

**Análisis del comportamiento estructural de un puente viga-losa de concreto reforzado bajo cargas explosivas.**

**David Stiven Rodríguez Granados y Saúl Antonio Cortés Durán**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director:**

**Homer Armando Buelvas Moya  
Msc. En ingeniería estructural**

**Codirector:**

**Jose Miguel Benjumea Royero  
PhD. En ingeniería civil y ambiental**

**Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2020**

**De David:**

*A mi madre Luz Granados, por todo su amor, sus bellas palabras de aliento y por brindarme la energía suficiente para salir adelante.*

*A mi padre Edilberto Rodríguez, por haberme forjado como la persona que soy, por sus consejos llenos de sabiduría y mostrarme el camino hacia la superación.*

*A mis hermanos Brayan y Arley, por el cariño, la confianza y la valiosa amistad que me han brindado.*

*A mis sobrinos Matías, Valeria y Salomé por ser esos hermosos seres que llegaron a iluminar nuestras vidas y ser el motivo principal para querer salir adelante.*

**De Saúl:**

*A mi madre Luz, a mi padre Roque, a mis hermanos Mónica y Juan les dedico este triunfo, por haberme forjado con amor y valores que me caracterizan el día de hoy. Gracias por confiar y creer siempre en mí y por darme una voz de aliento cuando la necesito.*

*¡Este es un logro de todos!*

### **Agradecimientos**

Queremos agradecer a cada uno de nuestros directores de tesis, los profesores MSc. Homer Armando Vuelvas Moya y PhD. Jose Miguel Benjumea Royero por su valioso acompañamiento durante todo el proceso de realización de este trabajo.

A nuestra amada universidad por permitirnos formarnos en ella y brindarnos las herramientas necesarias para llegar a ser profesionales en el campo de la Ingeniería Civil. Para finalizar gracias a los profesores por sus enseñanzas y a nuestros amigos y allegados por el apoyo moral en los momentos necesarios.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Modelo de puente-viga losa ante cargas explosivas .....	17
2.1 Recolección y análisis de información. ....	17
2.1.1 Aspectos generales del puente tipo.....	17
2.1.2 Materiales.....	18
2.1.3 Evaluación de cargas.....	19
2.1.4 Cantidad de carga explosiva .....	19
2.1.5 Tipo de detonación.....	20
2.1.6 Parámetros de la explosión como una carga.....	21
2.2 Modelo del puente tipo. ....	24
2.2.1 Solicitaciones. ....	24
2.2.2 Configuración estructural.....	24
2.3 Modelado de la carga explosiva.....	25
2.4 Modelo computacional.....	29
3. Análisis y resultados .....	30

---

3.1 Respuesta estructural del puente tipo sin carga explosiva.....	30
3.2 Respuesta estructural del puente tipo con carga explosiva para los casos 1, 2 y 3.....	31
3.2.1 Resultados de fuerzas interiores (momento y cortante) y desplazamiento.....	31
3.2.2 Análisis de demanda-capacidad.....	32
3.3 Respuesta estructural del puente tipo con carga explosiva para los casos 4, 5 y 6.....	35
3.3.1 Resultados de fuerzas interiores (momento y cortante) y desplazamiento.....	35
3.3.2 Análisis de demanda-capacidad.....	35
3.4 Momentos flectores en la losa.....	37
3.5. Respuesta estructural del puente tipo con carga explosiva para el caso 7.....	38
3.5.1. Resultados de fuerzas interiores y desplazamiento.....	38
3.5.2. Análisis de demanda-capacidad.....	39
4. Conclusiones.....	41
5. Recomendaciones.....	43
Referencias Bibliográficas.....	44

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Estructuración longitudinal de los puentes colapsados en Colombia entre 1994-2014.....	14
Figura 2. Material de la superestructura de los puentes colapsados en Colombia entre 1994-2014.....	14
Figura 3. Longitudes de puentes colapsados en Colombia entre 1994-2014.....	15
Figura 4. Sección longitudinal del puente tipo. ....	17
Figura 5. Sección transversal del puente tipo .....	18
Figura 6. Función presión vs tiempo.....	22
Figura 7. Vista en planta del puente tipo .....	25
Figura 8. Alcance de los efectos explosivos en vista lateral del puente tipo. ....	26
Figura 9. Variación de la presión respecto a la distancia de análisis.....	26
Figura 10. Cuadro de distribución de presiones para los 6 primeros casos.....	27
Figura 11. Vista 3D del puente tipo. ....	29
Figura 12. Comparación de demanda y capacidad a flexión .....	31
Figura 13. Comparación de demanda y capacidad a cortante.....	31
Figura 14. Demanda-capacidad a flexión en las vigas interiores.....	33
Figura 15. Demanda-capacidad a flexión en las vigas exteriores.....	33
Figura 16. Demanda-capacidad a cortante en las vigas interiores .....	34

---

Figura 17. Demanda-capacidad a cortante en las vigas exteriores .....	34
Figura 18. Demanda-capacidad a flexión en la viga interior crítica. ....	36
Figura 19. Demanda-capacidad a flexión en la viga exterior crítica .....	36
Figura 20. Demanda-capacidad a cortante en la viga interior crítica. ....	37
Figura 21. Demanda-capacidad a cortante en la viga exterior crítica.....	37
Figura 22. Demanda-capacidad a flexión en las vigas.....	39
Figura 23. Demanda-capacidad a cortante en las vigas .....	40

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Longitudes de puentes según el autor .....	18
Tabla 2. Descripción de cargas. ....	19
Tabla 3. Cantidades estimadas de explosivos en varios vehículos. ....	20
Tabla 4. Categorías de carga de explosión.....	21
Tabla 5. Presiones para cada uno de los cuadros de la gráfica 12. ....	27
Tabla 6. Asignación de cargas en vigas interiores. ....	28
Tabla 7. Asignación de cargas en vigas exteriores. ....	28
Tabla 8. Efectos estructurales máximos de cada viga.....	30
Tabla 9. Respuestas máximas en vigas afectadas por la carga explosiva para cada caso de estudio .....	32
Tabla 10. Respuestas máximas en vigas afectadas por la carga explosiva para cada caso de estudio .....	35
Tabla 11. Comparación del momento resistente en la losa vs efectos de carga explosiva sobre la misma.....	38
Tabla 12. Respuestas máximas estructurales en las vigas, efecto de la carga explosiva.....	39

**Lista de anexos**

Ver anexos adjuntos al documento y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

**ANEXO A. COMBINACIONES DE CARGA**

**ANEXO B. MEMORIAS DE CÁLCULO PUENTE 18M**

**ANEXO C. PLANO PUENTE 18M**

**ANEXO D. RESULTADOS PUENTE 18M CON CARGAS DE SERVICIO**

**ANEXO E. RESULTADO DE ANÁLISIS CARGA EXPLOSIVA**

## Resumen

**Título:** Análisis del comportamiento estructural de un puente viga-losa de concreto reforzado bajo cargas explosivas\*.

**Autores:** David Stiven Rodríguez Granados  
Saúl Antonio Cortés Durán\*\*

**Palabras Clave:** puente viga – losa, carga explosiva, comportamiento ante cargas accidentales, análisis estático lineal.

Los puentes viga-losa contienen múltiples vigas y una placa que trabajan en conjunto para soportar las acciones de cargas permanentes y transitorias. Estas estructuras son importantes pasos en la infraestructura de un país, permiten conectar senderos, vías y poblaciones, pero a su vez, están expuestas a efectos accidentales como los explosivos, que ocasionan daños difíciles de reparar o incluso el colapso repentino. El código colombiano de diseño de puentes (CCP-14) carece de información detallada para incluir los efectos de los explosivos en el análisis y diseño de estas estructuras. Teniendo esto en cuenta, y como primera aproximación al estudio de este fenómeno, en este trabajo se analizó la respuesta estructural de un puente viga-losa de concreto reforzado afectado por cargas explosivas mediante un modelado lineal estático. Los casos de estudio presentados analizan los efectos estructurales (momento, cortante y desplazamiento) generados por una cantidad específica de explosivo, variando la ubicación de aplicación de la detonación sobre la estructura tanto longitudinal como transversalmente en un puente de longitud (L) igual a 18m. Se ubicaron detonaciones a 0.7m sobre la losa en el centro de la sección transversal y sobre la viga interior 1 en los puntos 0.125L, 0.25L y 0.5L. Además, se analizó una explosión bajo el puente ubicada en el centro de la longitud y la sección transversal de la superestructura y verticalmente a 4.3m desde la parte inferior de las vigas. A partir del análisis de capacidad, se observó que la carga explosiva ocasiona solicitaciones sustancialmente mayores que las establecidas para el puente tipo que no tiene en cuenta estos efectos. Por ejemplo, se encontró que las relaciones demanda-capacidad (D/C) para momento flector y cortante pueden llegar a tomar el valor de 36 y 63, respectivamente, indicando que el puente pierde totalmente su integridad estructural.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director:

### Abstract

**Title:** Analysis of the structural behavior of a reinforced concrete beam-slab bridge under explosive loads \*.

**Authors:** David Stiven Rodríguez Granados  
Saúl Antonio Cortés Durán \*\*

**Keywords:** beam - slab bridge, explosives load, behaviour to accidental loads, linear static analysis.

Beam-slab bridges contain multiple beams and a plate that work together to withstand the actions of permanent and transient loads. These structures are important steps in a country's infrastructure, connecting paths, roads and towns, but in turn are exposed to accidental effects such as explosives, which cause damage that is difficult to repair or even sudden collapse. The Colombian bridge design code (CCP-14) lacks detailed information to include the effects of explosives in the analysis and design of these structures. Taking this into account, and as a first approach to the study of this phenomenon, in this work the structural response of a reinforced concrete beam-slab bridge affected by explosive charges was analyzed by static linear modeling. The case studies presented analyze the structural effects (momentum, shear and displacement) generated by a specific amount of explosive, varying the location of application of the detonation on the structure both longitudinally and transversely on a bridge of length (L) equal to 18m. Detonations were placed at 0.7m on the slab in the center of the cross-section and on the inner beam at points 0.125L, 0.25L and 0.5L. In addition, an explosion was analyzed under the bridge at the center of the length and cross-section of the superstructure and vertically at 4.3m from the bottom of the beams. From the capacity analysis, it was observed that the explosive charge causes substantially greater stresses than those established for the type bridge that does not take into account these effects. For example, it was found that the demand-capacity ratios (D/C) for bending and shear moment may take the value of 36 and 63, respectively, indicating that the bridge loses its structural integrity.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director:

## Introducción

Los puentes son estructuras críticas para la infraestructura física de un país, pues permiten acortar distancias y reducir el costo operativo en el transporte de personas y alimentos, Carrillo et al (Carrillo, Arciniegas, & Molina, 2014). De acuerdo con el estudio realizado en el 2002 por Muñoz (Muñoz, 2003), las explosiones generadas por actos terroristas fueron la mayor causa de colapsos de puentes (32%). Por tal razón, es pertinente que los diseñadores estructurales consideren dichas situaciones accidentales en el dimensionamiento de estas estructuras.

La normativa en Colombia para el diseño de puentes CCP-14 (CCP14 (Código Colombiano de puentes) , 2014) presenta deficiencias en cuanto a la inclusión de cargas explosivas y al estudio de sus efectos en los puentes. En la sección 3.15 menciona algunos parámetros como el tamaño de la carga explosiva, la ubicación de la carga o fragmentación asociada con explosivos llevados en vehículos, pero no brinda las herramientas necesarias para estudiar el fenómeno ni integrarlo completamente al diseño.

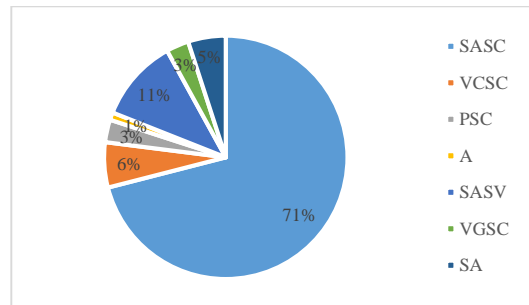
Los principales factores de las cargas explosivas y sus efectos en las estructuras han sido estudiados por varios autores. Por ejemplo, Neri et al. (Neri Larios, 2011) explican los principios básicos del fenómeno explosivo como una onda, describiendo su comportamiento en el tiempo, caracterización y el comportamiento de ésta con base a la ubicación de la detonación en la estructura. Islam et al. (Islam & Yazdani, 2008) realizaron un análisis de carga estática equivalente en un puente de dos tramos para evaluar la capacidad de vigas presforzadas AASHTO Tipo III. En el estudio, los autores asumieron una cantidad de explosivo igual a 225 kg de TNT,

concluyendo a partir de un análisis lineal estático que las vigas no están en capacidad de soportar ese tipo de explosivo en diferentes puntos de aplicación. Por otra parte, Andreou et al. (Andreou, Kotsoglou, & Pantazopoulou, 2016) realizaron un análisis estático no lineal (Pushover) para predecir la respuesta del puente ante cargas explosivas. Los dos estudios anteriores concuerdan en que el análisis de tipo estático es versátil y confiable. Sin embargo, no se encontraron estudios que se centren en evaluar la capacidad de puentes viga-losa o configuraciones similares que predominan en Colombia.

Carrillo et al (Carrillo, Arciniegas, & Molina, 2014) presentan estadísticas de datos recopilados entre 1994 y 2014 referentes a 115 puentes colombianos que colapsaron por efectos de cargas explosivas. Dichos datos muestran que los puentes más afectados son simplemente apoyados con sección constante 71% (gráfica 1), de concreto reforzado 47% (gráfica 2) y sus luces varían de 18 a 32 metros (gráfica 3). Las tipologías de puentes más afectados presentes en la gráfica 1 son: simplemente apoyado con sección constante (SASC), de vigas continuas con sección constante (VCSC), pórtico con sección constante (PSC), atirantado (A), simplemente apoyado con sección variable (SASV), vigas Gerber de sección constante (VGSC) y simplemente apoyados (SA).

**Figura 1.**

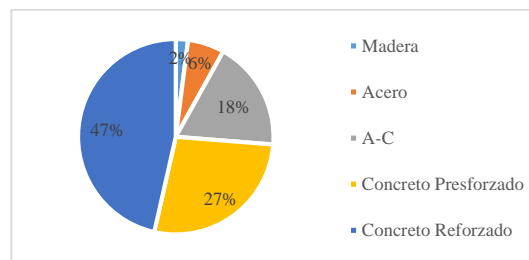
*Estructuración longitudinal de los puentes colapsados en Colombia entre 1994-2014.*



Nota. basados en Carrillo, J.; Arciniegas, L.; Molina, J. (2014) Evaluación de las estadísticas de colapsos de puentes en Colombia por cargas explosivas.", *Ciencia e ingeniería neogranadina*, Vol. 24, No. 2 PP. 157-175

**Figura 2.**

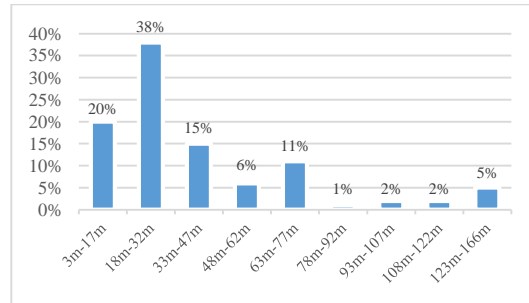
*Material de la superestructura de los puentes colapsados en Colombia entre 1994-2014*



Nota. Basados en Carrillo, J.; Arciniegas, L.; Molina, J. (2014) Evaluación de las estadísticas de colapsos de puentes en Colombia por cargas explosivas.", *Ciencia e ingeniería neogranadina*, Vol. 24, No. 2 PP. 157-175

**Figura 3.**

*Longitudes de puentes colapsados en Colombia entre 1994-2014.*



Nota. Basados en Carrillo, J.; Arciniegas, L.; Molina, J. (2014) Evaluación de las estadísticas de colapsos de puentes en Colombia por cargas explosivas.", *Ciencia e ingeniería neogranadina*, Vol. 24, No. 2 PP. 157-175

Debido a lo enunciado anteriormente y teniendo en cuenta que en Colombia no se ha estudiado el comportamiento estructural de puentes viga-losa afectados por cargas explosivas, en este trabajo se investigan algunos efectos a partir de modelos computacionales de un puente tipo de una luz. La posición de la carga fue modificada longitudinal y transversalmente con el fin de determinar las fuerzas internas (momento y cortante), desplazamiento y relaciones de demanda-capacidad.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento estructural de un puente viga – losa de concreto reforzado, mediante la variación del punto de aplicación de una carga explosiva.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Establecer un modelo tipo de un puente viga-losa de concreto reforzado con dimensiones típicas según revisión de bases de datos bibliográfica.
- Definir, mediante revisión bibliográfica, los parámetros de la carga explosiva necesarios en el análisis seudo - estático de un puente viga – losa.
- Comparar el comportamiento estructural de un puente viga-losa debido a la aplicación de una carga explosiva variando la distancia de exposición de la explosión

## 2. Modelo de puente-viga losa ante cargas explosivas

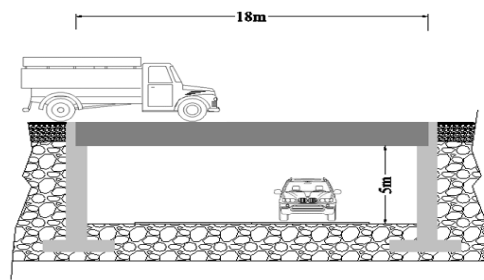
### 2.1 Recolección y análisis de información.

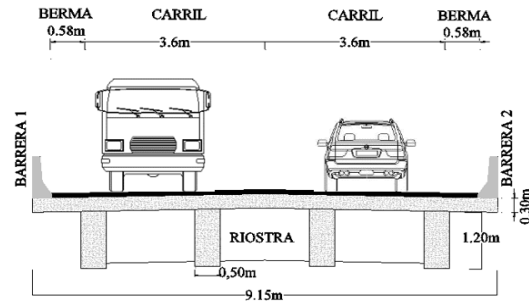
#### 2.1.1 Aspectos generales del puente tipo.

Para este estudio se analizó un puente viga-losa de concreto reforzado, simplemente apoyado y con una luz de 18m (gráfica 4), basados en recomendaciones de diferentes autores consultados en la literatura (tabla 1). Se asumió que el puente tipo contiene dos carriles de 3.6m de ancho, una barrera tipo New Jersey de 40cm de ancho y dos bermas de 0.58m de ancho para un total de 9.15m de ancho de tablero (gráfica 5). Se utilizaron cuatro vigas rectangulares de 0.5x1.2m separadas 2.25m centro a centro, conectadas por tres riostras de concreto reforzado, una de 0.25x1.2m en cada zona de apoyo y otra de 0.25x1.1m en la mitad de la luz. El espesor de la losa es 0.3m y el ancho del voladizo fue de 1.20m.

#### Figura 4.

*Sección longitudinal del puente tipo.*



**Figura 5.***Sección transversal del puente tipo***Tabla 1.***Longitudes de puentes según el autor*

<b>Autor</b>	<b>Material</b>	<b>Luz</b>
American Concrete Institute (García Rosell, 2006)	Concreto reforzado	12 - 25 m
José Eusebio Trujillo (Trujillo Orozco, 1993)	Concreto reforzado	6 - 25 m
Instituto Nacional de vías (INVIAS) (Invias & Ministerio de transporte, 2005)	Concreto reforzado	10 -25 m

**2.1.2 Materiales.**

Para la losa y las vigas se utilizó un concreto con resistencia a la compresión ( $f'c$ ) igual a 28 MPa, peso específico  $\gamma$  de 24 kN/m<sup>3</sup>, módulo de elasticidad de 20637 MPa y coeficiente de

poisson de 0.2. El acero utilizado para los elementos estructurales tiene esfuerzo a la fluencia de 420 MPa y densidad de 200 GPa. El peso específico del pavimento fue de 22.5 kN/m<sup>3</sup>.

### 2.1.3 Evaluación de cargas.

Para establecer las condiciones de servicio (tabla 2) del puente y calcular su refuerzo, se emplearon combinaciones del Código Colombiano de Puentes (CCP14 (Código Colombiano de puentes) , 2014) (ANEXO A) y recomendaciones adicionales de AASHTO (García Rosell, 2006).

**Tabla 2.**

*Descripción de cargas.*

Cargas		Descripción
Permanentes	DC	Peso propio de los elementos
	DW	Carga por pavimento
Transitorias	LL+	Carga viva de vehículos y peatones
	IM	más factor de impacto (IM)

### 2.1.4 Cantidad de carga explosiva

Para hallar la carga explosiva, primero se determinó la cantidad de explosivo en kg de TNT con el fin de realizar el análisis del puente tipo. Las cantidades estimadas de explosivos por Draganić et al (Draganić & Sigmund, 2014) en varios vehículos se presentan en la tabla 3. Para el análisis de la investigación se tomó un tamaño de carga equivalente a un maletero compacto (115 kg de TNT).

**Tabla 3.**

*Cantidades estimadas de explosivos en varios vehículos.*

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Masa equivalente/ Kg</b>
Maletero de carro compacto	115
Maletero de carro grande	230
Furgoneta	680
Camión	2270
Camión con remolque	13610
Camión de dos remolques	27220

Fuente: elaboración propia basado en Draganić, H.; Sigmund, V. (2014) Blast loading on structures Technical Gazette, Vol. 19, No. 3 PP. 642-652

### ***2.1.5 Tipo de detonación.***

Las detonaciones se pueden clasificar en dos tipos según el confinamiento de la carga: confinada y no confinada. La confinada ocurre en casos donde la explosión se encuentra totalmente cubierta por una estructura cerrada o parcialmente cerrada, mientras que la no confinada no presenta obstáculos en el momento de la explosión. A su vez cada tipo de detonación puede dividirse en categorías con base a la posición de la carga con respecto a la estructura (tabla 4). En ese estudio se seleccionó una detonación no confinada, al aire libre sin ningún tipo de amplificación de onda de choque, teniendo en cuenta que la explosión ocurre sobre la superestructura y debajo de esta.

**Tabla 4.***Categorías de carga de explosión.*

<b>Confinamiento de la carga</b>	<b>Categoría</b>
<b>No Confinada</b>	1. Detonación al aire libre
	2. Detonación en el aire
	3. Detonación en superficie
<b>Confinada</b>	4. Totalmente Ventilada
	5. Parcialmente ventilada
	6. Totalmente confinada

Nota. Basado en Draganić, H.; Sigmund, V. (2014) Blast loading on structures Technical Gazette, Vol. 19, No. 3 PP. 642-652

### **2.1.6 Parámetros de la explosión como una carga.**

Existen varios métodos con los cuales se puede caracterizar la forma temporal de distribución de presiones ocasionadas por la onda de una explosión. La ecuación de Friedlander brinda una solución aproximada pero confiable para estimar la presión, y su costo computacional no es tan elevado como los métodos más elaborados (Neri Larios, 2011).

La distribución temporal de la onda de choque esférica puede ser expresada mediante la ecuación y la función de Friedlander (ecuación 1 y gráfica 6 respectivamente):

$$p(t) = P_o + P_{so} \left(1 + \frac{t-t_d}{t_d}\right) * e^{-b * \frac{t-t_d}{t_a}} \quad (1)$$

Donde:

$t_a$  : Tiempo que transcurre hasta que la onda llega al punto de consideración.

$P_o$  : Presión ambiental.

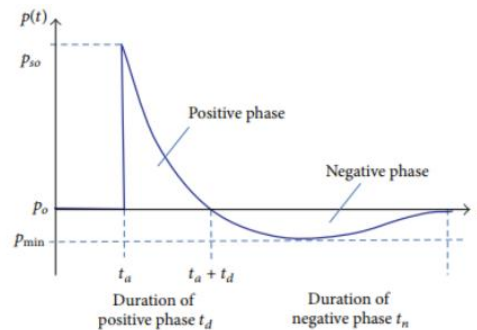
$P_{so}$ : Valor máximo de presión que alcanza la onda en un tiempo muy corto.

$t_d$ : Duración de la fase positiva.

$b$ : Parámetro adimensional que controla el descenso de la presión.

### Figura 6.

*Función presión vs tiempo*



Nota. Tomado de Andreou, M.; Kotsoglou, A.; Pantazopoulou, S. (2016) Modelling Blast Effects on a Reinforced Concrete Bridge Hindawi Publishing Corporation PP. 1-11

Como la presión  $P_{so}$  es el pico más alto de la función, el análisis estático lineal en este trabajo se realizó a partir de este valor, donde se involucra la presión atmosférica y la ley del escalado, que relaciona el tamaño de la carga explosiva y la distancia desde la detonación a un punto específico.

La ley de escalado más usada para el cálculo de presiones es la ley de la raíz cúbica, también conocida como ley de Hopkinson (ecuación 2), la cual dice que, si una detonación ocurre a una distancia  $R1$  con una carga  $W1$ , una segunda explosión con carga  $W2$  generará la misma presión a un radio  $R2$ , (Neri Larios, 2011).

$$\frac{R1}{R2} = \left(\frac{W1}{W2}\right)^{1/3} = \lambda \quad (2)$$

Donde:

$\lambda$ : Factor de rendimiento explosivo.

A partir de la ley del escalado se obtiene la distancia escalada (ecuación 3) que permite una manera eficaz de la representación de los parámetros de la onda de choque (Neri Larios, 2011).

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (3)$$

Z: Distancia escalada.

R: Distancia de detonación hasta el punto analizado.

W: Cantidad de masa equivalente expresada en kg de TNT.

Existen varias propuestas para el cálculo de los parámetros de carga explosiva. Según (Nassr, Razaqpur, & Tait, 2012), Kinney and Graham (Kinney & Graham, 1985) proporcionan la siguiente ecuación semi-empírica para el cálculo del valor máximo de presión ( $P_{so}$ ):

$$\frac{P_{so}}{P_o} = \frac{808[1 + (Z/4.5)^2]}{(X)(Y)(Z)} \quad (4)$$

Donde:

$P_o$ : Presión atmosférica (0.101 MPa).

$$X: \sqrt{1 + (Z/0.048)^2}$$

$$Y: \sqrt{1 + (Z/0.32)^2}$$

$$Z: \sqrt{1 + (Z/1.35)^2}$$

## 2.2 Modelo del puente tipo.

### 2.2.1 Solicitaciones.

Las cargas consideradas para el análisis de resistencia del puente incluyen la carga muerta (DC), conformada por el peso propio de cada uno de los elementos que pertenecen a la estructura (riostros, vigas, losa y barreras), carga de rodadura (DW) y efectos transitorios de carga viva vehicular más factor de impacto (LL+IM). Adicionalmente, se tomó el vehículo de diseño especificado en el CCP – 14 (tándem y camión de diseño).

### 2.2.2 Configuración estructural.

Se hizo un diseño preliminar para asignar el refuerzo necesario y plantear la capacidad inicial de la estructura que fue el resultado de las combinaciones y criterios establecidas por el CCP-14 (ANEXO A). La combinación más crítica fue la de resistencia I y se presenta en la ecuación 5.

$$1.25DC+1.5DW+1.75(LL+IM) (5)$$

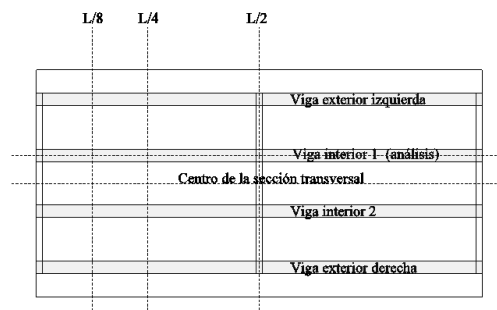
El diseño de las vigas fue elaboración propia, siguiendo los lineamientos del CCP-14 (ANEXO B). La distribución de acero longitudinal y transversal se muestra en el ANEXO C.

### 2.3 Modelado de la carga explosiva.

Se analizaron siete situaciones de aplicación de la carga explosiva, cambiando la ubicación de la detonación sobre el tablero del puente y un análisis adicional en la parte inferior de la superestructura. Las primeras variaciones de detonación, casos 1 a 3, se evalúan en puntos diferentes sobre la línea del centro de la sección transversal a 0.7 m de altura (gráfica 7): a un medio, un cuarto y un octavo de la longitud del puente respectivamente (gráfica 8).

#### Figura 7.

*Vista en planta del puente tipo*

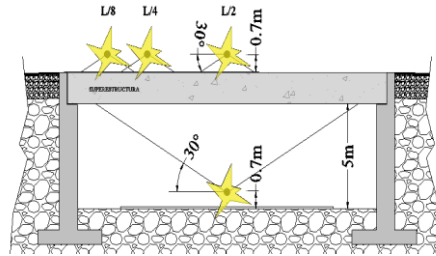


Se plantearon variaciones alternativas en la ubicación de la explosión sobre la viga interior 1, para los casos 4 a 6 (gráfica 7): en la mitad, un cuarto y un octavo de la longitud del puente tipo. Al igual que en los tres primeros casos, la altura de aplicación de carga se mantuvo en 0.7 m.

Finalmente, en el caso 7 se asume que la explosión ocurre debajo de la superestructura, con un gálibo de 5 m en el centro de la sección transversal y en la mitad de la longitud del puente tipo (gráfica 8).

**Figura 8.**

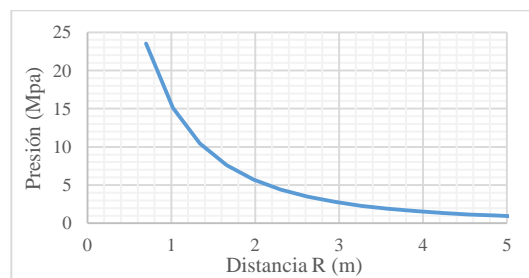
*Alcance de los efectos explosivos en vista lateral del puente tipo.*



A partir de la Ecuación 4 se obtiene una función de presiones que se utilizó para calcular los valores de carga dependiendo de la distancia desde el foco de la explosión al punto de análisis (gráfica 9). Para asignar la carga explosiva a los seis primeros casos de estudio, se tomaron elementos discretizados cada  $0.3 \times 0.3 \text{m}$  (gráfica 10) teniendo en cuenta que los cambios en la variación de presión no fuesen significativos. Los valores asignados a cada cuadro de estudio se presentan en la tabla 5, se obtienen asumiendo que la presión es uniforme en cada cuadro y que la detonación ocurre sobre el centro del cuadro uno (gráfica 10) a  $0.7 \text{m}$  de altura y la onda explosiva incide en la superestructura a un ángulo de  $30^\circ$  desde el foco de la explosión tal como fue asumido por Islam et al (Islam & Yazdani, 2008).

**Figura 9.**

*Variación de la presión respecto a la distancia de análisis.*



**Figura 10.**

*Cuadro de distribución de presiones para los 6 primero casos.*

15	14	12	9	5	9	12	14	15
14	13	11	8	4	8	11	13	14
12	11	10	7	3	7	10	11	12
9	8	7	6	2	6	7	8	9
5	4	3	2	1	2	3	4	5
9	8	7	6	2	6	7	8	9
12	11	10	7	3	7	10	11	12
14	13	11	8	4	8	11	13	14
15	14	12	9	5	9	12	14	15

**Tabla 5.**

*Presiones para cada uno de los cuadros de la gráfica 12.*

Área de análisis	Presión (kPa)
1	23509
2	21413
3	17150
4	13085
5	9940
6	19745
7	16121
8	12510
9	9615
10	13721
11	11069
12	8760
13	9312
14	7636
15	6476

En el caso 7 también se utilizó la gráfica 9 de presiones para obtener las cargas que se aplicaron a las vigas desde la parte inferior del puente (tablas 6 y 7). Al igual que en los seis primeros casos, se asume que la onda explosiva incide en la superestructura a un ángulo de  $30^\circ$  desde el foco de la detonación.

**Tabla 6.**

*Asignación de cargas en vigas interiores.*

Vigas interiores		
Tramo de viga (m)	de Presión (kPa)	Carga (kN/m)
1.5 - 3.1	396.6	198.3
3.1 - 4.6	580	290
4.6 - 5.6	750	375
5.6 - 7	996.3	498.1
7 - 9.	1225	612

**Tabla 7.**

*Asignación de cargas en vigas exteriores.*

Vigas exteriores		
Tramo de viga (m)	de Presión (kPa)	Carga (kN/m)
1.5 - 3.3	340	170
3.33 - 5.6	534	267
5.6 - 9	779.4	389.9

Para analizar la carga explosiva en todos los casos, se tuvo en cuenta la combinación de evento extremo II del CCP-14 (ANEXO A). Las respuestas estructurales se calculan combinado

los efectos de las cargas transitorias, permanentes y la explosiva (BL), como se aprecia en la ecuación 6.

$$1.25DC+1.5DW+0.5(LL+IM)+1.0(BL) \quad (6)$$

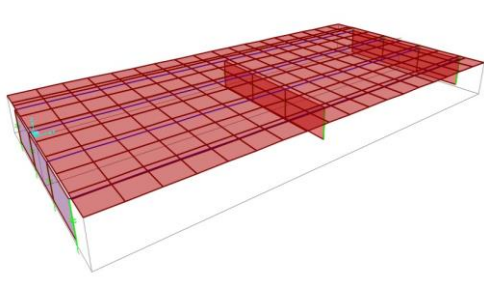
En este estudio se incluyeron los efectos de la carga viva y el factor de impacto, pero podría despreciarse debido a la poca probabilidad de que haya tránsito al momento de un ataque terrorista o detonación del explosivo.

## 2.4 Modelo computacional.

Se utilizó el software CSiBridge (versión prueba) para obtener los diagramas de momento, cortante, desplazamiento y demanda-capacidad (D/C) mediante un análisis estático lineal. Para el modelado de las vigas se usó elementos tipo frame y para el tablero y riostras elementos tipo shell. Los apoyos asignados fueron elementos tipo link (gráfica 11).

### Figura 11.

*Vista 3D del puente tipo.*



Nota. Obtenido del software CSiBridge

### 3. Análisis y resultados

#### 3.1 Respuesta estructural del puente tipo sin carga explosiva.

Se obtuvieron los diagramas de la respuesta estructural producto de las solicitaciones mostradas en la tabla 2. Los valores máximos de momento positivo (M), cortante (V) y desplazamiento vertical ( $\Delta$ ) fueron 4561.4 kN.m, 1106 kN y 0.0253 m respectivamente (tabla 8).

**Tabla 8.**

*Efectos estructurales máximos de cada viga.*

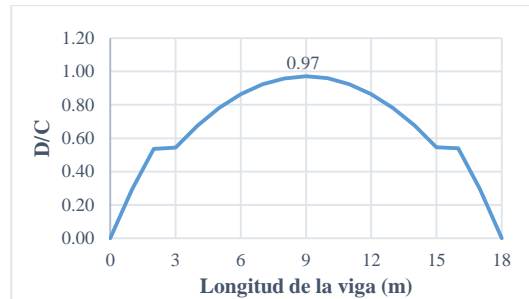
ELEMENTO	M (kN-m)	V(kN)	$\Delta_{\text{máx}}$ (m)
Viga exterior izquierda	4561.4	1076.3	0.0253
Viga interior 1	4181.1	1106	0.0247
Viga interior 2	4181.1	1106	0.0247
Viga exterior derecha	4561.4	1076.4	0.0253

Las gráficas 12 y 13 muestran las curvas de la relación demanda sobre capacidad (D/C) a flexión y cortante, donde se observa que el refuerzo colocado satisface lo requerido por las cargas actuantes (tabla 2) en las vigas. Las máximas demandas a flexión y cortante a causa de las

solicitaciones es del 97% del refuerzo longitudinal y el 88% del refuerzo transversal respectivamente (se recomienda revisar ANEXO D para más información).

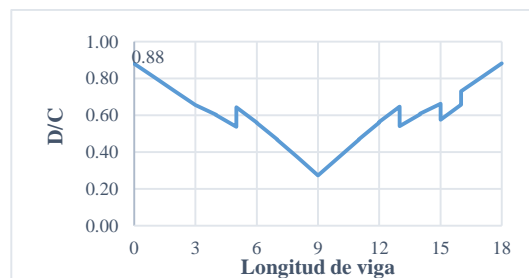
**Figura 12.**

*Comparación de demanda y capacidad a flexión*



**Figura 13.**

*Comparación de demanda y capacidad a cortante.*



### 3.2 Respuesta estructural del puente tipo con carga explosiva para los casos 1, 2 y 3

#### 3.2.1 Resultados de fuerzas interiores (momento y cortante) y desplazamiento.

Las respuestas máximas estructurales para los tres primeros casos, presentados en la tabla 9, muestran que cuando la explosión ocurre lo más cercano al centro de luz del puente, el momento

al igual que el desplazamiento vertical llegan a su valor máximo, mientras que el cortante aumenta hacia su valor más crítico cuando la explosión ocurre cerca a los apoyos. Todas las vigas presentan un comportamiento estructural similar. Estos resultados son congruentes con los presentados por Islam et al (Islam & Yazdani, 2008), donde el puente estudiado pierde su estabilidad e integridad. Para mayor detalle, el lector debe revisar las respuestas estructurales al igual que las gráficas de demanda-capacidad para los siete casos de carga que se encuentran en el ANEXO E.

**Tabla 9.**

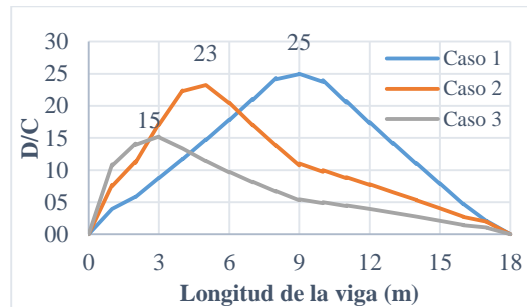
*Respuestas máximas en vigas afectadas por la carga explosiva para cada caso de estudio*

<b>Viga</b>	<b>M(MN.m)</b>	<b>V(MN)</b>	<b><math>\Delta</math>(m)</b>
Caso 1	117.14	16.40	0.66
Caso 2	109.09	28.36	0.48
Caso 3	71.84	37.75	0.26

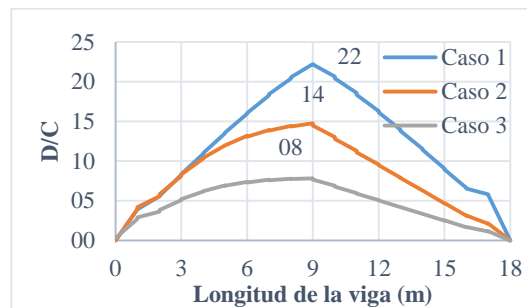
Nota. Basados en CSiBridge.

### **3.2.2 Análisis de demanda-capacidad.**

En las vigas interiores, la relación D/C máxima a flexión (gráfica 14) alcanza valores máximos cerca de los puntos de aplicación de la carga para cada uno de los casos. En cambio, para las vigas exteriores (gráfica 15) las respuestas picos ocurren cerca al centro de la luz del puente tipo. Las vigas interiores presentan los valores más altos de D/C en flexión, siendo el caso 1 el más crítico (D/C=25).

**Figura 14.***Demanda-capacidad a flexión en las vigas interiores*

Nota. Basados en CSiBridge.

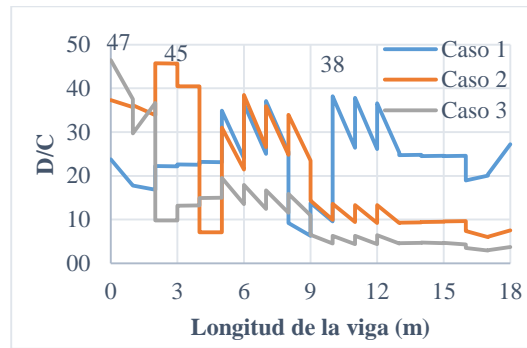
**Figura 15.***Demanda-capacidad a flexión en las vigas exteriores*

Nota. Basados en CSiBridge.

La curva de demanda-capacidad a cortante en las vigas interiores presenta cambios abruptos cerca de los puntos de análisis para cada uno de los casos (gráfica 16). En las vigas exteriores este cambio se da solo para los casos 2 y 3 cerca al centro del puente (gráfica 17). Los valores máximos de D/C a cortante ocurren en las vigas interiores, en donde el caso 3 es el más crítico excediendo en 47 veces la capacidad de la viga.

**Figura 16.**

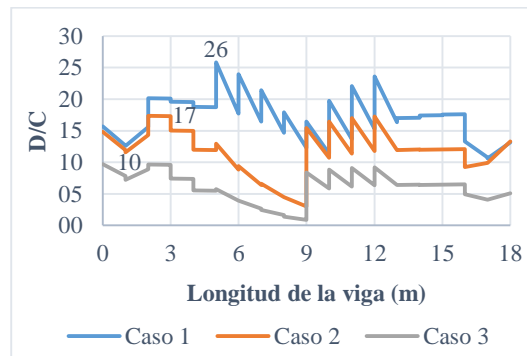
*Demanda-capacidad a cortante en las vigas interiores*



Nota. Basados en CSiBridge.

**Figura 17.**

*Demanda-capacidad a cortante en las vigas exteriores*



Nota. Basados en CSiBridge.

### 3.3 Respuesta estructural del puente tipo con carga explosiva para los casos 4, 5 y 6

#### 3.3.1 Resultados de fuerzas interiores (momento y cortante) y desplazamiento.

El momento máximo en el caso 4 se presentó en la viga exterior más cercana al igual que el desplazamiento vertical, en tanto el cortante máximo ocurre sobre la viga donde se ubicó el evento extremo. En los casos 5 y 6 las respuestas máximas a flexión y cortante ocurrieron en la viga interior y el desplazamiento vertical máximo en la viga exterior más cercana (tabla 10).

**Tabla 10.**

*Respuestas máximas en vigas afectadas por la carga explosiva para cada caso de estudio*

Casos	M(kN.m)	V(kN)	$\Delta$ (m)
Caso 4	144.93	20.23	0.80
Caso 5	131.03	36.17	0.56
Caso 6	89.93	50.84	0.31

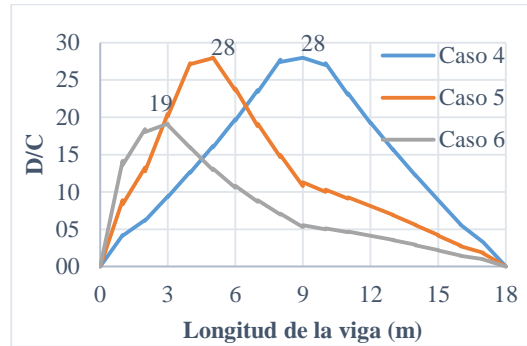
Nota. Basados en CSiBridge.

#### 3.3.2 Análisis de demanda-capacidad.

Los valores de relación de demanda-capacidad tanto en las vigas interiores como exteriores tienden a ser máximos en los puntos de aplicación para cada caso (gráfica 18). La relación D/C máxima a flexión se presentó en el caso 4 en la viga exterior más cercana con un valor de 31 veces la capacidad de diseño (gráfica 19). El valor máximo de D/C a cortante fue de 63 veces la capacidad y ocurrió en el caso 6 sobre la viga interior 1 (gráfica 20).

**Figura 18.**

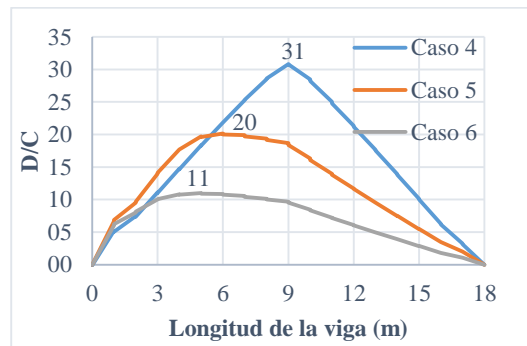
*Demanda-capacidad a flexión en la viga interior crítica.*



Nota. Basados en CSiBridge.

**Figura 19.**

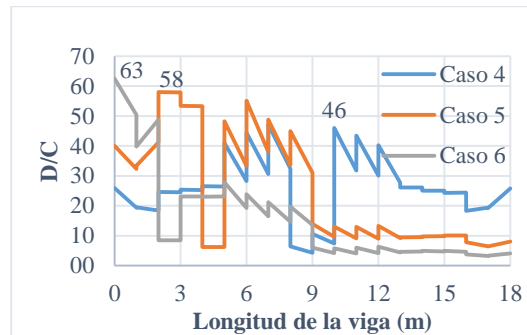
*Demanda-capacidad a flexión en la viga exterior crítica*



Nota. Basados en CSiBridge.

**Figura 20.**

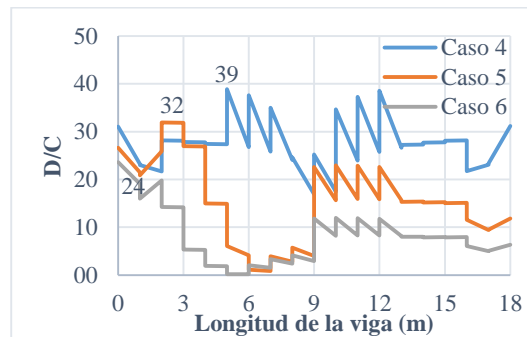
*Demanda-capacidad a cortante en la viga interior crítica.*



Nota. Basados en CSiBridge.

**Figura 21.**

*Demanda-capacidad a cortante en la viga exterior crítica*



Nota. Basados en el software CSiBridge.

### 3.4 Momentos flectores en la losa.

En la tabla 11 se compara el momento resistente de la losa en dirección transversal y el momento actuante debido a la combinación de la ecuación 6. Los valores exceden

considerablemente la resistencia a flexión en todos los casos, siendo el caso más crítico el fenómeno explosivo que ocurre entre las vigas interiores (casos 1 a 3).

**Tabla 11.**

*Comparación del momento resistente en la losa vs efectos de carga explosiva sobre la misma.*

	<b>Momento resistente MN.m/m</b>	<b>Momento requerido MN.m/m</b>
<b>Caso 1</b>	0.066	5.40
<b>Caso 2</b>		6.00
<b>Caso 3</b>		5.95
<b>Caso 4</b>		3.85
<b>Caso 5</b>		4.20
<b>Caso 6</b>		3.85

Nota. Basados en CSiBridge.

### 3.5. Respuesta estructural del puente tipo con carga explosiva para el caso 7.

#### 3.5.1. Resultados de fuerzas interiores y desplazamiento.

El momento máximo ocurrió en las vigas exteriores, con un valor de -60.00 MN.m. El cortante y deflexión vertical crítico, ocurrió en las vigas interiores y fue de 10.94 MN y 0.39m, respectivamente (tabla 12).

**Tabla 12.**

*Respuestas máximas estructurales en las vigas, efecto de la carga explosiva.*

	M(MN.m)	V(MN)	$\Delta$ (m)
Vigas interiores	-58.23	10.94	0.39
Vigas exteriores	-60.00	9.10	0.37

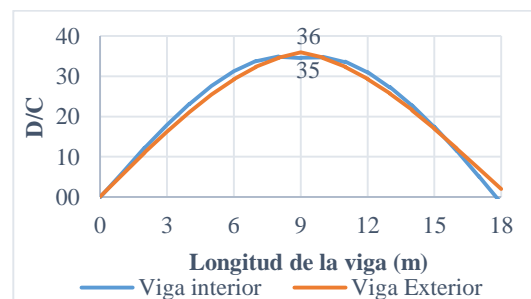
Nota. Basados en CSiBridge.

### 3.5.2. Análisis de demanda-capacidad.

Debido a la configuración del puente (simplemente apoyado), todas las vigas fueron diseñadas para resistir momento positivo, sin incluir acciones que crearan momentos negativos. Esta circunstancia genera mayor vulnerabilidad en la superestructura cuando la explosión ocurre bajo esta. La capacidad que aporta el acero de retracción y temperatura a flexión negativa en la losa es superada 36 veces de la requerida y ocurre en las vigas exteriores (gráfica 22). Por otra parte, el valor máximo de D/C a cortante fue 16 veces más que la capacidad soportada por las vigas exteriores (gráfica 23).

**Figura 22.**

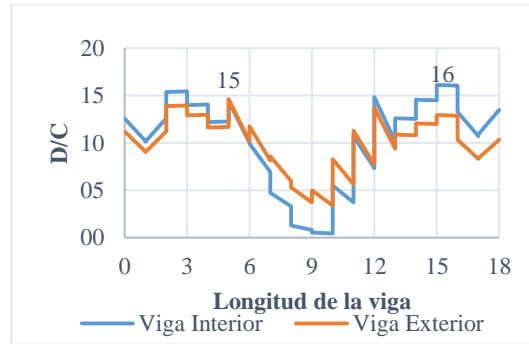
*Demanda-capacidad a flexión en las vigas*



Nota. Basados en el software CSiBridge

**Figura 23.**

*Demanda-capacidad a cortante en las vigas*



Nota. Basados en el software CSiBridge

#### 4. Conclusiones.

A partir de la revisión literaria y el análisis realizado, se puede concluir que:

La revisión literaria permitió encontrar datos confiables de las longitudes, tipologías y materiales de los puentes, que colapsaron en Colombia en los últimos años debido a eventos explosivos producto de atentados terroristas. Esto permitió centrar en el uso de un puente simplemente apoyado, de concreto reforzado con una longitud de 18m. Con esta configuración se definen los parámetros adicionales para analizar la situación accidental de las cargas explosivas.

Los parámetros necesarios para la evaluación de carga explosiva para el análisis estático lineal fueron: la cantidad de explosivo (TNT), sus puntos de aplicación y la presión atmosférica. El uso de la metodología estática lineal y la evaluación de demanda/capacidad en puentes vigalosa es limitada a pesar de los parámetros detallados en mención, pero resulta eficiente para la estimación de los efectos que la carga explosiva podría ocasionar en las estructuras. Además, el enfoque usado es versátil y tiene un bajo costo computacional.

Cuando la explosión ocurre debajo del puente, la relación demanda sobre capacidad (D/C) a flexión es mayor comparada con la obtenida en el mismo punto de aplicación, pero sobre la losa (caso 7 y caso 1 respectivamente). Esto debido a que el puente es simplemente apoyado y sus vigas se diseñan únicamente bajo flexión positiva y no sobre la flexión opuesta generada por una explosión de abajo hacia arriba del puente.

En todos los casos estudiados, las relaciones D/C para momento flector sobrepasa entre 8 y 36 veces la capacidad de diseño a flexión de las vigas, lo que indica que efectivamente se perderá la integridad total del puente en las cercanías a los puntos de aplicación de las cargas explosivas.

Finalmente, se aprecian relaciones D/C para fuerzas cortantes entre 15 y 63 veces la capacidad de diseño a cortante en los casos estudiados, lo que indica que efectivamente se perderá integridad total cerca a los apoyos del puente. La mayor relación D/C a cortante ocurrió en el modelo 6 donde la detonación se ubicó a una distancia horizontal de 2.25m desde el apoyo y sobre la viga interior 1.

## 5. Recomendaciones

Teniendo en cuenta las limitaciones del estudio, se recomienda un análisis más riguroso y detallado al usado en este trabajo. Sin embargo, los métodos más elaborados como los dinámicos, pueden llegar a ser complejos, con un alto costo computacional y necesidad de una alta experiencia en el modelado e interpretación correcta de los resultados. El método aquí propuesto podría formar la base para futuras investigaciones sobre los efectos explosivos en las diversas tipologías de puentes.

### Referencias Bibliográficas

- Andreou, M., Kotsoglou, A., & Pantazopoulou, S. (2016). Modelling Blast Effects on a Reinforced Concrete Bridge. *Hindawi Publishing Corporation*, 1-11.
- Carrillo, J., Arciniegas, L., & Molina, J. (2014). Evaluación de las estadísticas de colapsos de puentes en Colombia por cargas explosivas.", . *Ciencia e ingeniería neogranadina*, Vol. 24, No. 2, 157-175.
- CCP14 (Código Colombiano de puentes) . (2014). *Norma colombiana de diseño de Puentes-LRFD-CCP-14*. Bogotá DC.
- Draganić, H., & Sigmund, V. (2014). Blast loading on structures". *Technical Gazette*, Vol. 19, No. 3, 643-652.
- García Rosell, C. (2006). *Análisis y diseño de puentes de concreto armado, método AASHTO - - LRFD, 1st ed*. Perú: Fondo Editorial del Capítulo de Estudiantes ACI de la Universidad Nacional de Ingeniería. Departamento Académico de Estructuras.
- Invias & Ministerio de transporte. (2005). *Luces típicas para puentes en concreto*. Bogotá DC.
- Islam, A., & Yazdani, N. (2008). Performance of AASHTO girder bridges under blast loading. *ScienceDirect*, vol. 30, 1922-1937.
- Kinney, G., & Graham, K. (1985). *Explosive Shocks in Air*. New York : Springer-Verlag.
- Muñoz, E. (2003). Estudio de las causas de colapso de algunos puentes en Colombia. *Facultada de ingeniería Universidad Pontificie Javeriana*, 1-20.

Nassr, A., Razaqpur, G., & Tait, M. F. (2012). Single and multi degree of freedom analysis of steel beams under blast loading. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 242, 63-77.

Neri Larios, F. (2011). *Caracterización de la onda de choque sobre estructuras*. Especialista, Centro de investigaciones matemáticas, A.C.

Trujillo Orozco, J. (1993). *Diseño de puentes de concreto, 3rd ed.* . Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.