

**12vo SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS,  
GEOTECNIA Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**Título**

**FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE DISEÑO ÓPTIMO DE  
PUENTES DE CARRETERA DE HORMIGÓN ARMADO.**

*Title*

***FORMULATION OF THE OPTIMAL DESIGN PROBLEM FOR  
HIGHWAY REINFORCED CONCRETE BRIDGES***

**Autores/Authors:** Naile Luna Delgado. ECOING 25, Cuba. E-mail: [nluna@ecoing25.cu](mailto:nluna@ecoing25.cu),  
Ivan Negrín Díaz, Facultad de Construcciones, UCLV, Cuba. E-mail: [indiaz@uclv.cu](mailto:indiaz@uclv.cu),  
Ernesto L. Chagoyén Méndez, Facultad de Construcciones, UCLV, Cuba. E-mail:  
[chagoyen@uclv.edu.cu](mailto:chagoyen@uclv.edu.cu)

**Resumen:**

La realización de proyectos más racionales, con una evaluación más segura y a menor costo debe constituir una premisa fundamental en la rama de la construcción en Cuba. El empleo de la optimización estructural da respuesta a este planteamiento. En este trabajo se formula el problema de optimización para el diseño de puentes de carreteras de vigas y losas de hormigón armado., incluyendo hasta la interacción suelo estructura estática (ISEE) y el diseño de la cimentación cuando esta es superficial.

Se usa como función objetivo el costo mínimo del conjunto de elementos que componen la superestructura y subestructura del puente, modelando matemáticamente el problema mediante la elección de las variables y sus posibles restricciones.

La formulación obtenida resulta en el primer paso para resolver el problema de diseño óptimo de puentes de carretera de hormigón armado. La gran cantidad de resultados que podrán obtenerse, permitirá llegar a conclusiones y recomendaciones sobre la influencia de cada variable, criterios de diseño para proyectar conjuntos estructurales racionales económicamente y pautas a seguir en futuras investigaciones en el campo de la optimización del diseño de puentes.

***Abstract:***

Achievement of more rational projects, with a safer evaluation and at a lower cost should constitute a fundamental premise in the construction branch in Cuba. Using of structural optimization responds to this approach. In this paper, optimization problem is formulated for designing of road RC bridges of beams and slabs, including static soil-structure interaction (SSEI) and designing of it shallow foundation. The minimum cost of the set of elements that integrate the bridge's superstructure and substructure is used as an objective function, modeling the problem mathematically by choosing the variables and their possible restrictions.

The formulation obtained results in the first step to solve the problem of optimal design of RC road bridges. The large number of results that can be obtained, will allow reaching conclusions and recommendations on the influence of each variable, design criteria to project structural sets economically rational and guidelines to follow in future research in the field of bridge design optimization.

**Palabras Clave:** Optimización estructural; puentes; diseño

**Keywords:** *Structural optimization; bridges; design*

**Introducción**

Un diseño estructural tradicional supone un proceso iterativo que parte del pre-dimensionamiento del ingeniero a partir de su experiencia o especificaciones de la normativa vigente. Posteriormente, el análisis de la estructura permite terminar de definirla y comprobar su idoneidad. Normalmente es necesario realizar varios ajustes y correcciones sobre el proyecto inicial para obtener un diseño lo suficientemente seguro. En este proceso la experiencia del proyectista tiene una gran influencia en la calidad del resultado final y en el tiempo empleado para obtenerlo, ya que existen múltiples soluciones factibles para un mismo problema y resulta difícil determinar el más racional.

Una forma de obtener diseños racionales la constituye el empleo de la optimización, proceso a través del cual se busca obtener la mejor solución posible, de entre un grupo de resultados, que a su vez satisfaga un determinado número de restricciones.

En ingeniería, se define la optimización estructural como: “La búsqueda de diseños de estructuras que minimicen una función objetivo, frente a un juego de variables de diseño y teniendo en cuenta restricciones a cumplir, tales como valores máximos de esfuerzo o deformación, volumen, masa, etc., obteniendo la mejor solución y que a su vez se fabrique con la menor cantidad de material posible”.

En este trabajo se realiza una definición completa del problema de optimización de un puente hiperestático de 3 tres luces tipo viga-tablero de hormigón armado, considerando en el análisis todo el conjunto de elementos que componen la superestructura y la subestructura, definiendo la función objetivo a optimizar, los parámetros fijos, las variables y sus restricciones.

Cabe destacar que el único precedente a la optimización de este tipo de estructuras en Cuba se realizó para un puente tipo viga-losa de 20 metros de luz, teniendo en cuenta solamente los elementos de la superestructura, definiendo una función multiobjetivo para controlar, además del costo, el peso de la superestructura considerando de esta manera la incidencia que tendría la misma en la subestructura, buscando simplificar el problema de optimización.

## Desarrollo

En términos matemáticos, el problema de diseño óptimo se puede formular como: encontrar el vector de variables de diseño  $x$  que minimice la función:  $f(x)$

Sujeta a:

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_i$$

$$g_i(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_d$$

$$x_{il} \leq x_i \leq x_{is} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Donde:

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



$x$  es el vector  $n$ -dimensional de variables de diseño;

$f(x)$  es la función objetivo;

$h_j(x)$  restricción de diseño de igualdad  $j$ ;

$g_i(x)$  restricción de diseño de desigualdad  $j$ ;

$m_i$  el número de restricciones de igualdad;

$m_d$  el número de restricciones de desigualdad;

$n$  el número de variables,

y  $x_{il}$  ( $x_{is}$ ) el límite inferior (superior) de la variable  $i$ .

**Elección del criterio de optimización.**

Existen diversos criterios de optimización, y la elección del apropiado para cada caso dependerá del objetivo final (Negrín M, A. 2009). Entre estos podemos encontrar:

- Mínimo costo total: Es el más usado en nuestra esfera ya permite encontrar el valor mínimo de la suma de todos los gastos para la construcción de una estructura.
- Mínimo peso: usado para la búsqueda de una estructura lo más ligera posible en aras de aminorar por ejemplo costos de transportación, o con el objetivo se disminuir el peso que la misma transmitirá a otra estructura.
- Mínimo gasto de armaduras o encofrado: criterios que tendrían aplicación en lugares donde escasea el acero o la madera.
- Mínimo espacio funcional útil: criterio factible en proyectos arquitectónicos ya que se trata de optimizar el espacio tomando como función objetivo el área del local e imponiendo diferentes restricciones.

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



Por las condiciones actuales de Cuba es indispensable que este estudio vaya dirigido a hacer la obra lo más económica posible, de ahí que se eligió como criterio la minimización del costo total del puente; para ello será necesario encontrar la combinación de variables que cumpliendo con las restricciones impuestas permitan como resultado final la estructura que presente el menor costo de construcción.

**Definición de la función objetivo.**

La función objetivo es la que mide cuantitativamente el funcionamiento del sistema en un proceso de optimización, esto quiere decir que se busca una maximización o minimización de esta, y es la base para seleccionar dentro de una gama de diseños aceptables.

Para el caso de estudio se ha definido la función objetivo como:

$$C_{total} = C_{superestructura} + C_{subestructura}$$

*Donde:*

*C<sub>total</sub>: es el costo total del conjunto*

*C<sub>superestructura</sub> = C<sub>viga</sub> + C<sub>tablero</sub>*

*C<sub>subestructura</sub> = C<sub>cabezales</sub> + C<sub>pilas</sub> + C<sub>cimentación</sub>*

*C<sub>viga</sub>: Sumatoria de los costos de las vigas*

*C<sub>tablero</sub>: Sumatoria de los costos del tablero*

*C<sub>cabezales</sub>: Sumatoria de los costos de los cabezales*

*C<sub>pilas</sub>: Sumatoria de los costos de las pilas*

*C<sub>cimentación</sub>: Sumatoria de los costos de la cimentación*

En todos los casos la sumatoria de los costos incluye el costo del hormigón, del acero, del encofrado, de la fabricación y/o montaje de cada elemento.

### **Elección de las variables.**

Las variables están presentes dentro de la función objetivo y pueden tomar diferentes valores durante el proceso de optimización. Se dividen en dos grupos: las independientes, que no dependen de otras y se fijan antes de comenzar el problema, y las dependientes que dependen de las anteriores.

VARIABLES INDEPENDIENTES:

- Número de vigas en la sección del tablero (n.vig)
- Dimensiones de la sección transversal de las vigas I (peralto, ancho del ala, ancho del alma, espesor del ala, espesor del alma)
- Espesor de la losa superior del tablero (e.tab)
- Peralto y ancho de cabezales (p.cab, a.cab)
- Peralto y ancho de pilas (a.pil)
- Numero de pilas por apoyo (n.pil)
- Rectangularidad de cimiento aislado (r.cim)

Los límites mínimos y máximos que pueden tomar las variables, así como los intervalos en que se moverán sus valores durante el proceso de optimización se muestran en la *Tabla 1*.

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



Tabla 1. Definición de variables Independientes

<b>Nombre de la Variable</b>	<b>Denominación</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Intervalo de movimiento</b>
Numero de vigas	n.vig	6 u	18 u	2 u
Peralto de vigas I	h.vig	(Luz/20 – e.ta)	(Luz/10 – e.tab)	10 cm
Ancho del ala superior	a.ala.s	(0.51 * h.vig)	(0.51 * h.vig)	-
Ancho del ala inferior	a.ala.i	(0.37 * h.vig)	(0.37 * h.vig)	-
Espesor del ala superior	e.ala.s	(0.16 * h.vig)	(0.16 * h.vig)	-
Espesor del ala inferior	e.ala.i	(0.15 * h.vig)	(0.15 * h.vig)	-
Espesor del alma	e.alm	(0.17 * h.vig)	(0.17 * h.vig)	-
Espesor de losa de tablero	e.tab	12 cm	20 cm	2 cm
Peralto de cabezales	p.cab	0.7 m	1.1 m	10 cm
Ancho de cabezales	a.cab	0.6 m	1.0 m	10 cm
Peralto y ancho de pilas cuadradas	a.pil	0.5 m	0.9 m	10 cm
Numero de pilas por apoyo	n.pil	4 u	8 u	2 u
Rectangularidad de cimiento aislado	r.cim	1	2	-

VARIABLES DEPENDIENTES:

- Área de acero de vigas
- Área de acero de la losa
- Área de acero de cabezales
- Área de acero de pilas
- Área de acero de cimentación

Las variables independientes irán tomando valores durante el proceso en función del diseño estructural de los elementos.

### **Identificación de las restricciones.**

Las restricciones son todos aquellos valores que tienen que satisfacer, como condiciones, los parámetros variables para considerar que un diseño es óptimo y se definen matemáticamente como limitaciones específicas inferiores, superiores o de igualdad impuestas sobre las variables de diseño o sobre los parámetros asignados en forma de ecuaciones e inecuaciones. (Negrín, A. 2005)

Algunos autores definen como ecuaciones de estado a todas aquellas restricciones que deben cumplir las variables para hacer cumplir los requisitos de: resistencia, estabilidad, deformación, fisuración, etc. Las ecuaciones de estado son aquellas que rigen el diseño propiamente dicho y que dicho sea de paso son más complejas que las demás restricciones. (Negrín M, A. 2009)

Otras restricciones pueden ser por ejemplo: rangos de variables, criterios de rectangularidad de los elementos, espaciamentos mínimos y máximos del acero de refuerzo, recubrimientos y otras que pueden estar dadas por cuestiones constructivas, económicas, tecnológicas, etc.

En la *Tabla 1. Definición de variables Independientes*, se pueden apreciar los límites mínimos y máximos aplicados a las variables para definir los intervalos de movimiento, basados en criterios de esbeltez, de resistencia, de deformación u otros de tipo constructivo recomendados por diferentes autores según la bibliografía consultada.

### **Declaración de los parámetros asignados.**

Los parámetros asignados son los que no se modificaran bajo ninguna situación y se definen generalmente al inicio. Para el caso de puentes los parámetros definitorios son los relativos a su geometría, a las acciones que actúan sobre él, a la forma de fabricación de los elementos, y otras que se han fijado tomando en consideración la experiencia en otros problemas de optimización.

En el caso específico que nos ocupa serán:

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



- Ancho del puente = Ancho de Carril \* Número de carriles + Ancho de paseos \* 2 + Espesor de borde \* 2 = (3.75 m \* 2 + 3.0 m \* 2 + 0.35 \* 2) = 14.2 m (según especificaciones de la NC-853:2012)
- Luces: 10 m, 12 m, 14 m, 16 m, 18 m, 20 m, 22 m, 24 m, 26 m, 28 m, 30 m.
- Longitud del puente: 3 tramos con las combinaciones de luces siguientes de la Tabla 2.

Tabla 2. Combinaciones de luces

<b>Combinación</b>	<b>Luz Extrema (m)</b>	<b>Luz Central (m)</b>	<b>Luz Extrema (m)</b>	<b>Longitud del Puente (m)</b>
1	10	14	10	34
2	10	16	10	36
3	12	16	12	40
4	12	18	12	42
5	12	20	12	44
6	14	18	14	46
7	14	20	14	48
8	14	22	14	50
9	16	20	16	52
10	16	22	16	54
11	16	26	16	58
12	18	24	18	60
13	18	26	18	62
14	18	28	18	64
15	18	30	18	66
16	20	26	20	66
17	20	28	20	68
18	20	30	20	70
19	22	28	22	72
20	22	30	22	74
21	24	30	24	78

- Altura de las pilas: 5 m
- Aparatos de apoyo: de neopreno.
- Tipología de la sección transversal de vigas: Vigas I

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



- Tipología de la sección transversal de pilas: Sección cuadrada
- Tipología de la sección transversal de cabezales: Sección rectangular
- Tipología de la Cimentación: Cimientos aislados
- Cantidad, Peralto, ancho y refuerzo de las vigas diafragma: el peralto de la viga diafragma será de un 70 a un 75% del peralto de las vigas principales. Se colocarán en los extremos de la luz para darle rigidez a las vigas I. Para los tramos de 30 m se colocará además una en el centro de la luz o donde el momento positivo es máximo.
- Espesor de capa de asfalto y su carga: la capa de asfalto tendrá 8 cm de espesor
- Carga que transmiten las barandas o defensas
- Carga de viento que actúa sobre el tablero
- Carga vehicular
- Condiciones de apoyo:

Se incluye la interacción suelo estructura estática, utilizando el coeficiente de rigidez variable de la base, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal de la base (Chagoyén, M. 2018). Se excluyen los estribos del análisis, modelando el vínculo como apoyos de neopreno elásticos con una rigidez finita.
- Vínculos entre elementos: las alas de las vigas forman parte del tablero por lo que existe una unión hiperestática entre ellos, siendo ambos elementos continuos en toda la longitud del puente. Las vigas apoyan sobre los cabezales con una unión articulada, al igual que los cabezales sobre las pilas.
- Diámetros de acero disponibles: 13 mm (1/2”), 16 mm (5/8”), 20 mm (3/4”), 25 mm (1”), 32 mm (1 ¼”).
- Resistencia característica a compresión del hormigón: 25 MPa
- Resistencia característica del Acero: 420 MPa
- Diámetro de los cercos: 10 mm, 12 mm
- Recubrimientos: 7 cm en cimentaciones, 5 cm en pilas, 2 cm en el tablero y 3 cm en vigas y cabezales (según NC-207:2003)

### **Método de optimización**

Los métodos de optimización de estructuras empleados en los últimos cuarenta años pueden dividirse en dos grandes grupos: programación matemática aplicando los métodos clásicos y los métodos heurísticos y meta-heurísticos.

Los métodos clásicos buscan y garantizan un óptimo local de tipo numérico y permiten un elevado número de restricciones. Se basan en la programación lineal mixta, la programación cuadrática, programación no lineal, programación estocástica, y la programación dinámica. Entre ellos podemos citar el método de Malla de Puntos o Ground Structure, las técnicas geométricas y las técnicas híbridas.

Los métodos heurísticos y metaheurísticos imitan fenómenos sencillos observados en la naturaleza, usan mecanismos específicos para evitar óptimos locales, para tener certeza de haber encontrado el mínimo o máximo absoluto debe ejecutarse varias veces el algoritmo, NO permiten elevado número de restricciones, y exploran gran número de soluciones en tiempo muy corto. Entre ellos podemos mencionar el de Algoritmos Genéticos, el de Recocido Simulado (SA), el de Redes Neuronales, el de Búsqueda Aleatoria, el de Enjambre de Partículas (PSO) y el de Optimización por Colonia de Hormigas (ACO).

Por trabajos anteriores de optimización se ha podido determinar que las técnicas heurísticas y metaheurísticas son las más potentes a la aplicación en la optimización estructural. Dentro de las mismas, con la computación evolutiva y específicamente con los Algoritmos Genéticos se pudieron obtener resultados más exactos en problemas donde la función objetivo es el costo.

Tomando como base los resultados de trabajos precedentes, se propone partir de la definición de un entorno racional de variables que garantice la rápida convergencia a un mínimo global de la función objetivo, aplicando la hibridación entre métodos heurísticos y metaheurísticos, que ha demostrado ser una herramienta robusta de optimización que garantiza la búsqueda eficiente del mínimo global.

### **Modelación del puente.**

Superestructura: conjunto de vigas, losas, diafragmas, capa de rodadura, aceras, contenes, pretilos y pasamanos.

Subestructura: dispositivos de apoyo, cabezales, pilas, estribos y cimentación.

#### *Sección transversal:*

Se diseñan puentes de carretera para vías rurales Categoría I en terreno llano, con Intensidad de tránsito (PAVDT) entre 4000 y 8000 Veh/día. La calzada está compuesta por dos carriles de circulación de 3.75 m de ancho, con paseos a ambos lados de la vía de 3.00 m de ancho cumpliendo con las especificaciones de la NC-853:2012.

Se establece un espesor de pavimento flexible de 8 cm, compuesto por una capa de 5 cm de HAC semi-denso y otra de 3 cm de HAC denso. No se contemplan aceras para el caso de estudio, pero se dispondrán barandas de hormigón de 0.75 m de altura sobre el nivel de rasante de la vía.

#### *Tipología:*

Puentes hiperestáticos de 3 luces de viga y tablero de hormigón armado. Las vigas serán prefabricadas, de sección “I” y continuas a lo largo del puente. La continuidad se logrará mediante aceros salientes del refuerzo longitudinal, que se empalmarán a la viga siguiente, refundiendo con hormigón in situ la junta conformada.

Las alas de las vigas I formarán parte del tablero, refundiendo con hormigón in situ los espacios entre vigas. Para ello se dejarán aceros de refuerzo previstos durante la fabricación de las vigas. (Figura 1)

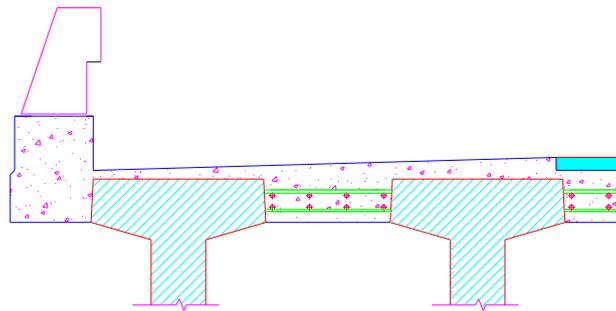


Figura 1. Detalle de Tablero. (Fuente: Proyecto típico de puentes del pedraplén Caibarién-Cayo Santa María)

Los cabezales y pilas serán de hormigón armado, descansando sobre una cimentación de tipo aislada suponiendo que el estrato resistente se encuentra a poca profundidad.

No se considera en el análisis los estribos. Estos serán modelados como apoyos elásticos en el esquema del puente.

#### *Modelación de las cargas*

Las cargas que actúan sobre el puente se dividen en tres tipos: las acciones de carácter permanente, las de carácter accidental y las consideradas de otro tipo. De manera general se clasifican como permanentes el peso propio de los elementos, la presión de empuje debido al peso del relleno, la acción de la fuerza de pretensado, la presión de la corriente de agua, la acción debida a la retracción y la acción producida por asientos del suelo. Como accidentales se definen la acción vertical debido a las cargas accidentales móviles, la presión y empuje de terreno por la presencia de la carga accidental móvil, los posibles impactos horizontales y la acción longitudinal debido al frenado o arranque de los vehículos. En cambio las de otro tipo pueden ser la carga de viento en la estructura, las producidas por variaciones de temperatura, la carga sísmica y las que puedan surgir durante la construcción.

#### Cargas actuantes sobre los puentes estudiados:

##### Permanentes

- Peso propio de cada uno de los elementos del conjunto, calculados a partir de los volúmenes de acuerdo a las dimensiones y los pesos volumétricos de los materiales componentes. Esta carga irá tomando valores diferentes en el propio proceso de optimización de acuerdo a la variación de las dimensiones de los elementos.

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”

- Carga de la capa de asfalto:  $23 \text{ kN/m}^3 * 0.08 \text{ m} = 1.84 \text{ kN/m}^2$
- Carga que transmiten las barandas o defensas a ambos lados de la vía:  $2.95 \text{ kN/m}$

Accidentales:

- Acción vertical debido a las cargas accidentales móviles.

Se establecen según las especificaciones de la norma cubana NC-733:2009, ubicando los vehículos MS-32 (camión tipo) y NK-80 (vehículo militar).

Vehículo MS-32

Se ubicará transversalmente todos los vehículos que sea posible (4 para este caso), siempre teniendo en cuenta que la separación entre ellos no será menor que 1.20 m y del borde de la calzada no será menor que 0.6 m. (Figura 2 y 3).

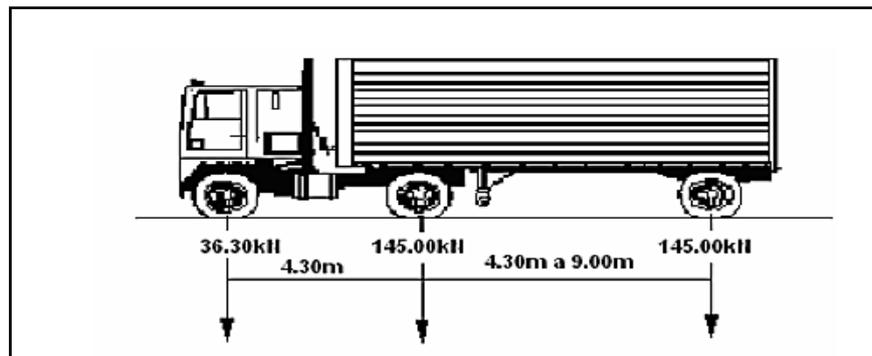


Figura 2. Disposición y dimensiones longitudinales MS-32. (Fuente: NC-733:2009)

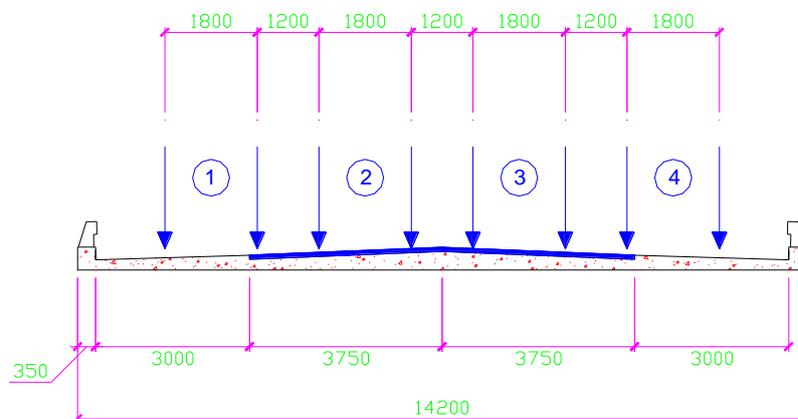


Figura 3. Distribución transversal de la carga móvil del vehículo MS-32. (Fuente: Propia)

Longitudinalmente se ubicará un vehículo por carril de circulación en el mismo sentido o en su defecto se podrá colocar una carga distribuida sustitutiva que incluye una carga concentrada para el cálculo de momento y otra para el cálculo del cortante. Se valorará el uso de una u otra en función de obtener los efectos más desfavorables (Figura 4).

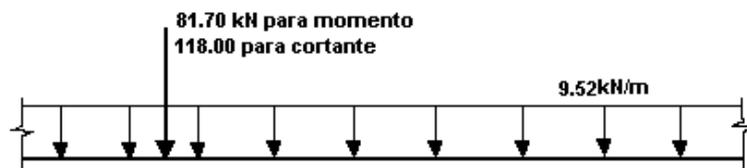


Figura 4. Esquema de la carga distribuida sustitutiva del MS-32 (Fuente: NC-733:2009)

#### Vehículo NK-80

Se dispondrá un único vehículo situado en cualquier posición de la calzada, paralelo al eje del puente, tal que genere el efecto más desfavorable. La distancia transversal de un eje al borde interior de la guarnición no será que de 0.65 m. Se ubicarán 8 ejes en total, distribuidos en pares separados a 1.20 m longitudinalmente, y 2.7 m transversalmente, con valor de carga de 100 kN cada uno. (Figura 5 y 6)

No se considera la acción simultánea de este vehículo con el MS-32, así como tampoco la acción de frenado y arranque, la fuerza centrífuga y el coeficiente dinámico. En cambio si se considera el impacto transversal.

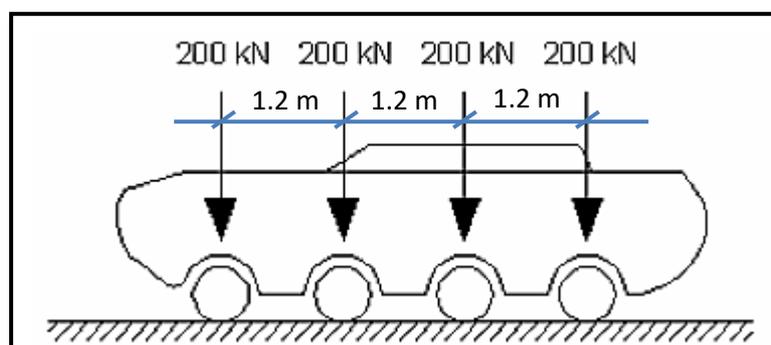


Figura 5. Disposición y dimensiones longitudinales NK-80. (Fuente: NC-733:2009)

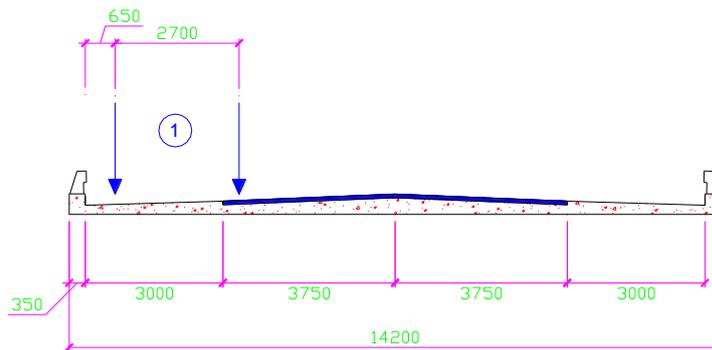


Figura 6. Distribución transversal de la carga móvil del vehículo NK-80. (Fuente: Propia)

- Impactos horizontales.

Para el vehículo MS-32 se aplica una carga distribuida de 7.5kN/m a una altura de 0.25 m por encima de la rasante. Para el NK-80 se considera una carga concentrada aplicada en el centro del tramo analizado de valor 50 kN y a nivel de rasante.

- Acción longitudinal debido al frenado o arranque de los vehículos.

Carga concentrada aplicada en cada una de las sendas de circulación en el mismo sentido, a 1.80m por encima del nivel de rasante con valor de 90 kN.

Otras:

- Carga de viento

Se considera la carga de viento actuante verticalmente sobre el tablero como una carga distribuida a lo largo del mismo aplicada a una distancia del borde del tablero del 40% de su ancho.

Se supone además el viento incidiendo horizontal y perpendicularmente al eje longitudinal del puente, actuando sobre las pilas, cabezales, vigas y tablero a barlovento y sotavento. Adicionalmente se tomará en cuenta el viento actuando sobre vehículos circulantes en la vía.

La carga superficial característica del viento será de 1.586 kN/m<sup>2</sup>, a la cual se le aplicará el coeficiente de forma correspondiente según el elemento analizado. Para determinar este valor se asume que la obra se encuentra en terreno llano, abierto y en sitios normales.

### 3. Conclusiones

Tras haber cumplido el objetivo fundamental del presente trabajo que consistía en formular el problema de diseño óptimo de puentes de carretera de hormigón armado podemos arribar a las conclusiones siguientes:

- El criterio de optimización sugerido para este caso es el de costo mínimo ya que la intención es obtener recomendaciones para diseños más económicos en cada una de las combinaciones de luces analizadas.
- Las variables que tienen mayor incidencia en el problema son: la cantidad de vigas, las dimensiones de la sección transversal de las mismas, el espesor del tablero, la cantidad de pilas y la rectangularidad de la cimentación.
- Debido a la complejidad de la función objetivo, donde intervienen gran cantidad de variables y restricciones, se propone para la solución del problema la hibridación entre métodos heurísticos y metaheurísticos de optimización, entre ellos el uso de Algoritmos Genéticos.
- A partir de este trabajo se puede proceder a la próxima etapa de la investigación que consiste en aplicar la formulación obtenida para obtener resultados que permitan llegar a recomendaciones, criterios de diseño racionales y pautas a seguir en futuras investigaciones en el campo de la optimización del diseño de puentes.

### Bibliografía:

1. Chagoyen M, E.L., Negrín D, I., Negrín M, A., Nápoles L, J. (2018). Modelo de base deformable no lineal para interacción suelo estructura en el diseño óptimo de conjuntos estructurales. Ponencia a la IX Convencion Científica de Ingeniería y Arquitectura. Cuba.
2. Martín R, E. (2018). Optimización Estructural en Superestructuras de puentes con vigas simplemente apoyadas. Tesis de Grado. Santa Clara, Cuba: Facultad de Construcciones. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
3. Monleon C, S. (2017). Diseño estructural de puentes. Valencia, España: Editorial Universitat Politècnica de València.

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



4. Negrín, A. (2005). Un enfoque general sobre diseño óptimo de estructuras. Boletín estadístico de la construcción. Tegucigalpa, Honduras: Cámara Hondureña de la construcción.
5. Negrin Diaz, I. A. (2016). Optimización de conjuntos estructurales considerando los factores usualmente ignorados en la modelación usando la OAPI SAP 2000-MatLab. Santa Clara, Cuba: Facultad de Construcciones. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
6. Negrín M, A. (2009). Diseño óptimo de estructuras de Hormigón Armado. Monografía. Santa Clara, Cuba: Facultad de Construcciones. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
7. Negrín M, A. (2014). Optimización de conjuntos estructurales de edificios apertados de Hormigón Armado. Santa Clara, Cuba: Facultad de Construcciones. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
8. Negrín M, A. (2010). Optimización de conjuntos estructurales de edificios apertados de hormigón armado. Santa Clara, Cuba: Facultad de Construcciones. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
9. NC:207, (2003). Requisitos generales para el diseño y Construcción de estructuras de Hormigón. Cuba
10. NC:285, (2003). Carga de viento. Metodo de cálculo. Cuba
11. NC:733, (2009). Carreteras. Puentes y Alcántarillas. Requisitos de Diseño y Método de Cálculo. Cuba, Patente nº 733.
12. NC:853, (2012). Carreteras Rurales - Categorizacion Tecnica y características geométricas del trazado directo. Cuba
13. Seminario M., E. (2004) Guía para el diseño de puentes con vigas y losa. Piura, Perú: Facultad de Ingeniería.
14. Specifications, A.-L. B. D. (2004). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Washington, DC.