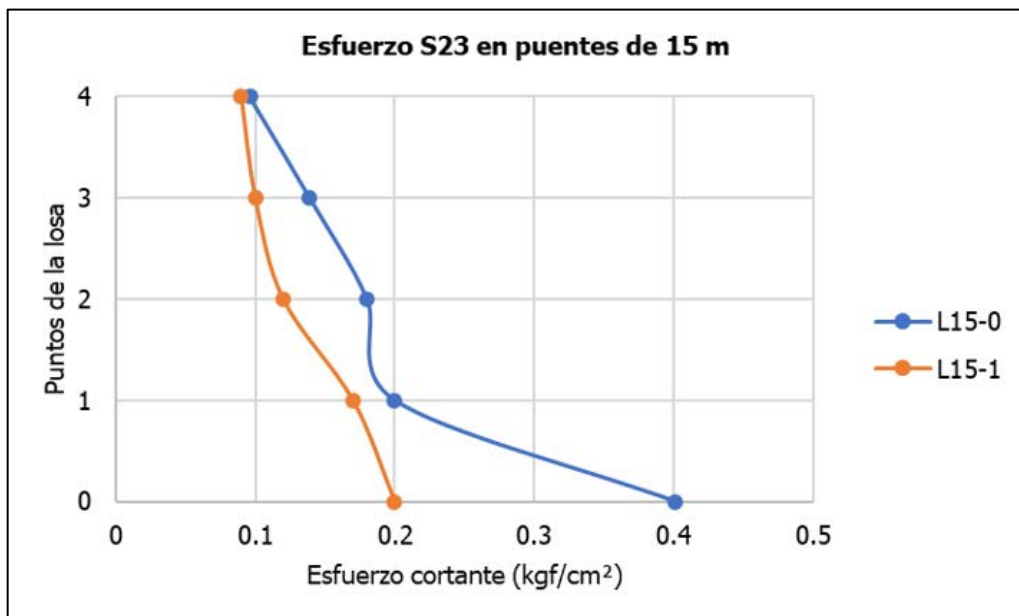


Figura 29. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 15 m

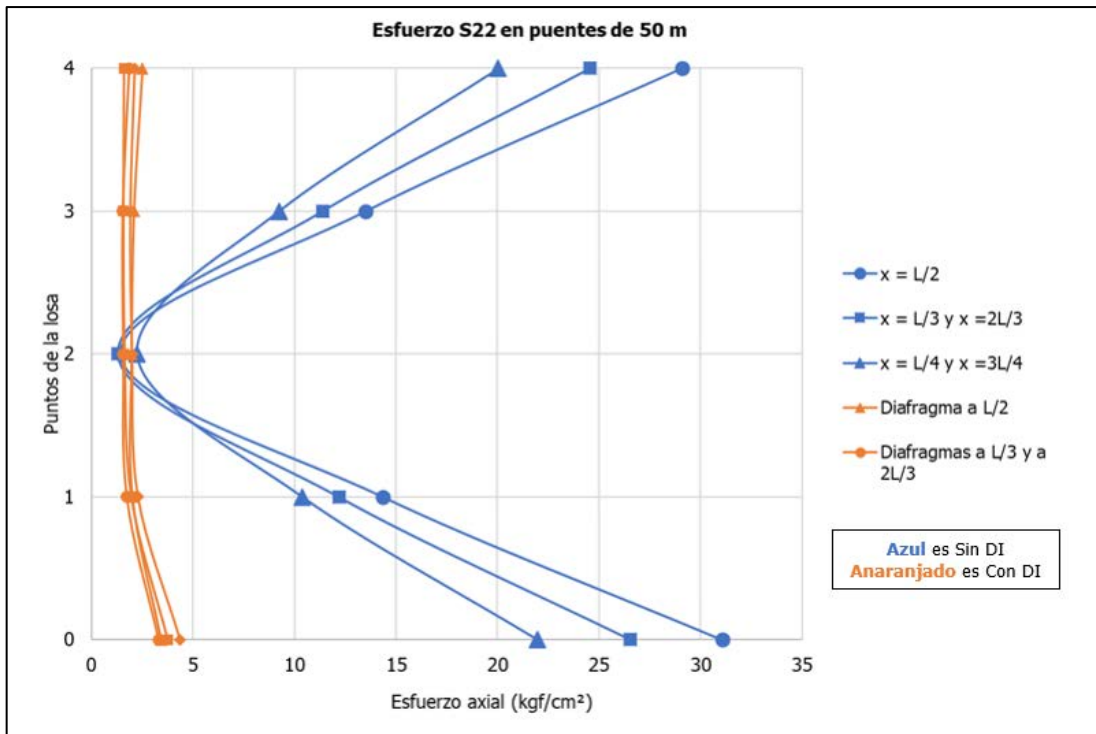


Figura 30. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 50 m

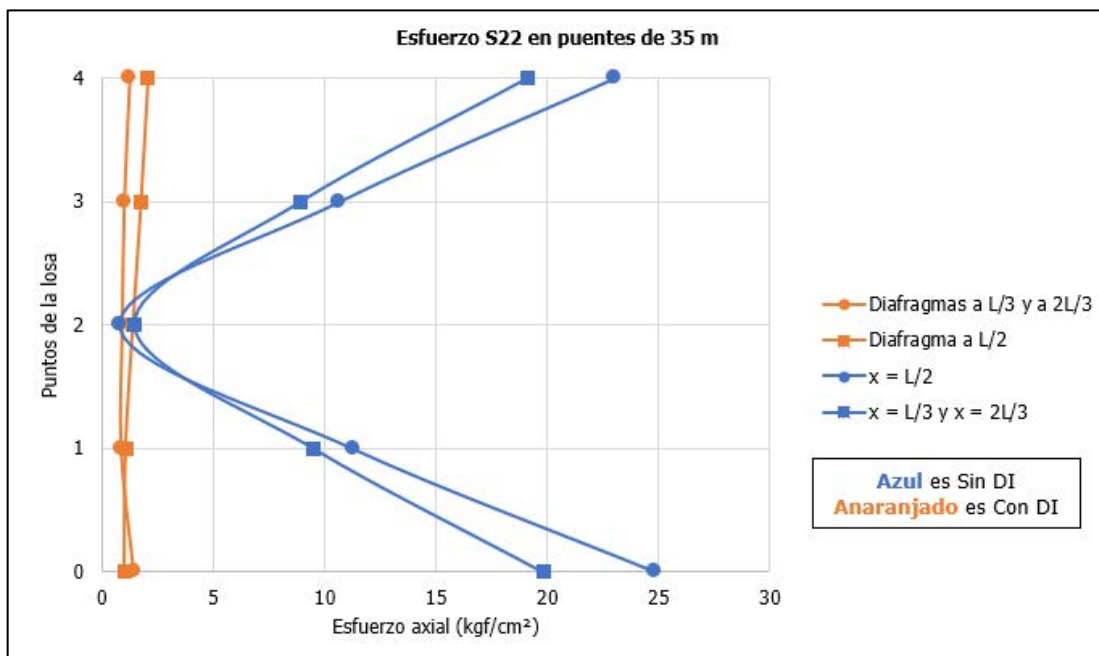


Figura 31. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 35 m

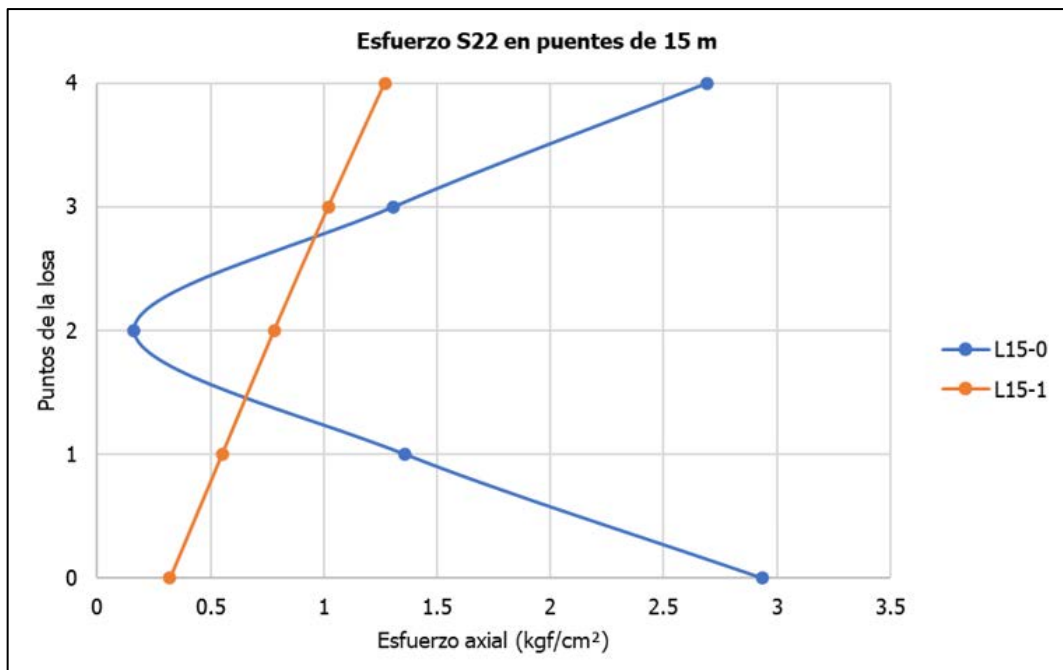


Figura 32. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 15 m

Al observar las Figuras anteriores se puede apreciar como para las tres longitudes mostradas el colocar diafragmas intermedios redujo tanto los esfuerzos cortantes como los axiales. No obstante, en esta forma de presentar los datos no se visualiza el porcentaje de reducción que se presenta en cada caso, por lo tanto, se decide hacer una comparativa tabular entre las distintas lecturas registradas en el Punto 0. Se elige la parte inferior de la losa para este análisis porque en las seis gráficas anteriores fue en este punto en el que se presentó el valor más crítico.

Los resultados se agrupan según la cantidad de diafragmas intermedios agregados. De esta manera, en el Cuadro 8 se muestra el porcentaje de reducción que se da en los esfuerzos internos al implementar un diafragma intermedio al centro del vano. En este se observa una disminución de los esfuerzos axiales de entre un 89 % y un 96 %, por su parte, los esfuerzos cortantes se redujeron en un rango de 50 % a 71 %. Para ambos esfuerzos, el mayor porcentaje de reducción se presenta en los puentes de 35 m de longitud, mientras que el menor se observa en las longitudes extremas del rango de análisis, es decir, en los puentes de 15 m y de 50 m.

Cuadro 8. Porcentaje de reducción de los esfuerzos internos al colocar un diafragma intermedio

Longitud (m)	Esfuerzo axial S22 (kg/cm <sup>2</sup> ) En el punto 0		% Reducción S22	Esfuerzo cortante S23 (kg/cm <sup>2</sup> ) En el punto 0		% Reducción S23
	Sin diafragma x = L/2	1 diafragma a L/2		Sin diafragma x = L/2	1 diafragma a L/2	
50	31.06	3.45	89%	6.78	3.34	51%
45	31.48	2.69	91%	7.14	2.83	60%
40	29.89	2.07	93%	6.94	2.38	66%
35	24.87	1.01	96%	5.74	1.69	71%
30	13.18	0.9	93%	3.21	1.02	68%
25	8.98	0.66	93%	2.25	0.78	65%
20	5.12	0.5	90%	1.3	0.45	65%
15	2.94	0.32	89%	0.4	0.2	50%

El efecto de agregar dos diafragmas intermedios, colocados a L/3 de los apoyos se aprecia en el Cuadro 9. Aquí se visualiza una rebaja de entre 87 % y 94 % de los esfuerzos axiales y de 53 % a 68 % de los esfuerzos cortantes. Para los dos tipos de esfuerzo el menor porcentaje de reducción se observa en los puentes de 50 m y en lo que respecta a la mayor tasa de disminución, esta se da en la longitud de 40 m para el esfuerzo axial y en la luz de 35 m para el caso del esfuerzo cortante.

Cuadro 9. Porcentaje de reducción de los esfuerzos internos al colocar dos diafragmas intermedios

Longitud (m)	Esfuerzo axial S22 (kg/cm <sup>2</sup> ) En el punto 0		% Reducción S22	Esfuerzo cortante S23 (kg/cm <sup>2</sup> ) En el punto 0		% Reducción S23
	Sin diafragma x = L/3	2 diafragmas a L/3		Sin diafragma x = L/3	2 diafragmas a L/3	
50	26.56	3.33	87%	6.89	3.23	53%
45	26.49	2.66	90%	6.75	2.69	60%
40	24.3	1.34	94%	6.03	2.08	66%
35	19.85	1.46	93%	4.89	1.58	68%

Cuando se colocan tres diafragmas intermedios se debe hacer una diferenciación entre las lecturas realizadas a una distancia de L/4 de los apoyos (Cuadro 10) y los datos obtenidos a una distancia de 2L/4 o L/2 de los extremos (Cuadro 11). Solo fueron analizadas las longitudes de 50 m y 45 m con esta distribución de diafragmas y tanto en los resultados del Cuadro 10 como en los del Cuadro 11 se aprecian mayores porcentajes de reducción de los esfuerzos axial y cortante para el puente de 45 m

Cuadro 10. Porcentaje de reducción de los esfuerzos internos a L/4 de los apoyos al colocar tres diafragmas intermedios

Longitud (m)	Esfuerzo axial S22 (kg/cm <sup>2</sup> ) En el punto 0		% Reducción S22	Esfuerzo cortante S23 (kg/cm <sup>2</sup> ) En el punto 0		% Reducción S23
	Sin diafragma x = L/4	3 diafragmas a L/4		Sin diafragma x = L/4	3 diafragmas a L/4	
50	21.97	3.77	83%	5.96	3.21	46%
45	20.68	1.31	94%	5.86	2.58	56%

Cuadro 11. Porcentaje de reducción de los esfuerzos internos a L/2 de los apoyos al colocar tres diafragmas intermedios

Longitud (m)	Esfuerzo axial S22 (kg/cm <sup>2</sup> ) En el punto 0		% Reducción S22	Esfuerzo cortante S23 (kg/cm <sup>2</sup> ) En el punto 0		% Reducción S23
	Sin diafragma x = L/2	3 diafragmas a L/2		Sin diafragma x = L/2	3 diafragmas a L/2	
50	31.06	4.36	86%	6.78	3.25	52%
45	31.48	3.31	89%	7.14	2.68	62%

Al observar los Cuadros anteriores se aprecia que las mayores magnitudes de esfuerzos internos en la losa se dan al centro del claro. Por lo tanto, se exponen a continuación gráficas comparativas de los valores que se presentan en esta ubicación al variar las configuraciones de diafragmas intermedios. Para esto, se toman los valores de la zona inferior de la losa, es decir, las lecturas del Punto 0. En la Figura 33 se aprecian los resultados pertinentes al esfuerzo axial y en la Figura 34 los correspondientes al esfuerzo cortante, para cada puente se grafica en las ordenadas el esfuerzo máximo observado.

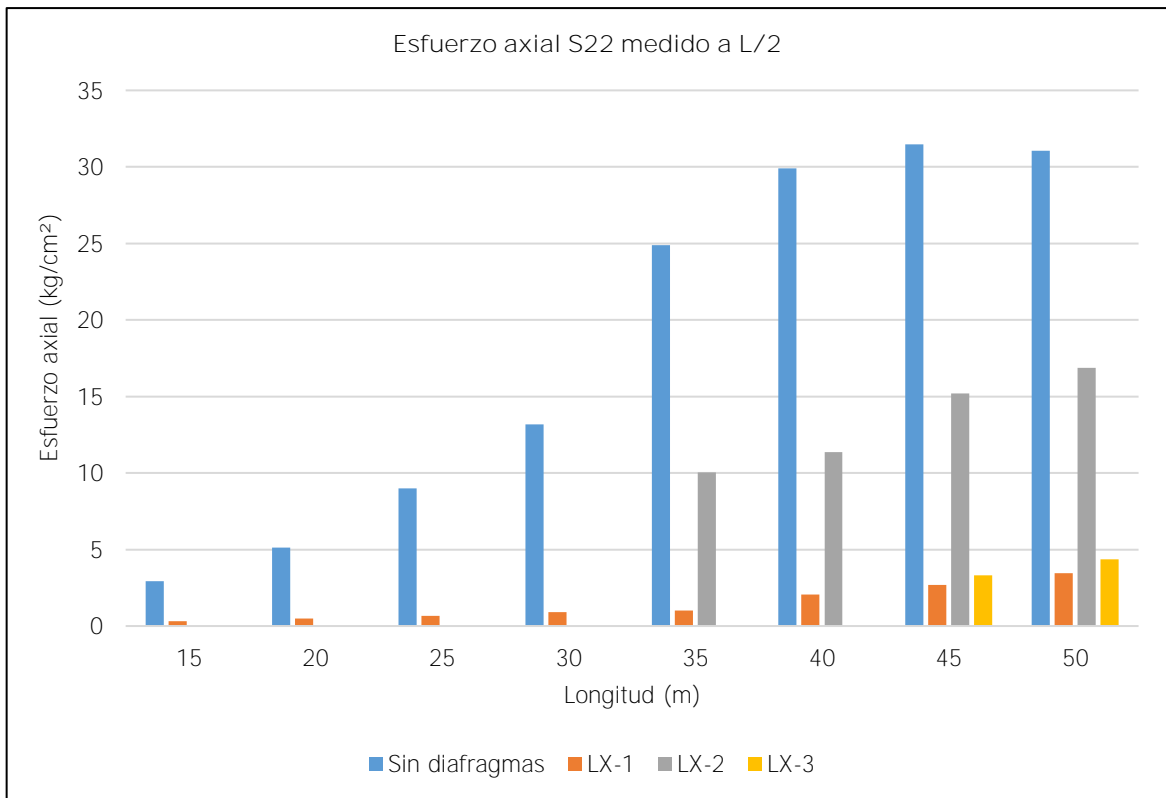


Figura 33. Esfuerzo axial máximo en la conexión losa-viga registrado en el centro del claro

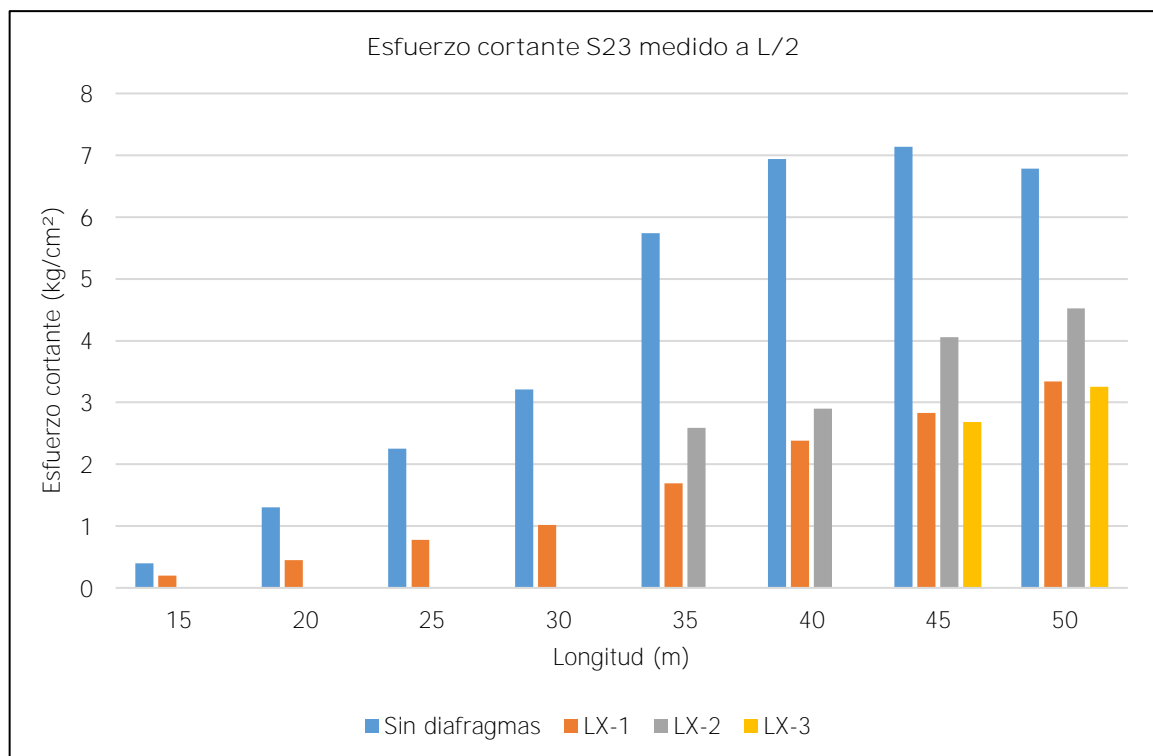


Figura 34. Esfuerzo cortante máximo en la conexión losa-viga registrado en el centro del claro



Al observar el gráfico de la Figura 33 se aprecia que para todas las longitudes estudiadas el colocar un diafragma intermedio al centro del vano reduce enormemente las magnitudes de esfuerzo axial presentes en el centro del vano, mientras que, al implementar dos vigas diafragma posicionadas a  $L/3$  de los apoyos, este valor no disminuye tan drásticamente.

Respecto a los esfuerzos cortantes (Figura 34), estos también muestran la mayor reducción al posicionar una viga diafragma a la mitad de la longitud del puente, pero esta diferencia no es tan significativa como en el caso de los esfuerzos axiales. Al observar los resultados obtenidos para la configuración LX-2, sucede lo mismo que en la Figura anterior, donde las magnitudes sí se ven reducidas pero a menor escala que cuando se cuenta con un diafragma central.

#### 5.3.4 Cortantes en las conexiones entre vigas diafragma y vigas principales

Otra fuerza interna de interés para esta investigación es el cortante vertical que se presenta en las conexiones entre vigas longitudinales y vigas diafragma. Las lecturas se realizaron en las distintas caras de las vigas principales que se encuentran unidas por este elemento transversal. En la Figura 35 se aprecia un corte transversal en el que se observan las cinco vigas longitudinales y el diafragma intermedio que las une, en este diagrama se enumeran las caras de las vigas para facilitar la exposición de los resultados obtenidos y poder saber cuáles son en cada caso las vigas con mayor demanda de cortante.

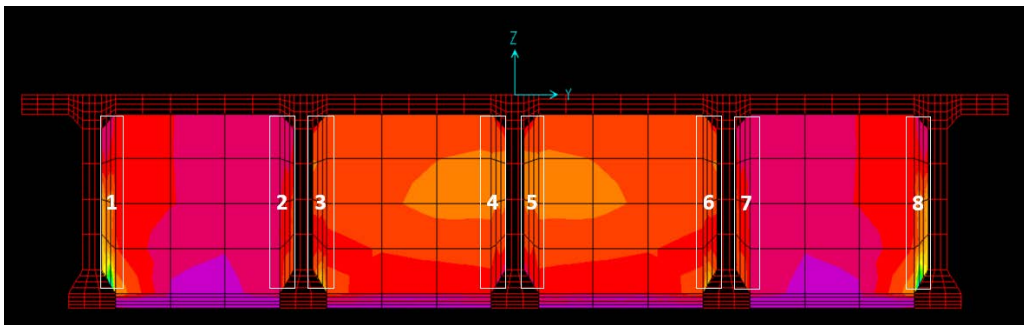


Figura 35. Zonas de conexión entre vigas longitudinales y viga diafragma

Como se expuso en el Capítulo IV de este documento, las vigas diafragma se modelaron con elemento tipo Área al que se le aplicó una discretización por elemento finito. Por lo tanto, para obtener el cortante de conexión en cada cara se obtiene el resultado de todos los cuadros que se encuentran dentro de cada rectángulo señalado en la Figura 35 y se saca un promedio de estos valores. Las lecturas de estas fuerzas internas el programa SAP 2000 las da en Kg/cm, por lo tanto, si se desea obtener la fuerza de diseño, el cortante

promedio de cada cara se debe multiplicar por la altura del rectángulo señalado, la cual varía según la altura de las vigas.

En la Figura 36 se aprecian los cortantes en Kgf/cm que se presentan en los distintos puentes al colocar en cada caso un diafragma intermedio a la mitad del claro, mientras que en la Figura 37 se exponen estos mismos resultados, pero ya multiplicados por la altura de la conexión, es decir, los valores ya se presentan en unidades de fuerza (ton). Al observar estas dos gráficas se visualiza el efecto de la variación en la altura de las vigas, pues las series de datos de la Figura 36 presentan una tendencia similar en todo el rango de longitudes, por tratarse de fuerzas unitarias, mientras que, en la Figura 37 se diferencia de una manera más marcada, la forma de distribución de cortante en las distintas vigas de la sección transversal, ya que en este gráfico sí se toma en cuenta la altura de las conexiones; lo que permite diferenciar la tendencia de comportamiento de la fuerza cortante en las conexiones entre vigas principales y vigas diafragma que se da en puentes cortos de la que se presenta en largos (con base en el rango de estudio).

Al observar las magnitudes de la Figura 37, se aprecia que las vigas que deben resistir mayor fuerza cortante corresponden a las extremas en puentes de 40 m o mayor longitud y a las centrales para las longitudes de 35 m o menores. A pesar de esta diferencia, una constante es que el valor más bajo de cortante se da en las caras externas de las vigas intermedias (entre la central y la extrema).

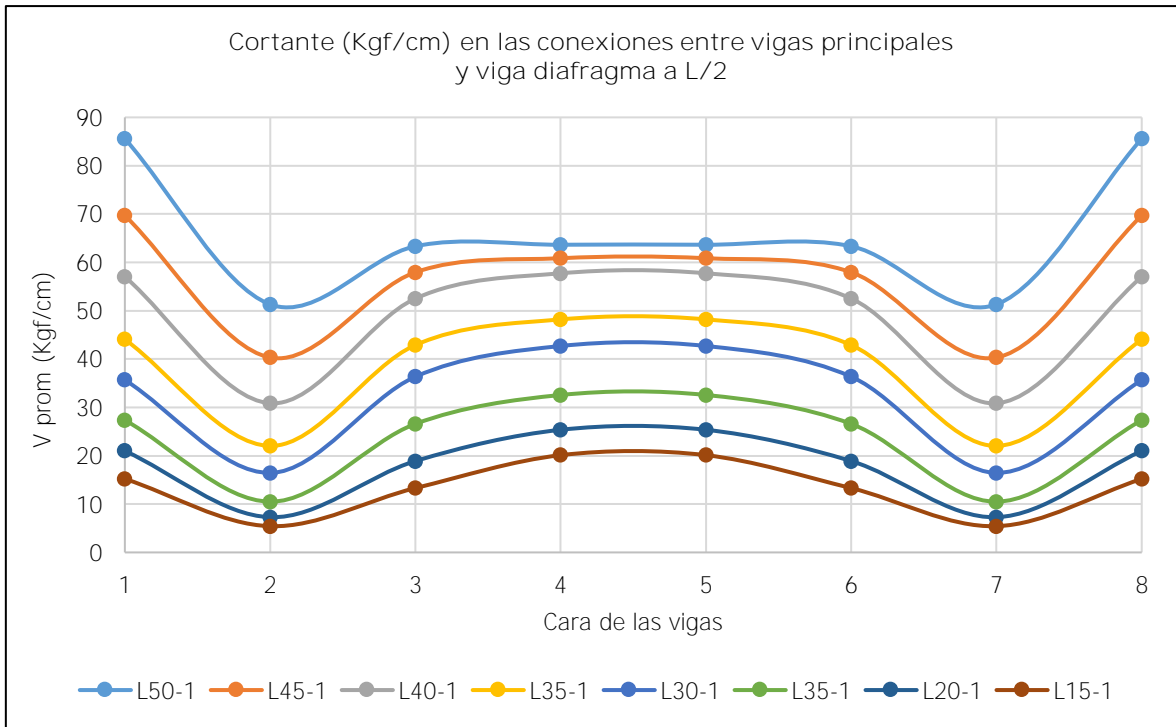


Figura 36. Cortante (Kgf/cm) entre vigas longitudinales y viga diafragma al colocar un diafragma

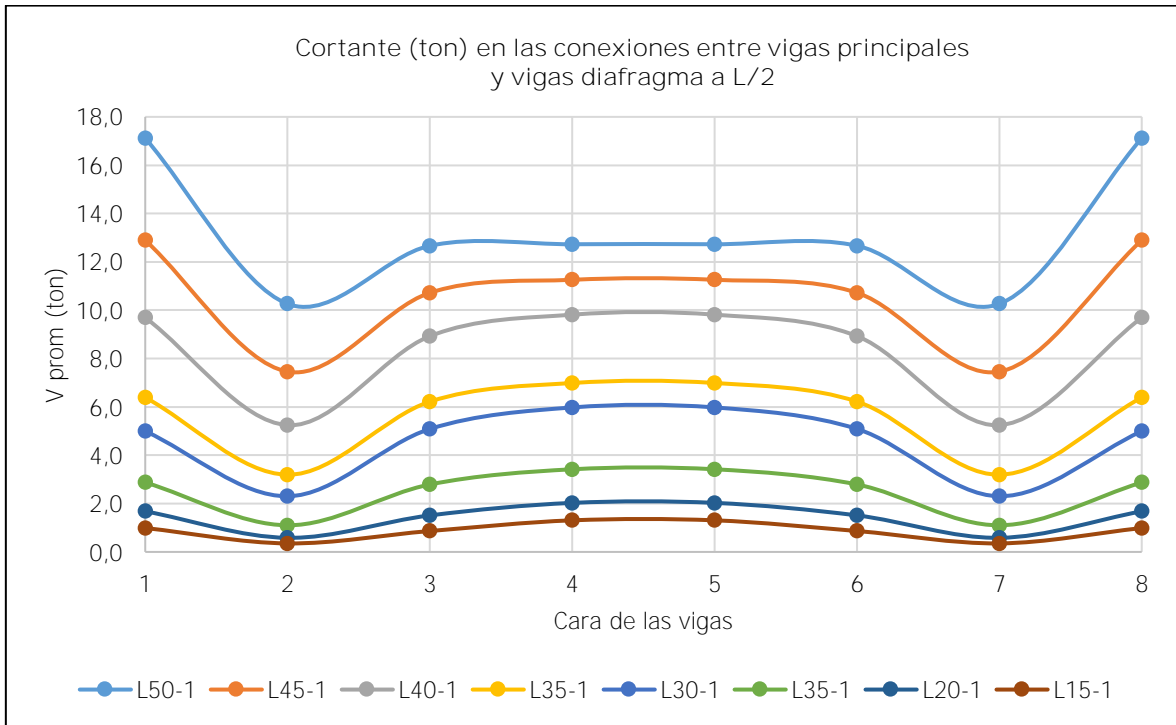


Figura 37. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma al colocar un diafragma

Respecto a los resultados de la fuerza cortante que se presenta en las conexiones entre vigas longitudinales y vigas diafragma al colocar dos o tres diafragmas intermedios, estos se exponen únicamente en unidades de toneladas, pues, es el valor final de interés para proceder al diseño de los elementos; etapa que no se cubre en esta investigación, no obstante, sí se generan recomendaciones para simplificar el diseño de los diafragmas intermedios. En la Figura 38 se muestran los valores obtenidos al colocar dos diafragmas intermedios y en la Figura 39 aparecen las lecturas registradas al implementar tres vigas diafragma, por lo tanto, en esta se incluye tanto la medición a  $L/4$  (que es la misma que se presenta a  $2L/4$ ) como a  $2L/4$ .

Al observar la Figura 38 se aprecia que para los diafragmas ubicados a  $L/3$  de los apoyos los mayores cortantes en la conexión entre estos elementos y las vigas principales se presenta en las vigas extremas en puentes de 50 m y 45 m y en la viga central para las estructuras de 40 m y 35 m. En la Figura 39 se muestran las lecturas obtenidas en las distintas conexiones al colocar 3 diafragmas intermedios colocados a cada  $L/4$  y, como era de esperar, las mayores magnitudes de cortante se presentan en la viga diafragma ubicada al centro del claro. Se aprecia que, al incorporar tres diafragmas, las vigas intermedias de la sección transversal no presentan un pico hacia abajo como en las Figuras anteriores, sino que los datos de la Figura 39 presentan una tendencia parabólica.

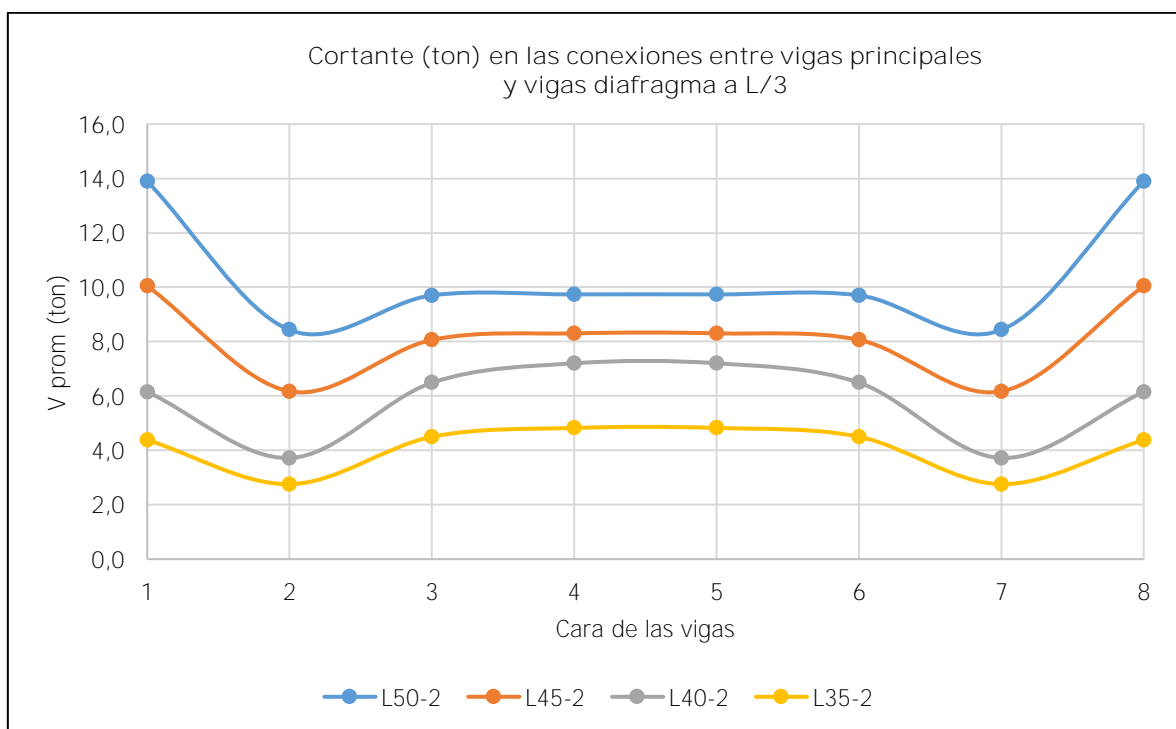


Figura 38. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma al colocar dos diafragmas

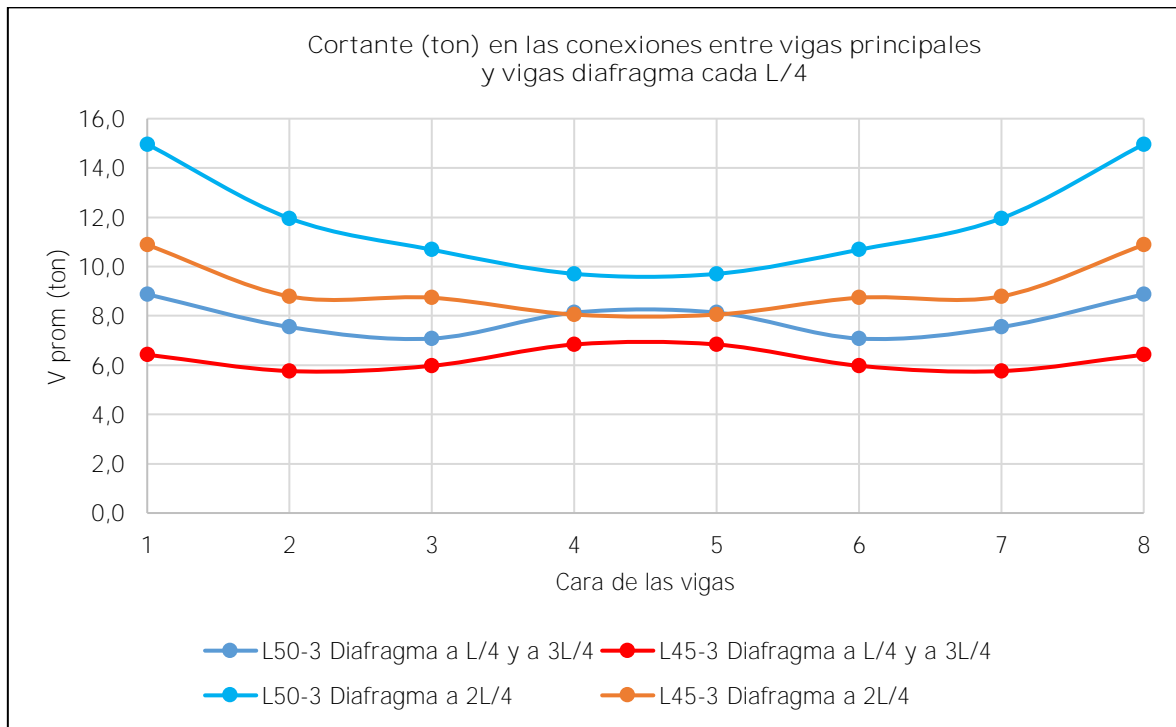


Figura 39. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma al colocar tres diafragmas

Para poder visualizar las diferencias que se aprecian en el cortante vertical de las conexiones entre vigas longitudinales y vigas diafragma al cambiar el número de estos elementos se presenta la gráfica de la Figura 40, a manera de ejemplo, exponiendo los resultados obtenidos en las distintas configuraciones de los puentes de 50 m de longitud. En el Apéndice B se incluyen el resto de las gráficas comparativas para las longitudes en las cuales se analizaron configuraciones de dos y tres diafragmas intermedios.

En la Figura 40 se observa que los cortantes de mayor magnitud se presentan en la configuración L50-1, seguida de la lectura realizada también a L/2 pero con la configuración L50-3, continuando en un orden descendente se encuentran los valores del modelo L50-2 y finalmente, como era esperado, las menores magnitudes de cortante se presentan al colocar diafragmas a una distancia de L/4 de los apoyos.

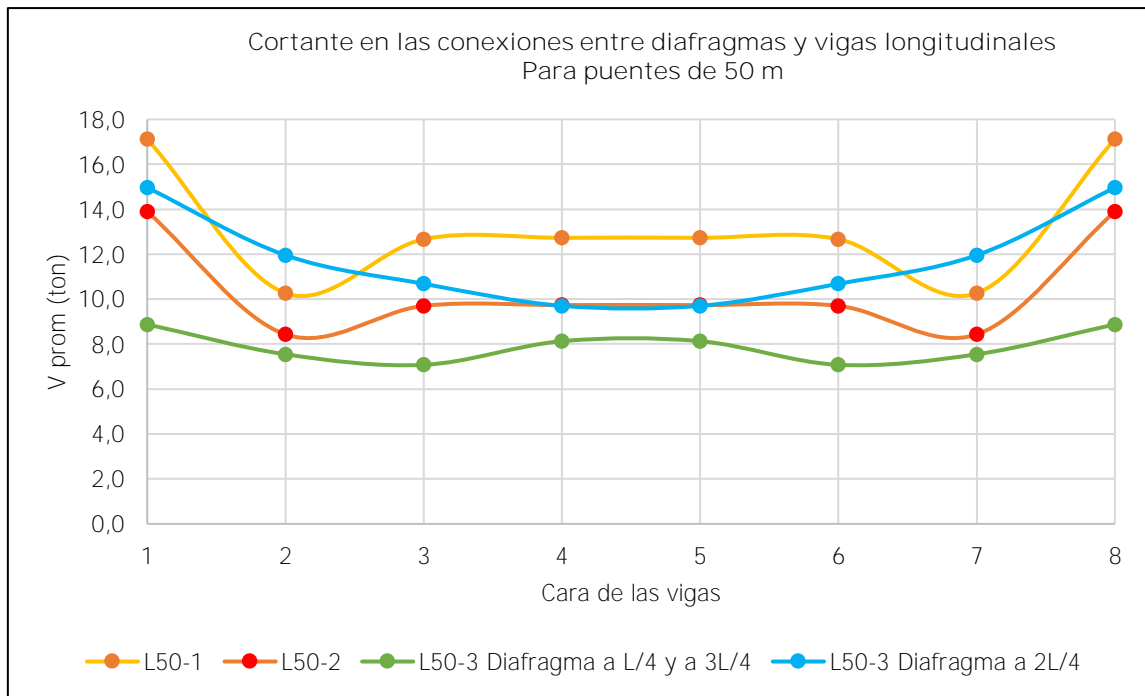


Figura 40. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma para puentes de 50 m

Para facilitar la comparación de datos, se grafica la variación del cortante entre las vigas externas y las vigas centrales para las distintas longitudes de interés, la cual se aprecia en la Figura 41. En esta se implementa una leyenda de marcadores en las líneas de tendencia, de manera que los valores de las vigas exteriores se representan con un cuadrado, mientras que las lecturas registradas en las vigas centrales se identifican con un círculo.

Para los puentes con una longitud menor o igual a 40 m se cumple en todos los casos que el valor de cortante en la viga central es mayor que el de las vigas exteriores. En los puentes restantes, correspondientes a los de mayor luz, se presenta lo contrario, excepto para la medición a  $L/4$  de la configuración LX-3 que se registra para un puente de 45 m. Lo que implica que, no solo afecta la longitud del puente en la distribución de cortante a nivel de sección transversal, sino también la ubicación del diafragma en el tablero, comportamiento que se visualiza en la Figura 41 al observar para una misma longitud la variación en la altura o diferencia de cortante entre las vigas externas (cuadrado) y las centrales (círculo) para cada configuración estudiada. Si se observa la línea negra, que corresponde a la lectura a  $L/2$  cuando se incluyen 3 diafragmas, esta presenta una diferencia más grande entre el cuadrado y el círculo que la línea verde, la cual grafica la medición realizada a  $L/3$ , pues, representa los resultados de la configuración LX-2 y finalmente, la menor diferencia entre los cortantes que se presentan en la viga central y las vigas externas se reporta cuando se coloca un diafragma intermedio a  $L/4$  de los apoyos.

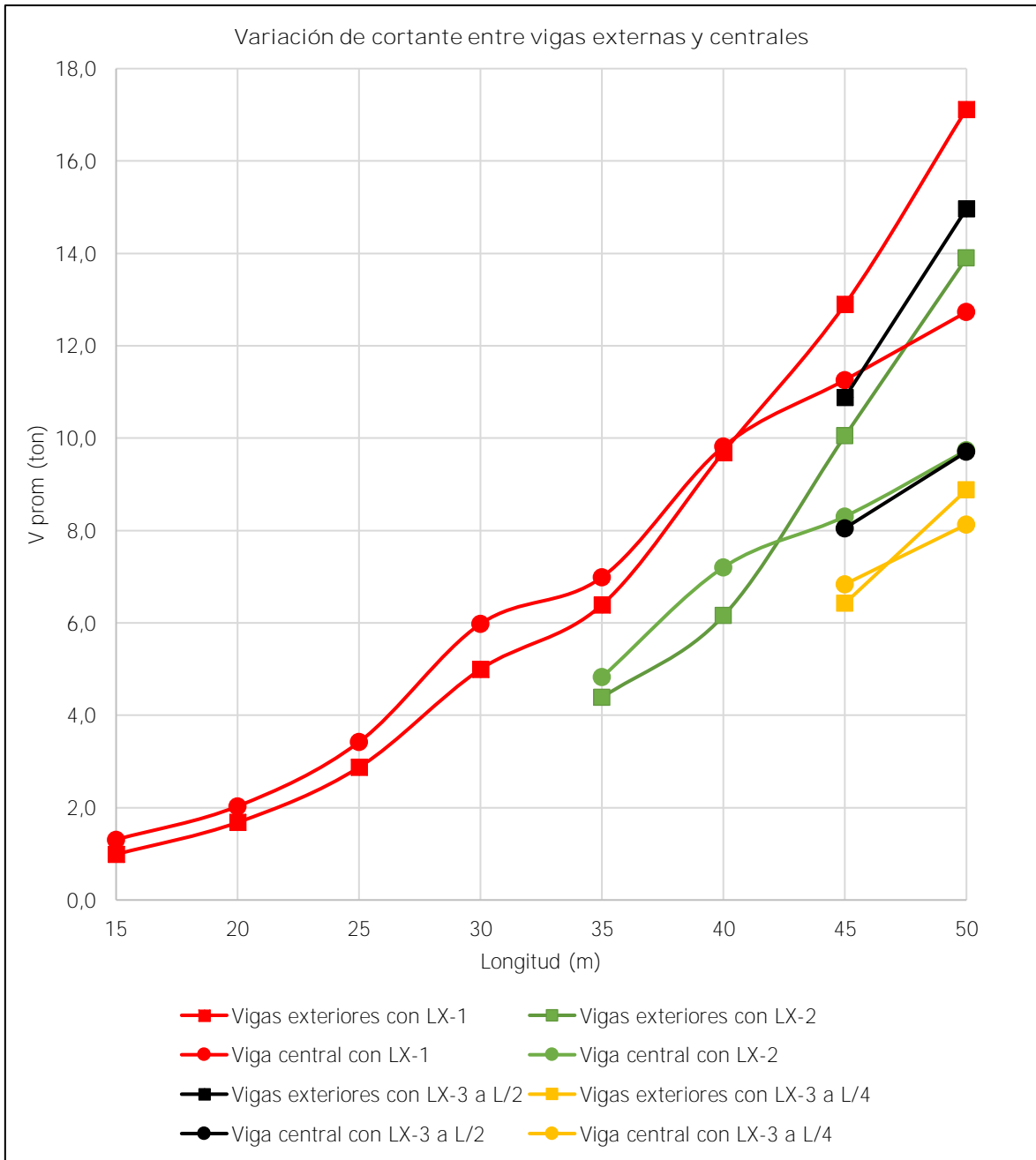


Figura 41. Variación del cortante entre vigas exteriores y vigas centrales de la sección transversal

Tomando en consideración que en las normativas estudiadas para este trabajo no se hace referencia a cómo diseñar los diafragmas intermedios, se desea derivar de esta investigación una expresión conservadora y simple que facilite un valor de fuerza cortante para el diseño del diafragma intermedio sin importar el sitio en el que este se coloque. En la Figura 42 se aprecia un acercamiento a la conexión entre viga principal y viga diafragma y la ubicación del cortante de diseño a considerar para los elementos transversales.

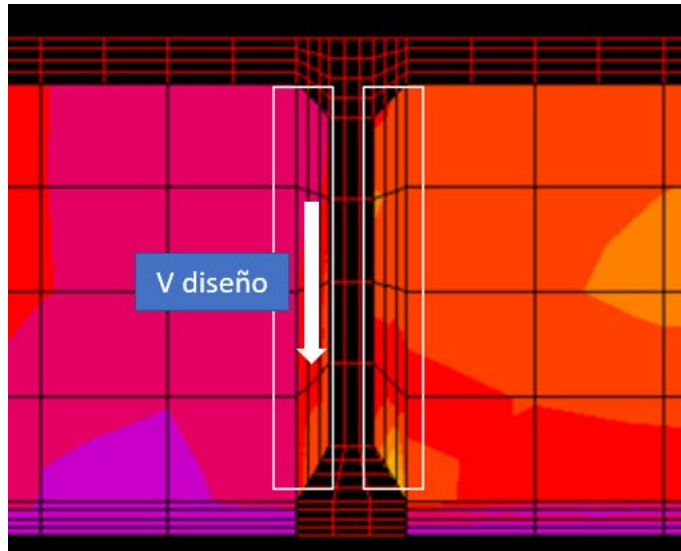


Figura 42. Ubicación del cortante de diseño a considerar para los elementos transversales.

Se puede expresar la fuerza cortante máxima que se presenta en las vigas diafragma de cada puente como un porcentaje de la fuerza sísmica de referencia, la cual se calcula con la expresión de la Ecuación 2.

$$F_{referencia} = C_a \times W_{puente} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$W_{puente}$ : peso permanente de elementos estructurales y no estructurales.

$C_a$ : coeficientes sísmico espectral para los períodos cortos.

En el Apéndice C se encuentra un cuadro que muestra el peso de la superestructura para cada puente estudiado; respecto al coeficiente  $C_a$ , este se obtiene en la Sección 3.2.2 de este trabajo y corresponde a una fracción del valor de gravedad de 0.41. Al estimar para cada caso una fuerza de referencia, se puede saber cuál es el porcentaje de esta fuerza lateral que se distribuye en los diafragmas para el caso de cortantes máximos, lo que permite obtener una tendencia y definir un factor k para obtener rápidamente una fuerza cortante de diseño  $V_{Diseño}$  para cada viga diafragma, cuya expresión se aprecia en la Ecuación 3.

$$V_{Diseño} = k \times F_{sismica\ máx} = k \times C_a \times W_{puente} \quad \text{Ecuación 3}$$

Como se discutió anteriormente, al considerar distintas configuraciones de diafragmas intermedios para una misma longitud (Figura 40 y las Figuras del Apéndice B), los cortantes de mayor magnitud se presentan en la estructuración LX-1. Por lo tanto, solo se utilizan los



factores k resultantes al colocar exclusivamente un diafragma central para estar del lado conservador y poder hacer recomendaciones generalizadas. En la Figura 43 se aprecia la gráfica de cómo varía el factor k conforme aumenta la longitud del vano; cabe destacar que esta se deriva del Cuadro C-2 que se expone en el Apéndice C.

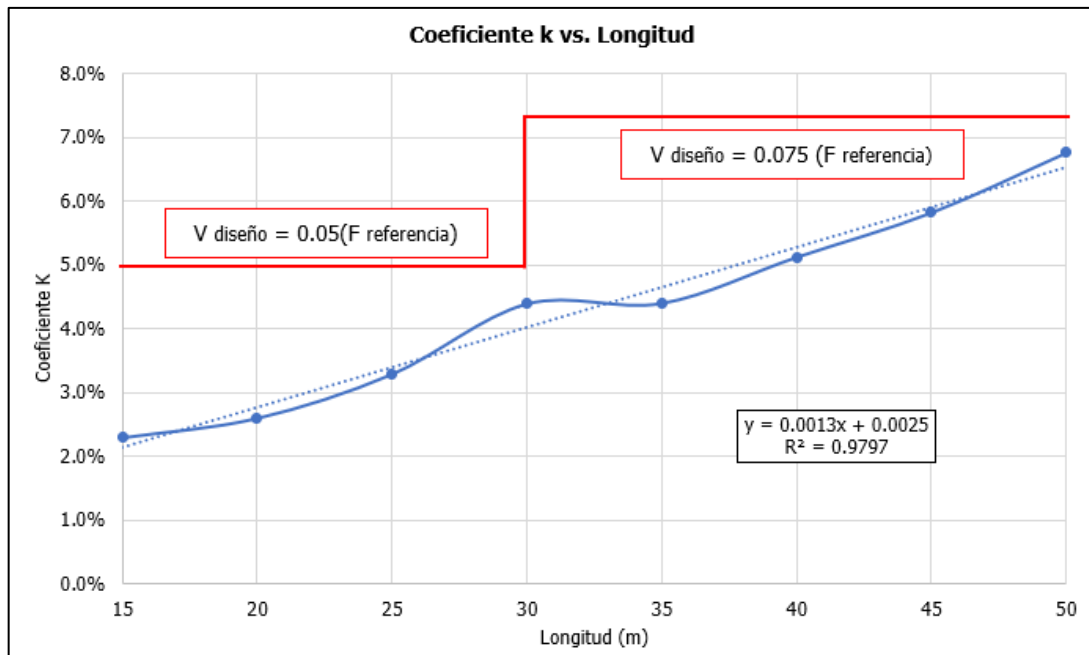


Figura 43. Relación del factor k respecto al cambio de longitud del puente

Para estar del lado de lo seguro, se propone una función por partes que se encuentre por encima de todos los valores. Para longitudes entre 15 m y 30 m inclusive, se recomienda un coeficiente k de 5 % y para vanos mayores a 30 m y hasta 50 m se sugiere un 7.5 %, con estos valores se procede a estimar un cortante de diseño para los diafragmas intermedios siguiendo la Ecuación 3.

### 5.3.5 Eficacia de las distintas configuraciones de diafragmas intermedios

Con el fin de medir la eficacia de colocar un diafragma central versus considerar dos o tres diafragmas intermedios se comparan los resultados obtenidos con las distintas configuraciones para una misma longitud. La cuantificación del desempeño toma en cuenta los dos ámbitos estudiados en esta investigación, los cuales son desplazamientos y fuerzas internas. Como el efecto en el cambio de desplazamientos resultó mayor en puntos de las vigas que en puntos de la losa, se utilizan los datos mostrados en la Sección 5.3.2 para obtener la eficacia respecto a las traslaciones. Por otra parte, para calcular la eficacia respecto a las fuerzas internas se trabaja con los resultados expuestos en la Sección 5.3.3.

En el presente estudio se debe entender eficacia como la siguiente expresión:

$$Eficacia = \frac{Valor\ actual}{Valor\ ideal} \times 100 \quad Ecuación\ 4$$

La Ecuación 4 pretende demostrar en qué medida se logra reducir las magnitudes al **incorporar diafragmas intermedios a los modelos. Por esta razón, el "valor actual" representa lo obtenido sin considerar vigas transversales y el "valor ideal" o valor al que se quiere llegar, no se debe entender como uno fijo, sino como el valor más bajo posible.**

Por lo tanto, para el caso de la eficacia respecto a control de desplazamientos, la expresión a aplicar es:

$$Eficacia_{\Delta Uy} = \frac{\Delta Uy_{m\acute{a}x\ Sin\ diafragma}}{\Delta Uy_{m\acute{a}x\ Con\ 1,2,0\ 3\ diafragmas}} \times 100 \quad Ecuación\ 5$$

En lo que respecta a la eficacia de reducción de las fuerzas internas, esta se calcula como:

$$Eficacia_{S_{22,S23}} = \frac{S_{22,23\ Sin\ diafragma}}{S_{22,23\ Con\ 1,2,0\ 3\ diafragmas}} \times 100 \quad Ecuación\ 6$$

Como la máxima deformación relativa de la superestructura se dio en todos los casos a la mitad del vano, los resultados de eficacia de las distintas longitudes si son comparables entre ellas, pues el valor de referencia  $\Delta Uy_{m\acute{a}x\ Sin\ diafragma}$  se midió en el mismo punto en todos los casos. Sin embargo, es diferente para la cuantificación de la eficacia de reducción de los esfuerzos internos, puesto que, los valores de referencia  $S_{22,23\ Sin\ diafragma}$  se midieron en distintos lugares, los diferentes resultados de  $Eficacia_{S_{22,S23}}$  no están calibrados para poder compararse entre ellos. Lo ideal es que los resultados sean siempre mayores a 100 %; si se presenta algún valor menor a 100 %, se hablará de ineficacia.

La eficacia respecto al control de desplazamientos según la cantidad de diafragmas incorporados se aprecia en el gráfico de la Figura 44. En general, todos los resultados se encuentran en un rango de entre 95 % y 130 %, siendo el valor que se presentó para el puente de 20 m, el único valor que muestra ineficacia. Al observar las distintas series de datos se concluye que la configuración de tres diafragmas intermedios es la que alcanza mayor eficacia en la reducción de la deformación transversal relativa entre la parte superior de la losa y la parte inferior de las vigas longitudinales y la estructuración que incluye únicamente un diafragma central es la que reporta porcentajes más bajos de eficacia.

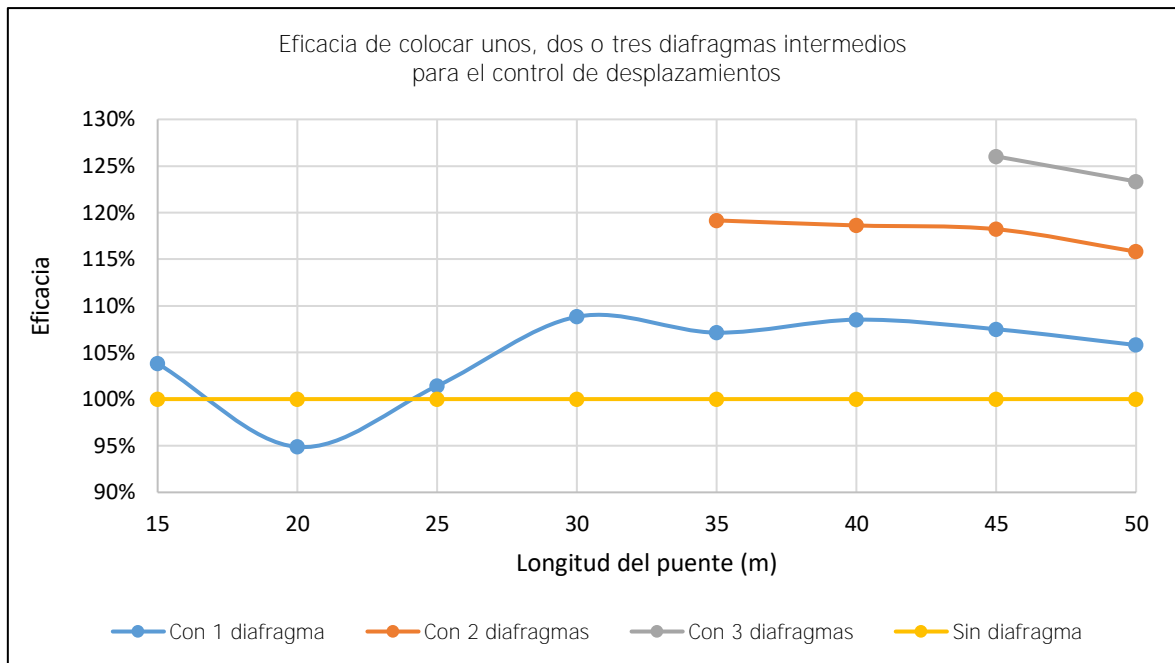


Figura 44. Eficacia en el ámbito de desplazamientos

Por otro lado, la eficacia de reducción de las fuerzas internas en la conexión entre la losa y las vigas longitudinales se muestra en las Figuras 45 y 46, exponiendo los resultados obtenidos para los esfuerzos axiales y cortantes, respectivamente. En ninguno de los gráficos se presentan valores de ineficacia, por el contrario, se muestran porcentajes particularmente altos, especialmente en la Figura 45, en la cual todos los resultados están en un rango de 500 % a 2500 %, lo que representa un comportamiento sumamente eficaz ante la disminución de los esfuerzos axiales. En lo que concierne a la eficacia en la reducción de esfuerzos cortantes, los porcentajes se presentan en un rango de 150 % a 350 %.

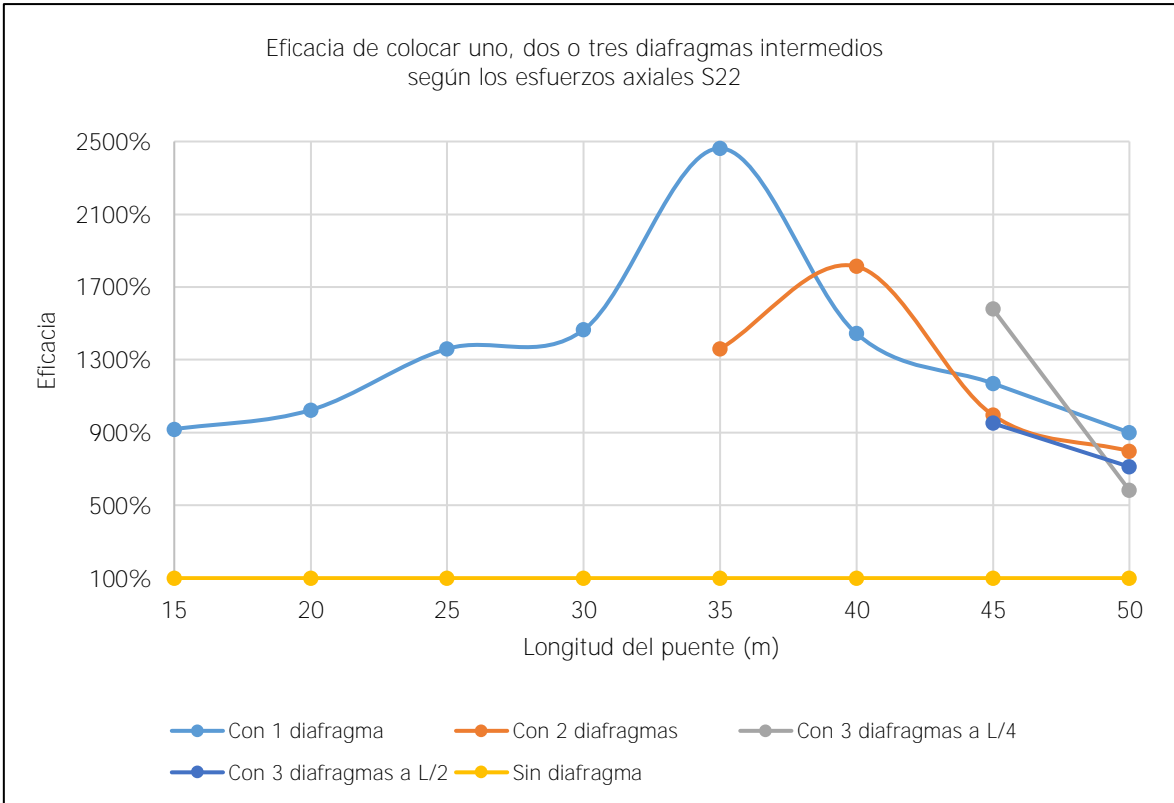


Figura 45. Eficacia respecto a los esfuerzos axiales

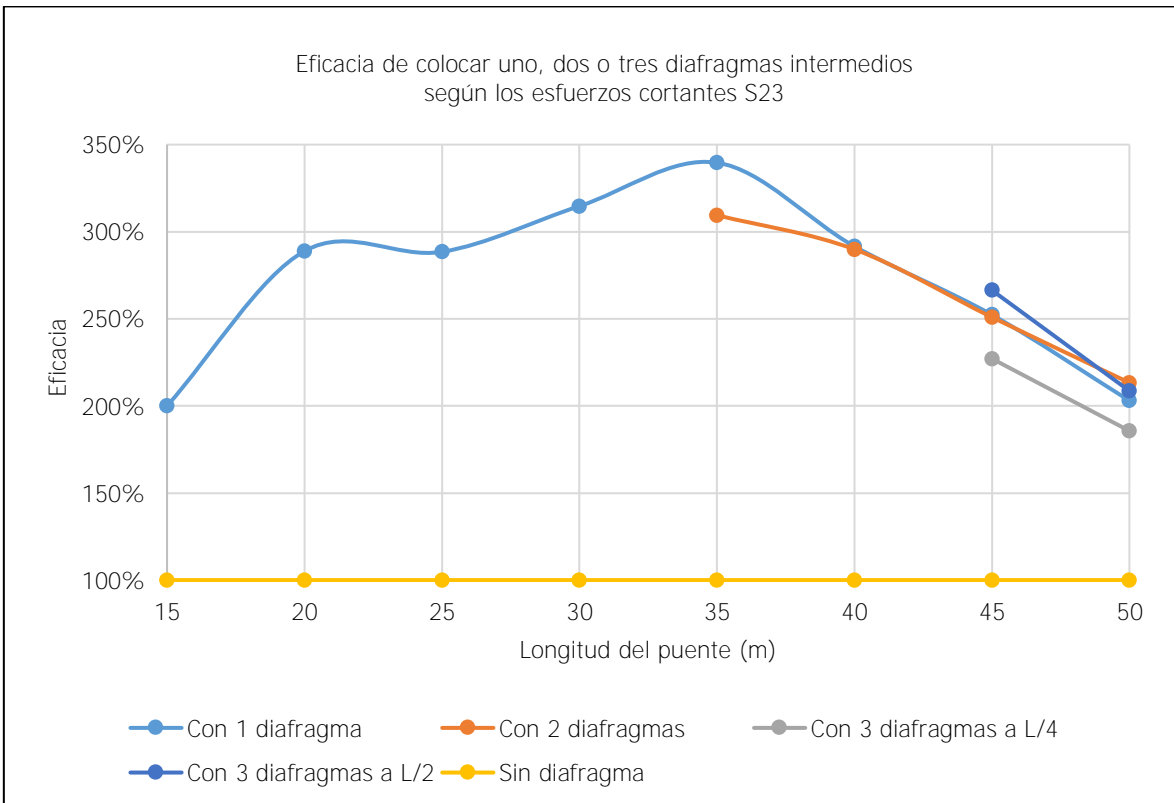


Figura 46. Eficacia respecto a los esfuerzos cortantes

Al observar tanto en la Figura 45 como en la Figura 46 la serie de datos correspondiente a implementar un diafragma central se aprecia que en ambos casos los menores porcentajes de eficacia se presentan en los puentes con la mayor y la menor longitud del rango en estudio, mientras que las mayores eficacias se observan en el puente de 35 m.

Respecto a la configuración que considera dos diafragmas intermedios, para el caso de los esfuerzos cortantes se aprecia mayor eficacia conforme menor es la longitud del puente. Mientras que, para los esfuerzos axiales se presenta un pico de mayor eficacia para el puente con una luz de 40 m.

Finalmente, la estructuración que contempla colocar un diafragma intermedio cada  $L/4$  presentó para las dos distintas ubicaciones mayores porcentajes de eficacia en el prototipo del puente de 45 m que en el de 50 m.

### *6.1 Conclusiones*

El propósito de esta investigación es el de evaluar la influencia que tiene la presencia de diafragmas intermedios en la respuesta sísmica de puentes de vigas de concreto restringidos transversalmente en los apoyos y con un solo vano. Para lo cual se aplicó una metodología de modelaje estructural basado en el método modal espectral y un análisis por elementos finitos.

En los modelos desarrollados variaba la longitud en un rango de 15 m a 50 m y la cantidad de diafragmas intermedios, ya que se estudiaron configuraciones con uno, dos, tres o sin diafragmas intermedios.

A partir de los resultados obtenidos del modelaje se presentan las conclusiones de este estudio referentes al comportamiento de los distintos prototipos ante cargas sísmicas actuando en el sentido transversal del puente, es decir, ante un sismo en la dirección Y.

#### *6.1.1 Desplazamientos en la dirección Y*

Se demostró que, al considerar vigas diafragma de concreto, los desplazamientos transversales en puentes que incluyen diafragmas intermedios en su estructuración son mayores a los que se presentan en la ausencia de estos elementos. Por lo tanto, el inconveniente de usar diafragmas de concreto es que incrementan los desplazamientos porque la masa propia de los diafragmas es importante y genera un aumento en las fuerzas sísmicas.

A pesar de no ser una condición realista, se realizó un análisis eliminando la masa de los elementos transversales el cuál sí mostró reducciones en los desplazamientos transversales tras la incorporación de diafragmas intermedios, por lo que se afirma que estos elementos en efecto aumentan la rigidez de la estructura en esta dirección.

Las mayores reducciones se presentan en las configuraciones con vigas transversales separadas cada  $L/4$  donde los desplazamientos máximos de la losa disminuyen alrededor de un 8 % y un 8.5 % y las deformaciones relativas máximas decrecen entre un 19 % y un 21 % respecto a las que se dan en los puentes que no cuentan con diafragmas intermedios.

De estos resultados obtenidos sin considerar la masa de las vigas diafragma se puede concluir que el efecto de control de desplazamientos transversales que aportan estos elementos es mayor en los puntos de las vigas longitudinales que en los puntos de la losa.

Además, se concluye que, ante una carga sísmica en la dirección transversal tanto el desplazamiento máximo de la losa como la mayor deformación relativa entre la parte superior e inferior de la superestructura se presentan a la mitad del vano, sin importar la longitud del puente o la configuración de diafragmas intermedios que se utilice.

### *6.1.2 Esfuerzos en la conexión entre la losa y las vigas principales*

Desde el punto de vista de disminución de esfuerzos en la conexión entre la losa y las vigas longitudinales se evidencia que los diafragmas intermedios contribuyen enormemente a esto, pues, cambian el esquema en el que se distribuyen los esfuerzos localmente.

Los esfuerzos internos que se presentan en esta conexión a una distancia determinada de los apoyos se ven disminuidos al colocar en ese mismo punto un diafragma intermedio. Los esfuerzos axiales se reducen entre un 83 % y un 96 % mientras que, los esfuerzos internos del tipo cortante decrecen entre un 46 % y un 71 %. Los valores varían dentro de cada rango mencionado dependiendo de la zona del tablero donde se realizan las lecturas y de los largos de las estructuras.

En general, las mayores magnitudes de esfuerzos internos en la losa se dan a  $L/2$  de los apoyos, por lo que colocar una viga diafragma en esa zona es altamente conveniente. Mientras que al implementar dos diafragmas intermedios ubicados a  $L/3$  de los bastiones, no se alcanza una reducción tan eficaz de las fuerzas internas máximas que se presentan al centro del puente. Por lo tanto, se concluye que el efecto que tiene la presencia de diafragmas intermedios en los esfuerzos internos de la conexión entre la losa y las vigas longitudinales se ve más influenciado por la posición en la que estos elementos se utilicen que por la cantidad.

Es importante resaltar que, aunque la reducción de los esfuerzos en la conexión entre la losa y las vigas principales es significativa, no siempre se va a necesitar de esta disminución, ya que, como se expuso en la Sección 4.3.3 en los puentes más cortos del estudio se presentan bajas magnitudes de esfuerzos en esta conexión para el caso inicial de una estructuración sin diafragmas intermedios; y como estos valores ya son bajos no precisa una reducción. Por otro lado, en puentes más largos el incluir diafragmas intermedios sí

presenta una reducción significativa y muy beneficiosa.

Además, se concluye que en un análisis por cargas sísmicas laterales que afecten la estructura, los esfuerzos cortantes que se presentan en la losa no son tan problemáticos como los axiales.

### *6.1.3 Cortante en las conexiones entre vigas diafragma y vigas principales*

La demanda de cortante vertical en las conexiones entre vigas principales y vigas diafragma depende de estas últimas y de su ubicación respecto a los apoyos. Los cortantes de mayor magnitud se presentan en la configuración que considera solo un diafragma intermedio, seguidos de los presentados en el diafragma central de la estructuración que considera tres vigas transversales. Conforme la posición de los diafragmas intermedios se acerque a los bastiones, disminuye la magnitud de la sollicitación de cortante entre estos elementos y las vigas principales y se distribuye de una manera más uniforme entre las distintas vigas de la sección transversal.

Respecto al cambio de esta fuerza interna que se da a nivel de sección transversal, la distribución entre las cinco vigas longitudinales también depende de la ubicación de los diafragmas respecto a los apoyos y de la longitud del puente. En general, a mayor luz del vano, más se cargan las vigas extremas y a menor longitud, es mayor la demanda de la viga central. Y respecto a la ubicación del diafragma en el tablero, entre más alejado se encuentre del centro del vano, más esforzada se ve la viga central y hacia el centro de la luz, se vuelve más significativa la fuerza interna en las vigas externas.

Además, cabe destacar que conforme la posición de los diafragmas intermedios se acerca a los bastiones, el cortante se distribuye de una manera más uniforme entre las distintas vigas de la sección transversal.

A partir de los resultados obtenidos, se genera una expresión generalizada para calcular el cortante de diseño para cada viga diafragma intermedia que se implemente, sin importar la ubicación de esta, la cual se observa en la Ecuación 3 de la Sección 5.3.4. Se recomienda un coeficiente  $k$  de 0.05 para puentes con una longitud igual o mayor a 15 m y hasta 30 m como máximo y un multiplicador de 0.075 para los vanos mayores a 30 m y hasta una longitud de 50 m. Este cortante se utiliza para todas las revisiones pertinentes al diseño de estos elementos transversales que forman parte del sistema sismorresistente del puente,



como lo es el diseño por capacidad.

#### *6.1.4 Efectividad de colocar diafragmas intermedios*

En este estudio se definió el concreto como material constituyente de las vigas diafragma y si bien es cierto, para este panorama se presenta una ineficacia en la reducción de los desplazamientos transversales al incorporar diafragmas intermedios, los esfuerzos se reducen enormemente, lo que es un efecto beneficioso de implementar estos elementos a la estructuración de los puentes.

Al realizar modelos en los que no se considera la masa de las vigas diafragma sí se logra la eficacia respecto al control de derivas relativas transversales al agregar diafragmas intermedios a la estructuración de los puentes. En este caso, la eficacia es mayor conforme aumenta la cantidad de diafragmas intermedios, siendo el máximo valor de eficacia que se alcanza de aproximadamente 130 %.

Respecto a la eficacia de reducción de las fuerzas internas en la conexión entre la losa y las vigas longitudinales esta varía dependiendo de si se trata de esfuerzos axiales o cortantes. Sin embargo, para ambos casos, se obtienen porcentajes altos de eficacia. En lo que concierne a la eficacia en la reducción de esfuerzos cortantes, estos valores se presentan en un rango de 150 % a 350 %. Mientras que, cuando se trata de disminución de esfuerzos axiales, el implementar diafragmas intermedios es sumamente eficaz, pues estos porcentajes están entre 500 % y 2500 %.

Para todas las configuraciones consideradas, e indiferentemente del esfuerzo interno de interés, los menores porcentajes de eficacia se presentan en los puentes con la mayor y la menor longitud del rango en estudio (15 m y 50 m), mientras que los mayores valores de eficacia si varían según la cantidad de diafragmas intermedios que se implementen.

Si se considera el orden de configuraciones LX-1, LX-2 y LX-3, para el esfuerzo cortante la mayor eficacia se presenta en los puentes de 35 m, 35 m y 45 m y para el caso del esfuerzo axial, estos valores máximos de eficacia se dan en las estructuras de 35 m, 40 m y 45 m, respectivamente.

Al contrastar la eficacia de colocar un diafragma central versus considerar dos o tres diafragmas intermedios se concluye que la estructuración LX-3 es la más eficaz en lo que concierne a control de derivas relativas transversales, mientras que la configuración LX-1 es la que presenta mayores porcentajes de eficacia de reducción de las fuerzas internas en

la losa.

Para poder realizar conclusiones respecto a la efectividad que presenta cada estructuración estudiada se debe tomar en cuenta tanto la eficacia como la eficiencia. Al recordar las definiciones presentadas en la Sección 2.10, la eficiencia es la relación de salidas obtenidas entre los insumos utilizados y la efectividad es el resultado de la eficacia y la eficiencia. Si bien en esta investigación no se trabaja con los costos relacionados a la construcción de cada diafragma intermedio, se sabe que el costo de implementar tres vigas diafragma es el triple de lo que cuesta construir una.

Por lo tanto, desde el punto de vista de efectividad, los porcentajes de aumento de eficacia relacionados con la razón de gasto de recursos no justifican agregar más de un diafragma intermedio. Se concluye que la configuración más efectiva es la LX-1, la cual considera únicamente una viga diafragma al centro del vano.

Finalmente, se concluye que el comportamiento de la sección transversal del puente se puede comparar a la respuesta de un marco equivalente, el cual se puede observar en la Figura 47, donde se muestra un marco simple para representar el comportamiento de la sección transversal sin diafragma intermedio y un marco arriostrado para mostrar la respuesta cuando sí se cuenta con una viga diafragma. La rigidez de los resortes de los marcos es más grande entre más cerca se encuentra la sección transversal de los apoyos, porque la viga se desplaza menos; y entre más al centro del vano se encuentre, el resorte es más flexible. En esta Figura se ejemplifica una eficacia del 900 % en la reducción de la fuerza de flexión en la losa, es decir, la magnitud se reduce nueve veces al incorporar la viga diafragma. Por lo tanto, en un sismo habrá menos problemas de agrietamientos en la losa si se cuenta con diafragmas intermedios.

El momento presente en la riostra del marco arriostrado de la Figura 47 se relaciona con el cortante de diseño de los diafragmas, valor para el cual se generó una expresión simple y generalizada para su cálculo; la misma se aprecia en la Sección 5.3.4 de la presente investigación.

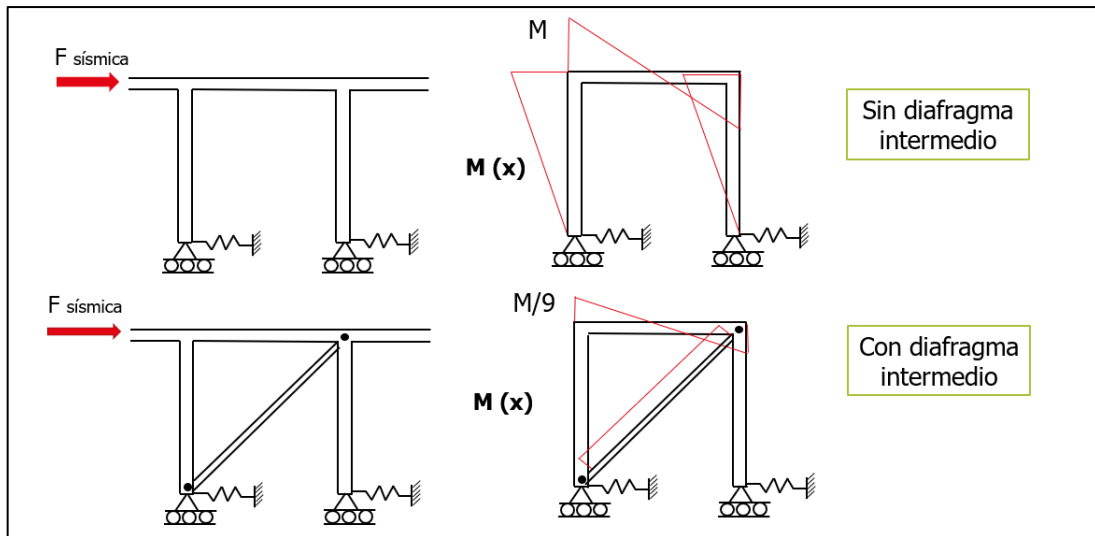


Figura 47. Marco equivalente del comportamiento de la losa y dos vigas

Es importante resaltar que, este trabajo ha sido desarrollado considerando concretos de resistencia normal y secciones transversales típicas, sin embargo, si se realiza un diseño del puente con concretos de alta resistencia, usualmente se opta por eliminar una viga principal y aumentar el espesor de la losa. Esta variación provocaría que aumente la separación entre vigas, pues, para el mismo ancho de 10,5 m se tendrían ahora cuatro vigas en lugar de cinco. Al aumentar este espaciamiento, el momento en la losa incrementa a una razón cuadrática respecto al aumento de la separación entre vigas. Además, la masa dinámica de la losa también sería mayor y, consecuentemente, la fuerza sísmica también. Por lo tanto, se concluye que en diseños que se desarrollen considerando concretos de alta resistencia, se vuelve aún más importante el aporte que pueda brindar la inclusión de diafragmas intermedios.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda buscar un diafragma que rigidice transversalmente lo equivalente a lo considerado en esta investigación, pero que aporte poca masa en comparación a la masa del resto de la superestructura, como, por ejemplo, vigas diafragma tipo I de concreto o vigas de acero.
- Se propone utilizar diafragmas metálicos, para puentes cortos (de 15 m a 50 m de longitud) con superestructura de concreto, como los tipos armadura que son tan rígidos como los diafragmas de concreto y muy livianos en comparación con estos.
- Se aconseja implementar un diafragma intermedio central para reducir las

demandas de esfuerzos en la losa de los puentes.

- Se sugiere realizar más investigaciones relacionadas con el tema, variando el material de la superestructura y de los diafragmas, el sesgo de la estructura, los rangos de longitudes y los tipos de puente.
- Se propone incorporar una sección referente a estos elementos en los Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes y, siguiendo el ejemplo de las modificaciones chilenas a sus normativas de puentes, hacer mandatorio la incorporación de un diafragma central en cada vano de los puentes para que la estructura tenga rigideces parecidas en el sentido longitudinal y el transversal y de esta manera, presente un mejor comportamiento ante sismos y porque esta fue la configuración que resultó ser la más efectiva.
- Se aconseja utilizar para el diseño estructural de las vigas diafragma la siguiente ecuación  $V_{Diseño} = k \times C_a \times W_{puente}$  la cual es conservadora y permite ahorrar tiempo. El factor k es de 0.05 para puentes cuya longitud se encuentre en el rango de [15 m - 30 m], mientras que para los vanos de entre ]30 m - 50 m] el coeficiente a utilizar es de 0.075.

## Bibliografía

---

### Artículos

- Abendroth, R., Klaiber, W., & Shafer, M. (1995). *Diaphragm Effectiveness in Prestressed-Concrete Girder Bridges*. ASCE.
- Betancour, N., Serrano, A., & Galvis, F. (2015). *Diseño sísmico de puentes ordinarios y esenciales en Colombia*. Bogotá: VII Congreso nacional de ingeniería sísmica.
- Cámara, A., & Astiz, M. Á. (2013). Aplicabilidad de las diversas estrategias de análisis sísmico en puentes atirantados en rango elástico. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 42-50.
- Rojas, M., Jaimes, L., & Valencia, M. (23 de Octubre de 2018). Efectividad, eficacia y eficiencia en equipos de trabajo. *Revista Espacios*, págs. 11-25.

### Códigos y normas

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2011). *LRFD Seismic Bridge Design 2nd Edition*. Washington D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2017). *LRFD Bridge Design Specifications 8th Edition*. Washington D.C.
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos (CFIA). (2013). *Lineamientos para el Diseño Sísmorresistente de Puentes*. San José: LanammeUCR.
- Comité técnico CTN 140, Eurocódigos estructurales. (2011). *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sísmorresistentes. Puentes*. Bruselas: Comité Europeo de Normalización (CEN).
- Comité técnico CTN 140, Eurocódigos estructurales. (2013). *Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Puentes de hormigón. Cálculo y disposiciones constructivas*. Bruselas: Comité Europeo de Normalización (CEN).
- Comité técnico CTN 140, Eurocódigos estructurales. (2013). *Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Puentes metálicos*. Bruselas: Comité Europeo de Normalización (CEN).

Comité técnico CTN 140, Eurocódigos estructurales. (2013). *Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Reglas generales y reglas para puentes*. Bruselas: Comité Europeo de Normalización (CEN).

Ministerio de Obras Públicas. (2010). *Nuevos Criterios Sísmicos para el Diseño de Puentes en Chile*. Chile.

### Documentos en línea

Bellido, J. (2002). *Curso de Diseño Estructural de Puentes*. Obtenido de Construaaprende: <https://www.construaaprende.com/docs/trabajos/389-curso-diseno-estructural-puentes-chile>

Carrera, E. (2013). *Puente de vigas y losa de concreto armado*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/luisalbertoalfonso/39451648-10puentesdevigasylosalrfd>

LanammeUCR. (2019). *Unidad de Puentes, Lanamme UCR*. Obtenido de Universidad de Costa Rica: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/boletin-informativo/51-unidades/unidad-de-puentes.html>

Real Academia Española. (19 de Septiembre de 2014). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de Vigésimotercera edición: <https://www.dle.rae.es/eficacia>

Red Sismológica Nacional. (2015). Obtenido de ¿Por qué tiembla tanto en Costa Rica?: <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/4135-por-que-tiembla-tanto-en-costa-rica>

### Libros

Aguiar, R. (2011). *El mega sismo de Chile 2010 y lecciones para Ecuador*. Quito: Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.

Barker, R., & Pucket, J. (2013). *Design of Highway Bridges an LRFD Approach*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Fernández-Ríos, M., & Sánchez, J. (1997). *Eficacia organizacional, concepto, desarrollo y evaluación*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A.

Priestley, M., Seible, F., & Calvi, G. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Quijano, S. (2006). *Dirección de recursos humanos y consultoría en las organizaciones*. Barcelona: Icaria editorial S.A.

### Manuales o guías

Computers & Structures Inc. (CSI). (2010). *CSI Analysis Reference Manual*. Berkeley: Computers & Structures Inc.

European Commission Joint Research Center. (2012). *Bridge Design to Eurocodes Worked Examples*. Vienna: European Union.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Manual de puentes*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

New Zealand Transport Agency. (2018). *Bridge Manual SP/M/022*. Wellington: NZ Transport Agency.

### Tesis

Cabrera, A. (2016). *Análisis del comportamiento dinámico ante vibraciones inducidas por rotación de la turbina hidráulica Francis, equipo de puente grúa y vibraciones sísmicas en el sistema estructural de la casa de máquinas de la Central Hidroeléctrica Machipicchu II Fase*. Cusco: Universidad Andina del Cusco.

Cartes, R. (2010). *Espaciamiento de Diafragmas Anti-Distorsión para Puentes Mixtos*. Chile: Universidad Austral de Chile.

Cassano, A. (2009). *Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas*. Paraná: Universidad Tecnológica Nacional.

González, L. (2016). *Estudio del comportamiento de los puentes prefabricados chilenos durante el sismo de 27 de febrero de 2010*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Gudiño, E., & Ayala, F. (2012). *Métodos de análisis sísmico de puentes simplemente apoyados*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.

Maldonado, R. (2004). *Análisis y simulación del impacto frontal y lateral del auto del Proyecto Minibaja*. México: Universidad de las Américas Puebla.

Mesa, C. (2005). *Análisis del comportamiento de estructuras de puentes ante solicitaciones*

*sísmicas dependiendo de la tipología de la cimentación y la interacción suelo-estructura.* Sevilla: Universidad de Sevilla.

Muñoz, J. R. (2010). *Criterios para determinar el uso de diafragmas intermedios en puentes vehiculares con vigas de concreto presforzado.* México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Oñate, E. (2006). *Posibilidades de los métodos numéricos en el mundo industrial.* Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.

Seminario, E. (2004). *Guía para el diseño de puentes con vigas y losas.* Lima: Universidad de Piura.



## Apéndice A: Esfuerzos en la conexión losa-vigas longitudinales

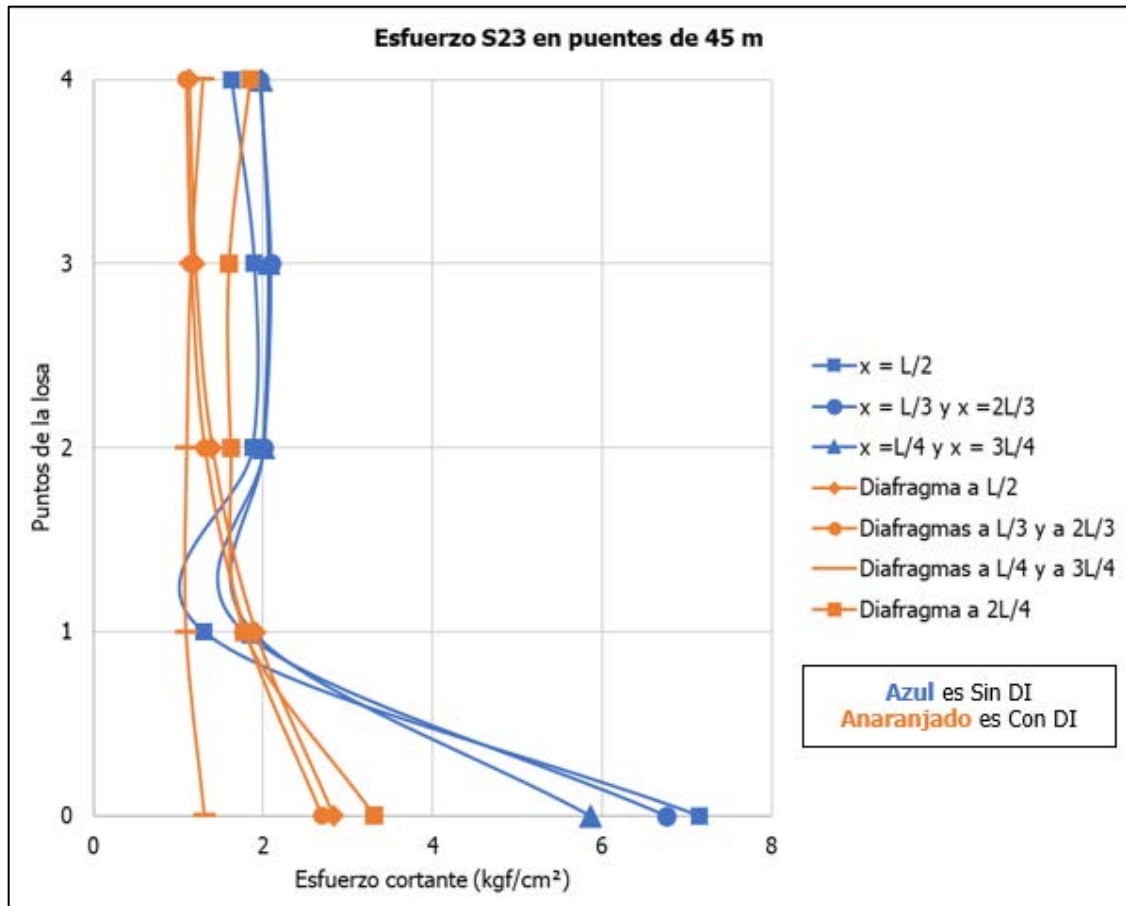


Figura A-1. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 45 m

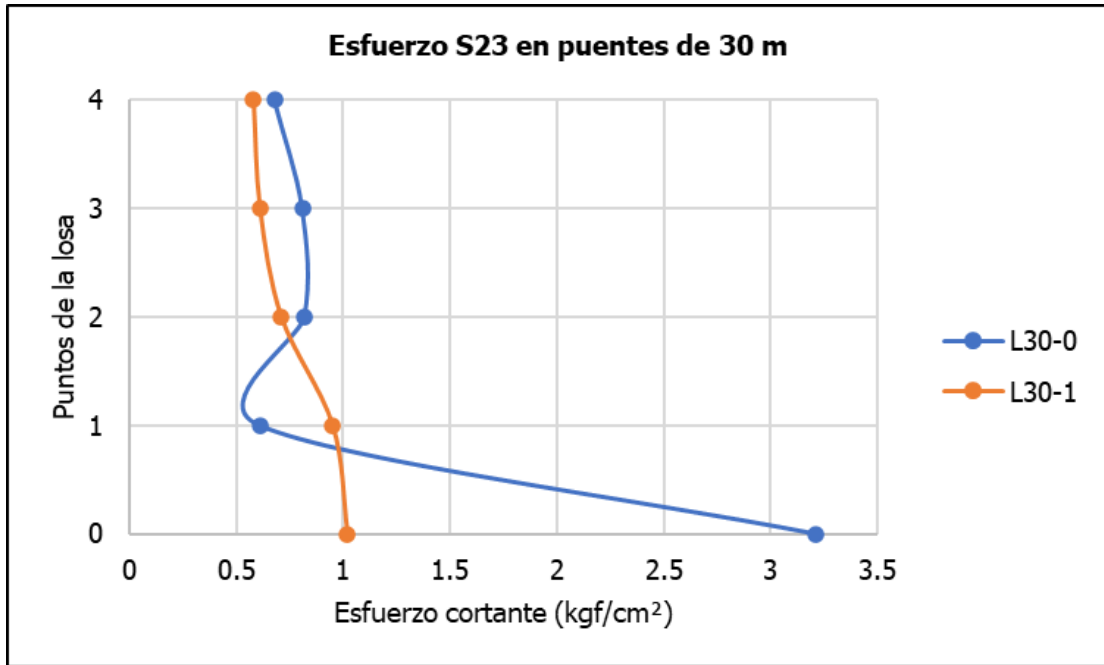


Figura A-2. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 30 m

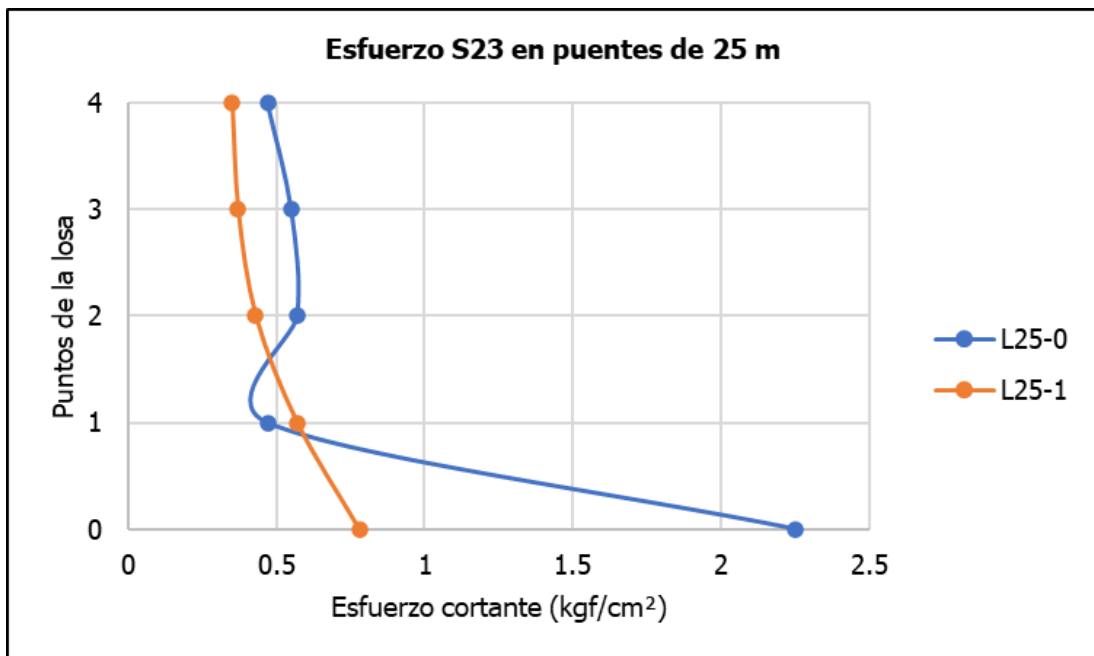


Figura A-3. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 25 m

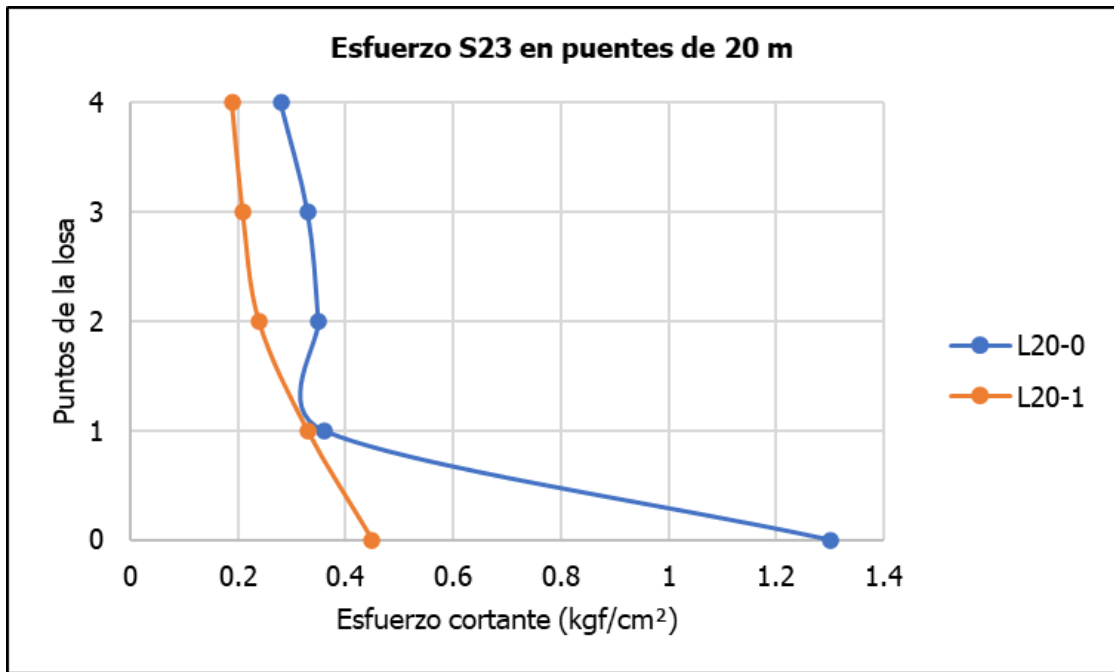


Figura A-4. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 20 m

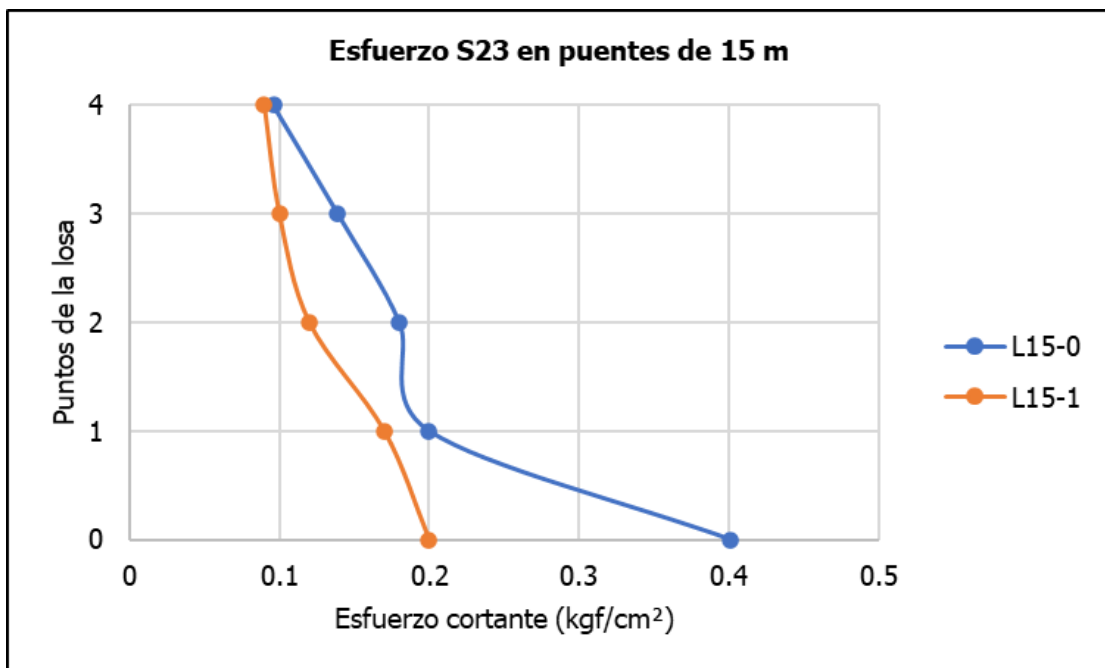


Figura A-5. Esfuerzo cortante registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 15 m

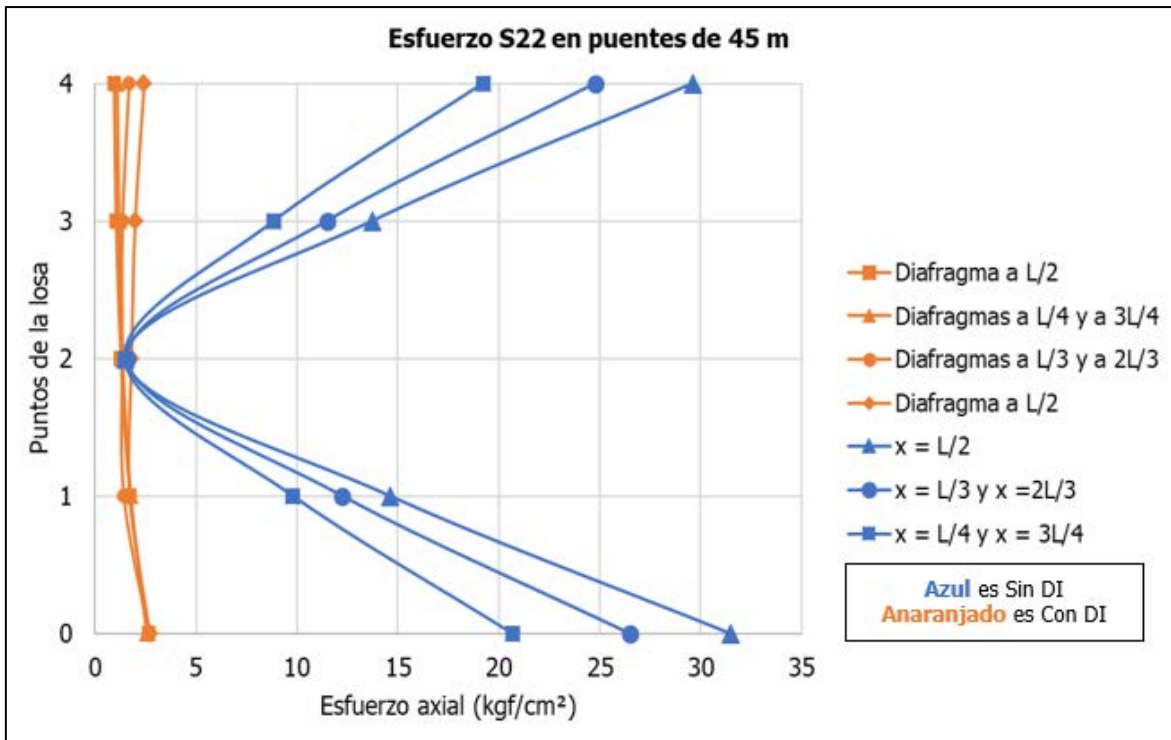


Figura A-6. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 45 m

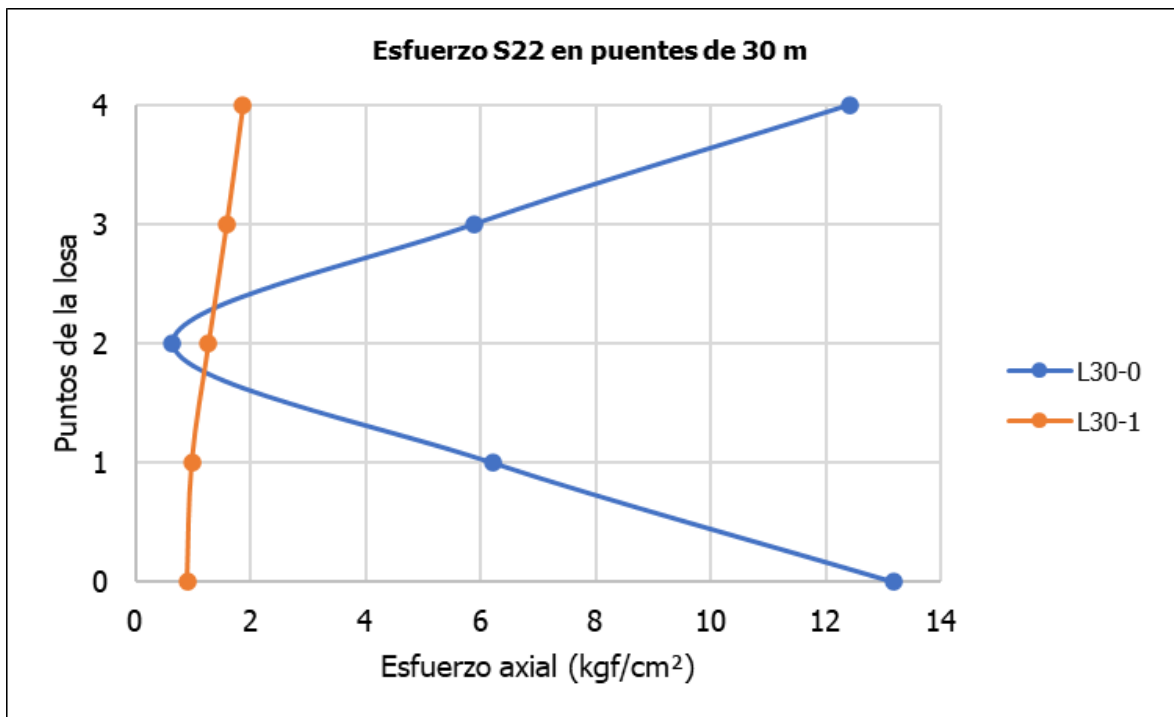


Figura A-7. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 30 m

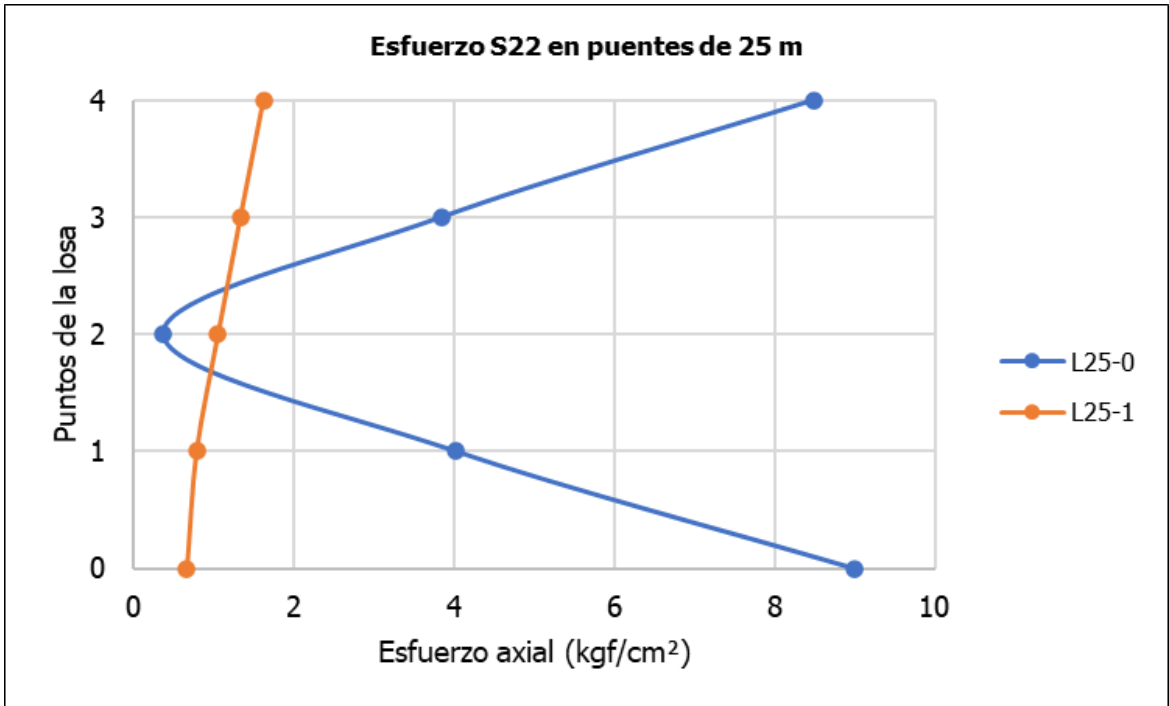


Figura A-8. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 25 m

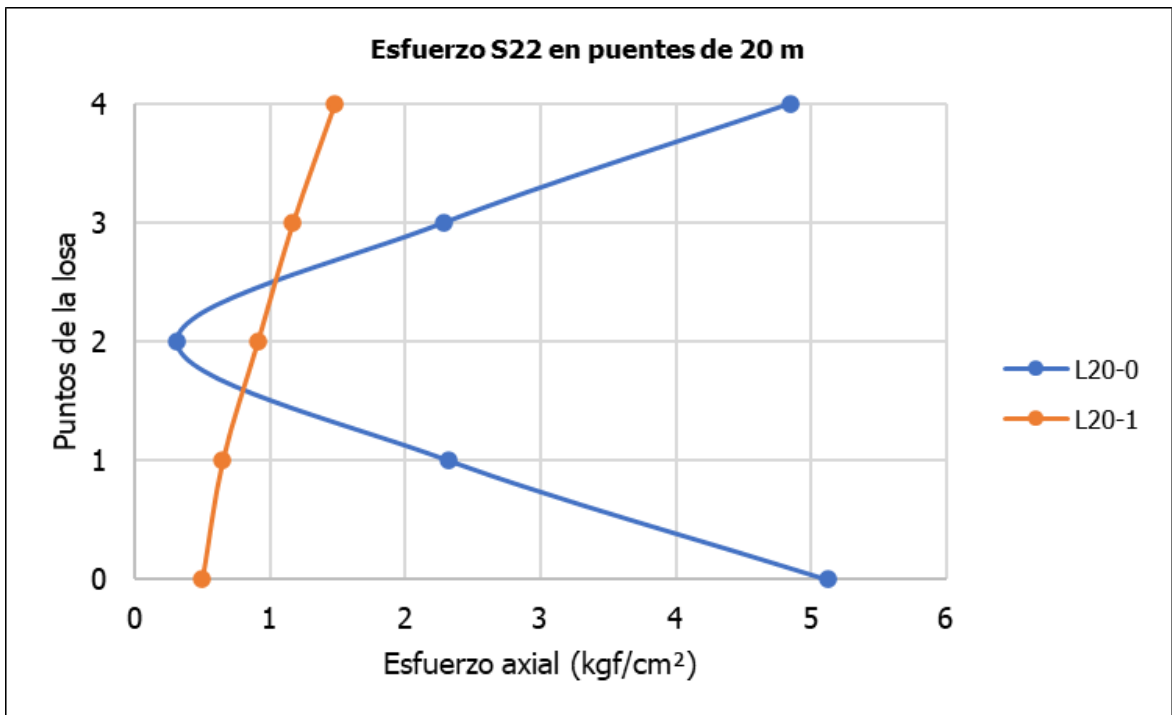


Figura A-9. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 20 m

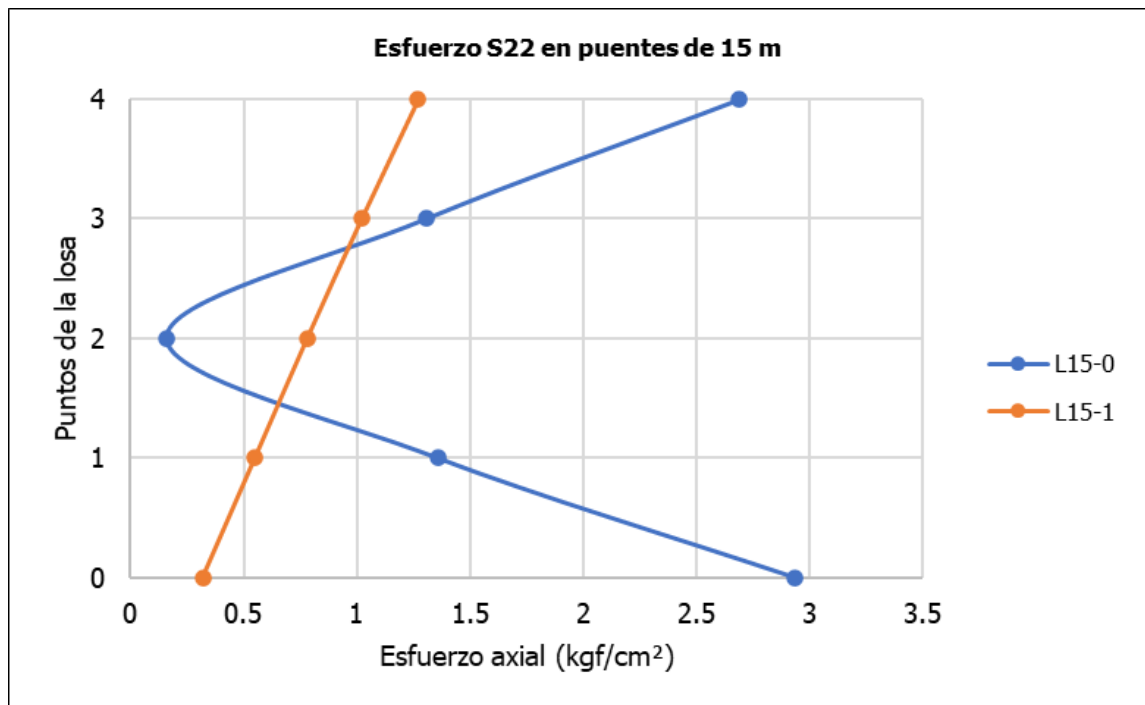


Figura A-10. Esfuerzo axial registrado en la conexión losa-viga en los distintos puentes de 15 m

## Apéndice B: Cortante entre vigas longitudinales y diafragmas

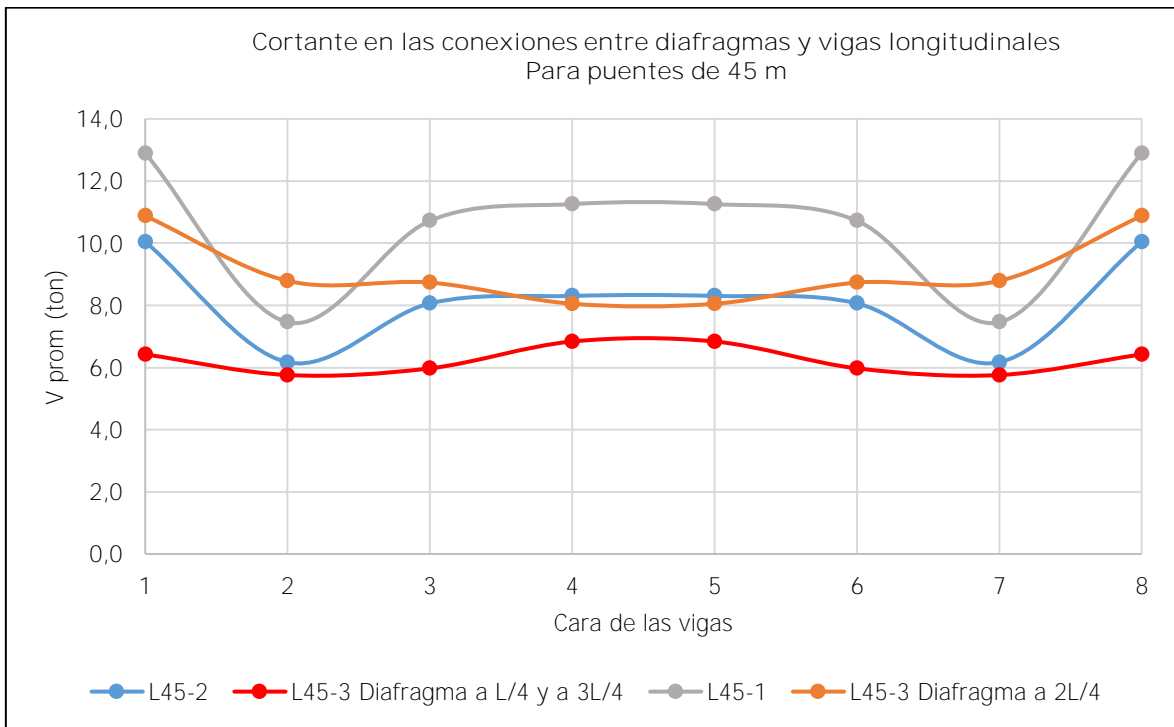


Figura B-1. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma para puentes de 45 m

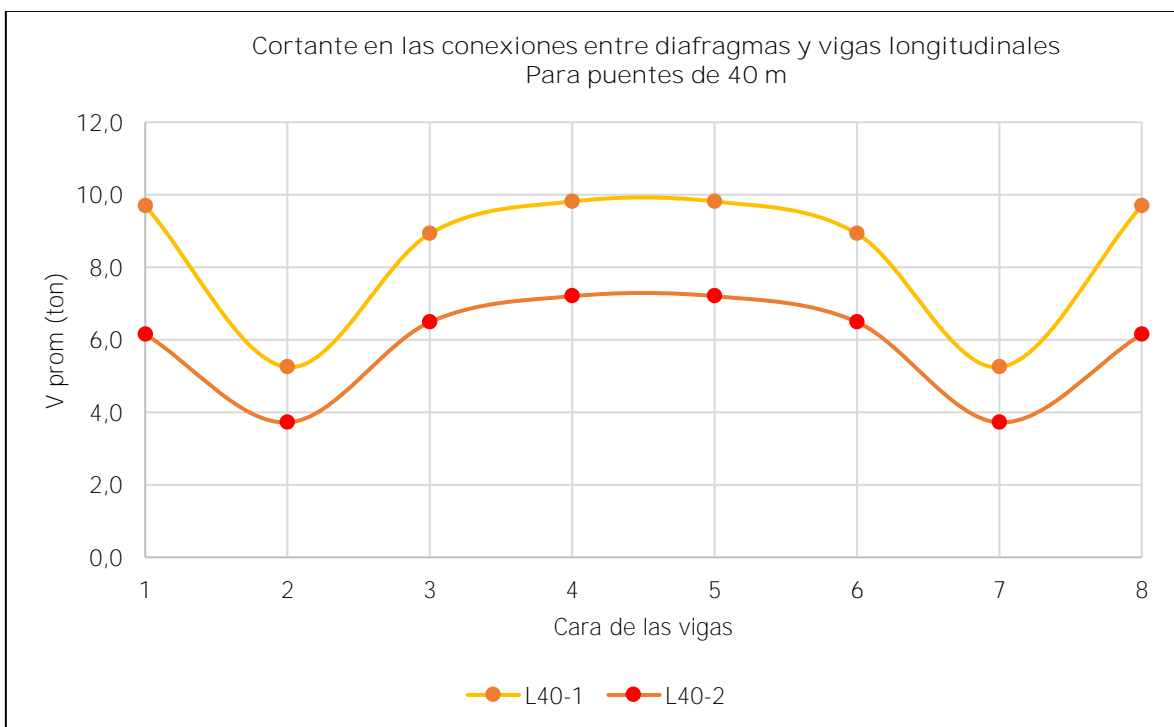


Figura B-2. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma para puentes de 40 m

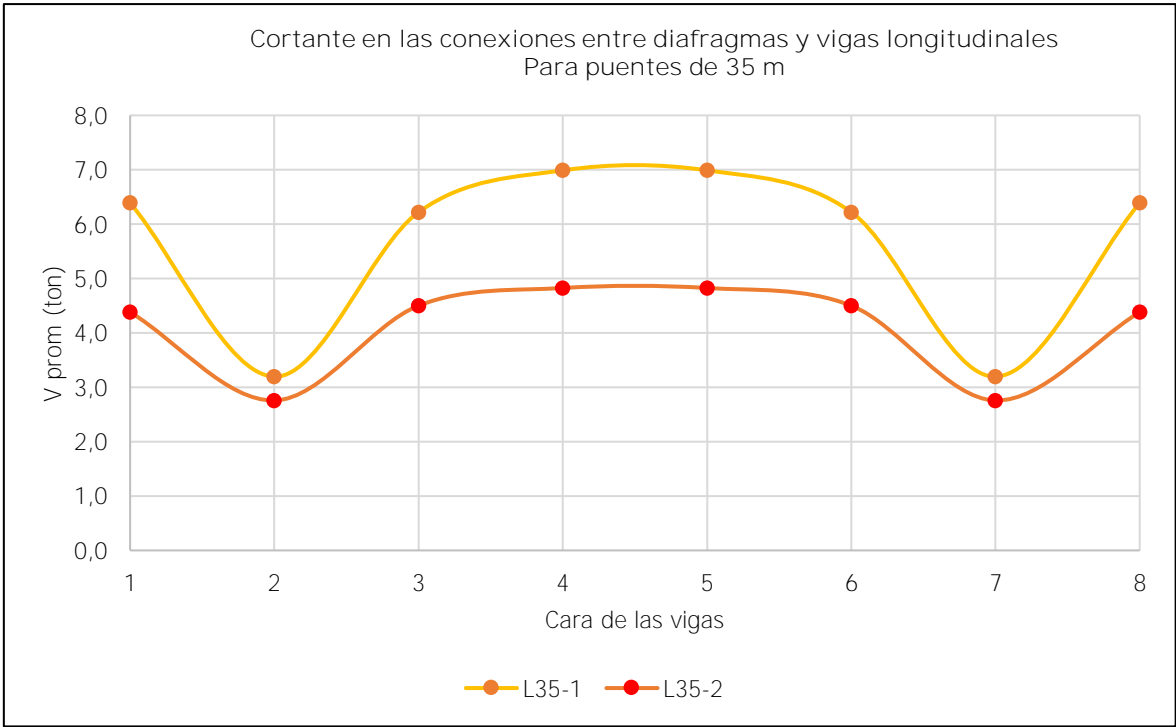


Figura B-3. Cortante (ton) entre vigas longitudinales y viga diafragma para puentes de 35 m



## Apéndice C: Obtención del factor k para el cálculo del V diseño de los diafragmas intermedios

---

Cuadro C-1. Pesos de la superestructura para cada puente estudiado

Puente	Peso (tonf)
L15-1	138.93
L20-0	184.19
L20-1	190.39
L25-0	245.61
L25-1	253.53
L30-0	321.62
L30-1	331.95
L35-0	376.67
L35-1	387.35
L35-2	398.03
L40-0	454.9
L40-1	467.31
L40-2	479.71
L45-0	526.95
L45-1	540.39
L45-2	553.83
L45-3	567.27
L50-0	602.21
L50-1	617.81
L50-2	631.55
L50-3	646.03

Cuadro C-2. Comparación del V máx total de cada puente respecto a la fuerza sísmica de referencia

Puente	Peso (tonf)	F referencia (tonf)	V máx 1 diafragma (ton)	V máx sumado 2 diafragmas (ton)	V máx sumado 3 diafragmas (ton)	% de la F ref que representa el V máx total	Cantidad de diafragmas	k
L15-1	138.93	56.96	1.31			2%	1	2.3%
L20-1	190.39	78.06	2.03			3%	1	2.6%
L25-1	253.53	103.95	3.42			3%	1	3.3%
L30-1	331.95	136.10	5.98			4%	1	4.4%
L35-1	387.35	158.81	6.99			4%	1	4.4%
L35-2	398.03	163.19		9.65		6%	2	3.0%
L40-1	467.31	191.60	9.82			5%	1	5.1%
L40-2	479.71	196.68		14.41		7%	2	3.7%
L45-1	540.39	221.56	12.90			6%	1	5.8%
L45-2	553.83	227.07		20.09		9%	2	4.4%
L45-3	567.27	232.58			24.56	11%	3	3.5%
L50-1	617.81	253.30	17.12			7%	1	6.8%
L50-2	631.55	258.94		27.80		11%	2	5.4%
L50-3	646.03	264.87			32.72	12%	3	4.1%