

# Diseño y asistencia técnica en construcción del nuevo puente atirantado de Honda sobre el Río Magdalena en Colombia

## *Design and technical assistance during construction of the new Honda cable stayed bridge over Magdalena River in Colombia*

Nelson Betancour Suárez<sup>a</sup>, Juan A. Sobrino<sup>b</sup>, Francisco Jordán García<sup>c</sup>, Alicia Serrano<sup>d</sup>, Rafael de Oliveira Cabral<sup>e</sup>, Andrés Jiménez Cárdenas<sup>f</sup>, Francisco A. Galvis<sup>g</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero Civil. Gerente Técnico. Pedelta Colombia. [nbetancour@pedelta.com.co](mailto:nbetancour@pedelta.com.co)

<sup>b</sup> PhD PE PEing, ing, ICCP. C.E.O.. Pedelta. [jsobrino@pedelta.com](mailto:jsobrino@pedelta.com)

<sup>c</sup> ICCP, PE, PEng. Director Técnico. Pedelta. [jjordan@pedelta.com](mailto:jjordan@pedelta.com)

<sup>d</sup>Ingeniero Civil. Jefe de proyectos. Pedelta Colombia SAS. [aserrano@pedelta.com.co](mailto:aserrano@pedelta.com.co)

<sup>e</sup>Ingeniero Civil. Jefe de proyectos. Pedelta. [rcabral@pedelta.com](mailto:rcabral@pedelta.com)

<sup>f</sup>Ingeniero Mecánico. Ingeniero de proyectos. Pedelta Colombia. [ajimenez@pedelta.com.co](mailto:ajimenez@pedelta.com.co)

<sup>g</sup>Candidato a doctorado. Stanford University, USA. [galvisf@stanford.edu](mailto:galvisf@stanford.edu)

## RESUMEN

En este artículo se describe el proyecto estructural, criterios de diseño y consideraciones de la construcción del nuevo puente atirantado de Honda, construido en el año 2019. El puente cruza el Río Magdalena, el más largo de Colombia, entre los municipios de Puerto Bogotá y Honda. La estructura cuenta con tres luces, un vano principal de 247.5 m y dos vanos laterales de compensación de 79.0 m, para una longitud total de 405.5 m y ancho útil de 14.1 m. El sistema estructural es en hormigón presforzado con superestructura construida en voladizos sucesivos. Pedelta realizó el diseño conceptual, diseño de detalle y la asistencia técnica durante su construcción.

## ABSTRACT

This manuscript describes the structural project, general design criteria and construction considerations of the new Honda cable-stayed bridge built in 2019. The bridge crosses the Magdalena River, the longest river in Colombia, between the municipalities of Puerto Bogotá and Honda. The bridge is a three span concrete structure with a main span of 247.5 m and two lateral spans of 79.0 m, for a total length of 405.5 m with a usable width of 14.1 m. Pedelta carried on the concept design, detail design, and construction engineering.

**PALABRAS CLAVE:** Puente atirantado, diseño estructural, diseño sísmico, control geométrico, Colombia.

**KEYWORDS:** Cable stayed bridge, structural design, seismic design, geometry control, Colombia.

## 1. Introducción

El proyecto de construcción del nuevo Puente de Honda es una obra pública que hace parte del programa “Vías para la equidad” a cargo del Instituto Nacional de Vías, INVIAS, de

Colombia. La Figura 3 presenta una vista general de la estructura justo después de fundir la dovela de cierre.

La obra se desarrolla sobre el Río Magdalena, uno de los ríos más grandes de Colombia, ubicado aproximadamente a 160 km al noreste de la capital, Bogotá, entre los municipios de Honda, Tolima y Puerto Bogotá, Cundinamarca (**Figura 1**).

El objetivo del proyecto es el mejoramiento de las condiciones de operación, seguridad y comodidad de la población a través de la construcción de obras que permitan descongestionar el tránsito de vehículos por el área urbana de Honda y así fortalecer la conexión entre los departamentos de Tolima y Cundinamarca, punto clave de conexión vial de la parte central con el norte y el oriente del país.

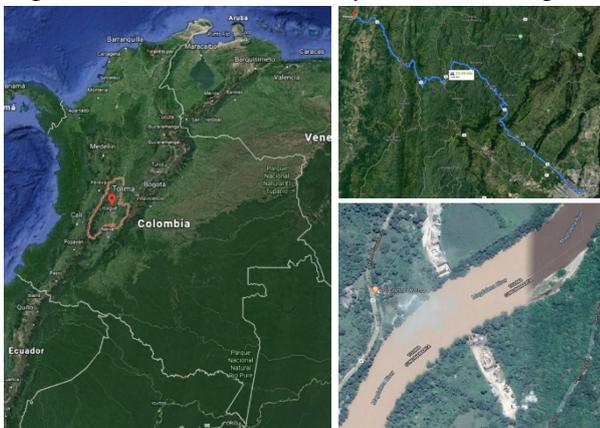


Figura 1. Localización del puente

## 2. Proyecto estructural

### 2.1. Descripción general de la estructura

La alternativa estructural ejecutada corresponde a la de un puente atirantado de hormigón presforzado de tres vanos con un vano principal de 247.5 m y dos vanos de compensación 79 m

(0.32L), para una longitud total de 405.5 m, con dos pilones de configuración geométrica tipo H y dos contrapesos en los extremos con accesos de suelo mecánicamente estabilizado (Figura 4). Las propiedades de los materiales correspondientes a los principales elementos estructurales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla de materiales

Material	Tipo
Hormigón (Tablero)	$f'c = 42.0$ MPa
Hormigón (Pilones)	$f'c = 35.0$ MPa
Hormigón (Pilotes, Dados y Contrapesos)	$f'c = 28.0$ MPa
Acero de refuerzo corrugado	ASTM A706 Gr. 60 ( $f_y = 420.0$ MPa)
Barras de alta resistencia	ASTM A722 ( $f_{pu} = 1035$ MPa)
Acero de preesfuerzo	ASTM A416 ( $f_{pu} = 1860.0$ MPa)
Acero estructural (Encamisado Pilona)	ASTM A588 ( $f_y = 350.0$ MPa)

#### 2.1.1. Tablero

El puente cuenta con un tablero ortotrópico de hormigón presforzado compuesto por dos nervios longitudinales de altura de 1.40 m y una losa superior de 0.25 m de espesor con vigas transversales postensadas cada 4.95 m.

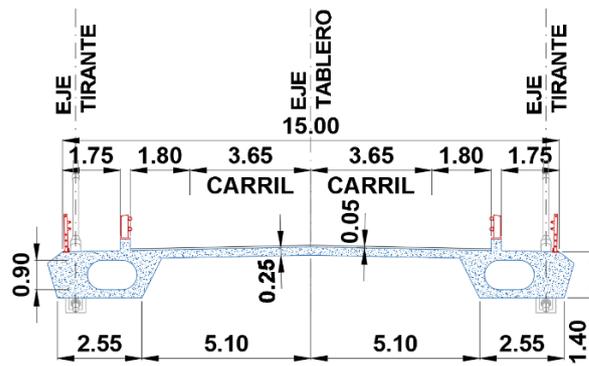


Figura 2. Sección transversal en vano tipo.  
Dimensiones en metros

El tablero es aligerado (Figura 2), sin embargo, en zonas de anclaje de tirantes, donde se esperan altas concentraciones de esfuerzos, la sección es maciza.



Figura 3. Nuevo Puente de Honda sobre el Río Magdalena. Agosto 16 del 2019.

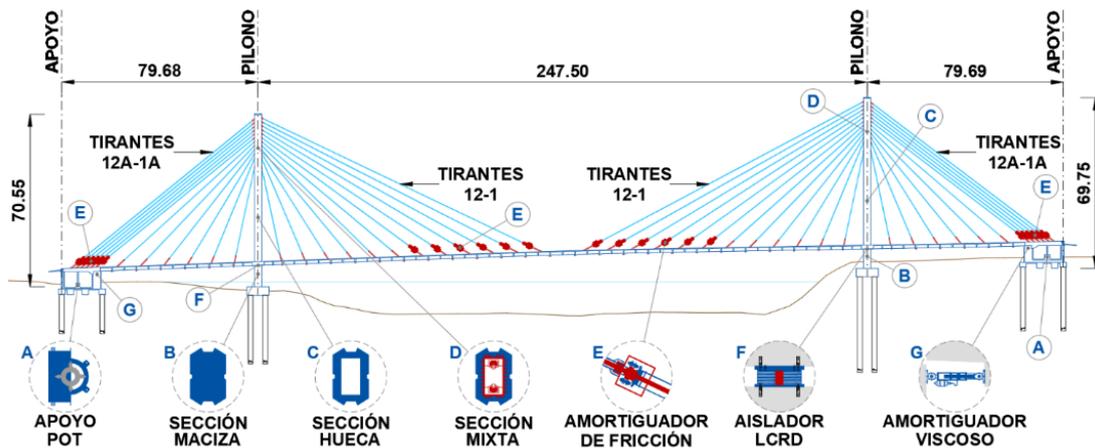


Figura 4. Alzado general. Dimensiones en metros

### 2.1.2. Tirantes

El tablero es soportado por 48 pares de tirantes, 24 por pilón, dispuestos en dos planos de tirantes en configuración de semi-arpa compuestos por un sistema de cordones paralelos individuales con puntos de anclaje fijos, en cada columna del pilón y anclajes activos en el tablero, distribuidos cada 9.95 m, con vainas de capacidad entre 12 y 43 torones de 0.6 pulgadas de diámetro.

### 2.1.3. Pilones

Los pilones tienen una geometría tipo H con columnas de sección de hormigón reforzado de sección maciza en la base, sección hueca en la

parte intermedia y sección mixta con camisa metálica en la zona de anclaje de tirantes (Figura 5 y Figura 6). Cada columna es responsable de un plano de tirantes.

Cada pilón cuenta con dos vigas de amarre transversales con postensado concéntrico. En la viga inferior se apoya el tablero a través de aisladores sísmicos de núcleo de plomo.

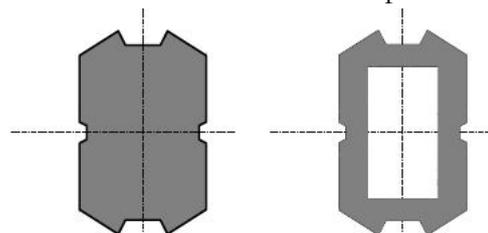


Figura 5. Secciones transversales columna Pilona: a) maciza y b) hueca.



Figura 6. Vista frontal Pilona

#### 2.1.4. Contrapeso

El puente no es compensado en su construcción, por lo que cuenta con contrapesos en sus extremos, a los cuales anclan 6 pares de tirantes. La sección transversal del puente cambia en la conexión con el contrapeso, aumentando de un canto de 1.40 m a 7.50 m, y a una sección nervada con 6 bóvedas con una capacidad de aproximadamente 602.0 m<sup>3</sup> (Figura 7) para rellenar con material granular con peso unitario de 16 kN/m<sup>3</sup>.

Los contrapesos del puente transfieren la carga vertical a la cimentación a través de aparatos de apoyo tipo POT libres (ver ménsulas y apoyos desdoblados en la Figura 8). Un par transfiere las cargas verticales a compresión y el otro par se encarga de retener el contrapeso para los casos de carga de levantamiento que ocurren especialmente durante la construcción y evento extremo I (sismo).

Longitudinalmente el tablero y el contrapeso se encuentran conectados por medio de amortiguadores viscosos ubicados entre el contrapeso y la caja de cimentación (Figura 9). Los amortiguadores son fundamentales para controlar los desplazamientos longitudinales en estado límite de evento extremo con carga

sísmica y agregar amortiguamiento, lo que reduce las cargas inerciales provenientes del evento sísmico.



Figura 7. Construcción contrapeso. Bóvedas para relleno. Puerto Bogotá

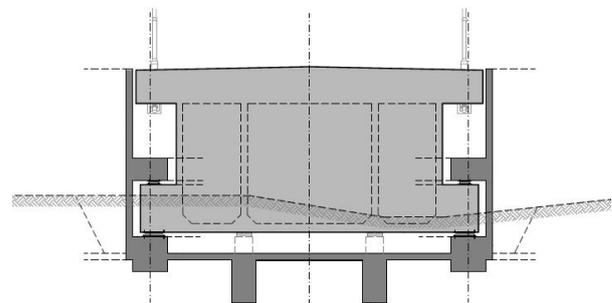


Figura 8. Corte transversal sobre eje de apoyo. Contrapeso Puerto Bogotá.

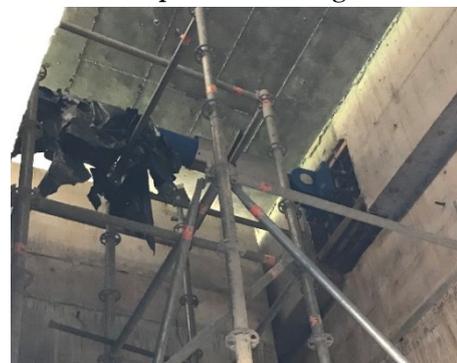


Figura 9. Preinstalación amortiguadores viscosos

### 3. Proceso constructivo

El principal reto en la construcción de puentes por voladizos sucesivos es el control geométrico que asegure la rasante proyectada y permita el adecuado acople de las dos mitades de la estructura en la dovela de cierre.

La rigidez del tablero de un puente atirantado depende de los tirantes, la cual es

función no lineal de la carga axial, por lo que el control geométrico es aún más complejo. Adicionalmente, esta estructura cuenta con dovelas fundidas en sitio, por lo cual los efectos reológicos y la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón en el tiempo deben ser considerados.

Para ello, se realizó un modelo de análisis evolutivo detallado que incluye la variación de módulos de elasticidad, fluencia, retracción, tiempo de fraguado, tesado de cables, movimiento de cargas de construcción y peso de equipos, que permite estimar el estado de cada elemento estructural durante la construcción. Dicho modelo fue calibrado constantemente con base a mediciones en obra para corregir cualquier posible desvío de la rasante.

### 3.1. Fases constructivas

Posterior a la construcción de la cimentación y pilones se inició la construcción de la superestructura por medio del método de voladizos sucesivos con dovelas fundidas en sitio por medio de un carro de avance. La Figura 10 resume el proceso constructivo en términos conceptuales y en la Figura 11 a la Figura 14 se presentan imágenes de los diferentes estados de la obra.

### 3.2. Control geométrico

La principal labor del acompañamiento técnico ejecutado durante la construcción del puente fue el control geométrico. Debido a la alta sensibilidad y la no linealidad estructural que presenta este tipo de puente, el ajuste de las contraflechas con el proceso de construcción real y la actualización continua de las variables que se involucran en la rigidez estructural, son vitales para garantizar la rasante deseada. En este orden de ideas, el procedimiento realizado fue llevado evolutivamente controlando las deformaciones del puente en obra y comparándolas con las teóricas con el objetivo de analizar las diferencias y así poder ajustar el

modelo de cálculo utilizado para predecir cambios en las contraflechas. El procedimiento general del proceso se describe en la Figura 16.

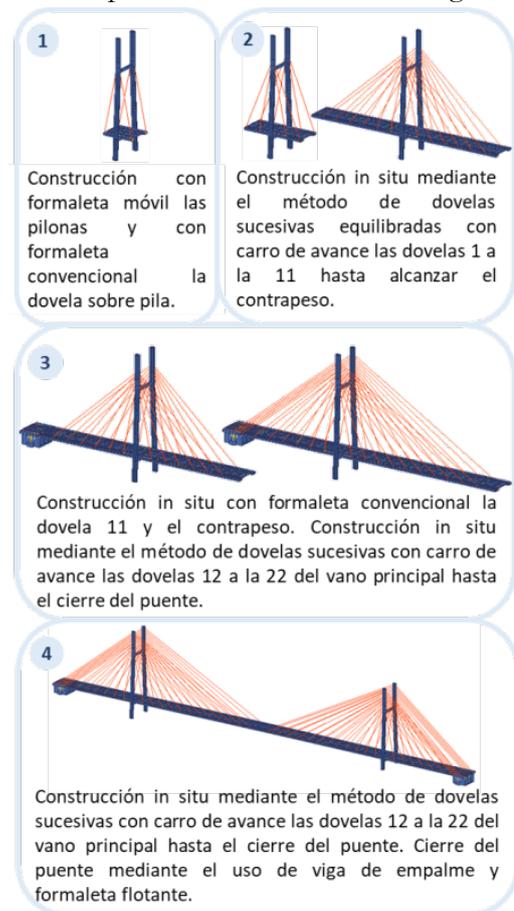


Figura 10. Fases constructivas

Dentro de los mayores retos del proyecto en el control geométrico se encontró los cambios de las variables de construcción y rigidez de la estructura asociados principalmente a los siguientes parámetros:

#### 3.2.1. Peso específico real de la dovela

Siendo el hormigonado una de las etapas más sensibles para la evaluación de las deformaciones en el puente (Figura 12), se llevó a cabo un registro de la variación de los volúmenes de hormigonado en obra comparados con los teóricos teniendo como base la caracterización de los materiales en estado fresco y endurecido, para la actualización del peso específico de cada dovela en el modelo de cálculo, considerando la influencia de: peso de la armadura activa y pasiva, tubos guía y accesorios, volumen de tubos guía, ductos de presfuerzo y refuerzo

pasivo y peso de los aligeramientos de los nervios longitudinales.



Figura 11. Construcción Dovela sobre pila



Figura 12. Construcción dovela de cierre con contrapeso Puerto Bogotá



Figura 13. Construcción tablero con carros de avance. Después de cierre con contrapeso



**Figura 14. Construcción dovela de cierre vano principal**

### 3.2.2. Módulo de elasticidad del hormigón e índice de fisuración del tablero

El módulo de elasticidad es una propiedad intrínseca de la mezcla de hormigón y se encuentra relacionada directamente con la rigidez estructural (Figura 15). Durante el proceso constructivo se registraron variaciones de hasta un 26% del módulo de elasticidad en obra respecto al teórico.

Un aspecto que hay que considerar en la evaluación de deformaciones es la fisuración del hormigón en base a las solicitaciones y la resistencia a tracción del hormigón en cada fase constructiva. Para su calibración fue necesario utilizar, en conjunto con los parámetros reales equivalentes de los materiales utilizados en cada dovela, las deformaciones obtenidas tras la ejecución de cada etapa y el levantamiento de ancho de fisura suministrado por el constructor. Los índices de fisuración, relación entre la inercia fisurada y la inercia bruta, fueron determinados a través del cálculo de la rigidez secante con modelos seccionales considerando el refuerzo pasivo y el estado tensional en cada etapa, los valores obtenidos se encontraron dentro del rango de 0.3 y 0.7. Paralelamente los anchos de fisura fueron controlados mediante el uso de la metodología del EUROCÓDIGO [7] y AASHTO LRFD [2].

De acuerdo a lo anterior, el ajuste de las características de los materiales para cada dovela con el avance de la obra fue primordial para obtener un ajuste más preciso en el recálculo de las contraflechas. La influencia de la variación de las contraflechas por estos parámetros se puede observar en la Figura 15.



**Figura 15. Variación contraflechas por cambios en peso específico, módulo de elasticidad y fisuración**

### 3.2.3. Fuerzas de tensionamiento

Debido a la dificultad de garantizar exactitud en la fuerza efectiva de tensionamiento en cada paso de carga para los tirantes, las fuerzas registradas en obra fueron incluidas en el modelo de cálculo después de cada tensionamiento con la finalidad de reducir la incertidumbre en las deformaciones. La influencia en las deformaciones debida a la diferencia de los tensionamientos se puede observar en la Tabla 2.

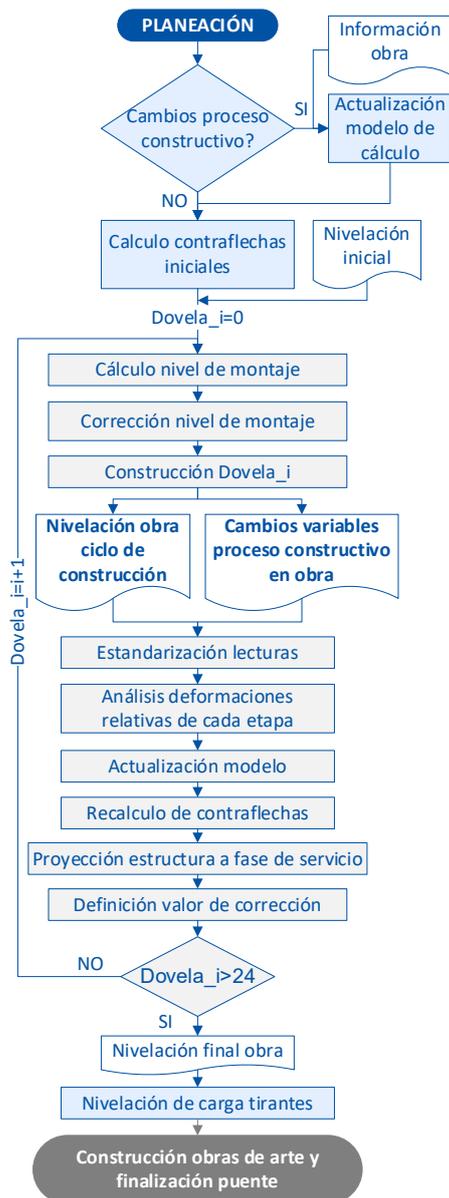


Figura 16. Procedimiento control geométrico

Otras variables consideradas para la calibración de la rigidez estructural fueron: a) Rigidez y peso del carro de avance; b) coeficiente de fluencia, deformación unitaria a retracción del hormigón de la superestructura; c) módulo de elasticidad y resistencia a la compresión del hormigón de los pilones; d) características de tensionamiento del refuerzo activo, e) rigidez real de los apoyos provisionales colocados en los pilones y contrapesos; y f) Cambio en

procedimiento y cargas durante la construcción entre otras.

Tabla 2. Deformación vertical por diferencias en carga de tensionamiento (Fuerzas de instalación)

Tirante	Dov.	$\delta y$ F <sub>100%</sub> [cm]	$\delta y$ F <sub>95%</sub> [cm]	$\delta y$ F <sub>105%</sub> [cm]	Sistema estático
T10	D4	15.7	14.8	16.4	VOL EQ <sup>1</sup>
T5	D14	50.5	48	53.1	VOL <sup>2</sup>
T1	D22	49.6	47.1	52.1	VOL <sup>2</sup>

$\delta y$  F100%: Deformación vertical en la dovela del extremo generado por el tensionamiento de instalación.

$\delta y$  F95% y  $\delta y$  F105%: Deformación vertical en la dovela del extremo generado por el tensionamiento de instalación con una tolerancia del  $\pm 5\%$ .

### 3.2.4. Variables temporales: Gradiente de temperatura y viento

El gradiente térmico entre los elementos y los efectos del viento en la estructura son dependientes de la hora de ejecución de cada etapa y presentan influencia en las deformaciones del puente como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Variación deformación vertical por gradiente de temperatura (diferencial solo tirantes)

Tirante	Dovela	$\Delta T$ [°C]	$\delta y$ [cm]	Sistema estático
-	DC	+10	-5.6	HE <sup>3</sup>
T1	D22	+10	-6.5	VOL <sup>2</sup>
T5	D14	+10	-3.8	VOL <sup>2</sup>
T10	D4	+10	-0.8	VOL EQ <sup>1</sup>

$\Delta T$ : Diferencial temperatura entre tirantes y tablero y ambiente.  
 $\delta y$ .: Deformación vertical en la dovela del extremo.

La dificultad de garantizar una condición estable durante la materialización de cada nivel de montaje con el avance en obra conllevó a realizar un proceso de estandarización de la información en oficina y la ejecución de todas las principales labores en obra con condiciones climáticas similares.

<sup>1</sup> VOL EQ: Etapa de construcción con voladizos sucesivos equilibrados. Antes de cierre con contrapeso.

<sup>2</sup> VOL: Etapa de construcción de voladizos sucesivos después de cierre contrapeso

<sup>3</sup> HE: Etapa de construcción hiperestática después de cierre de tablero

## 4. Análisis estructural

### 4.1. Acciones y criterios generales

Los diseños estructurales del puente fueron realizados de acuerdo a la norma Colombiana de diseño de Puentes LRFD CCP-14 [1,2]. Sin embargo, el alcance de estas normativas no incluye estructuras tan complejas como puentes atirantados, por lo cual se han utilizado guías especializadas para la definición de combinaciones y características de la construcción [3], diseño sísmico [4] y diseño de tirantes [5].

### 4.2. Modelo de cálculo

El análisis del puente se realizó a través de un modelo tipo emparrillado con elementos tipo viga, tendones y cables en el software RM-Bridge. Los aparatos de apoyo fueron modelados por medio de resortes desacoplados en el caso de los contrapesos y resortes acoplados (matriz de rigidez) para considerar la interacción suelo-estructura (Figura 17).

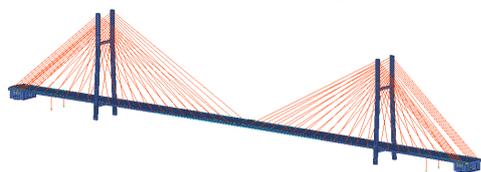


Figura 17. Modelo 3D. Puente de Honda

### 4.3. Amenaza sísmica

El puente se encuentra en una zona de amenaza sísmica intermedia de acuerdo al estudio de amenaza sísmica de Colombia. La Figura 18 presenta los espectros de diseño correspondientes a un periodo de retorno de 1000 años. El espectro de diseño horizontal es el resultado de un estudio de respuesta sísmica local que considera las propiedades de la columna de suelo en el sitio del proyecto para propagar las ondas sísmicas y estimar adecuadamente la amplificación del movimiento del terreno. En sentido longitudinal, la estructura cuenta con un sistema suplementario de

disipación de energía por medio de amortiguadores viscosos y aisladores sísmicos que permiten una reducción de la demanda sísmica a un 60% del espectro de diseño y un 80% del periodo fundamental en sentido longitudinal. En sentido vertical se consideró un espectro de diseño de acuerdo a las recomendaciones de FEMA 750 y Bozorgnia y Campbell [6].

### 4.4. Sistema de resistencia sísmica

El diseño sísmico del puente inicia con la definición de la categoría operacional de la estructura donde la estructura se califica como *Ordinaria*, *Esencial* o *Crítica*. Después de diversas discusiones con el dueño del proyecto, el puente se clasificó como *esencial*. De acuerdo a la normativa AASHTO LRFD, ésta es una estructura que debe, como mínimo, permanecer abierta para uso de vehículos de emergencia y para propósitos de seguridad y defensa del territorio después del sismo de diseño correspondiente al periodo de retorno de 1000 años. Esto implica que se acepta daño estructural moderado en los elementos estructurales siempre y cuando esto no implique cerramiento total de la estructura.

La estructura tiene un periodo fundamental de 5.5 s en sentido longitudinal y 3.1 s en sentido transversal. A continuación, se describe el sistema de resistencia a fuerza lateral en cada sentido de la estructura.

#### 4.4.1. Dirección transversal

En el sentido transversal, el puente soporta las demandas laterales con una serie de elementos que entran en la ruta de carga dependiendo del nivel de desplazamientos del tablero. Para el sismo de diseño, se espera que la transmisión de las cargas sísmicas sea realizada a través de los pilones por medio de los topes laterales ubicados a 2.0 cm del tablero. Sobre cada pila, el tablero descansa en aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo (Figura 19-b) diseñados para maximizar su contribución en

amortiguamiento en el sentido longitudinal. Para sismos mayores al de diseño, es posible que modos superiores ocasionen que se cierre la dilatación de 17cm provista en los contrapesos (Figura 19-a), momento en el cual responden los contrafuertes laterales de la caja de cimentación.



Figura 18. Espectros de diseño Puesto de Honda [6]

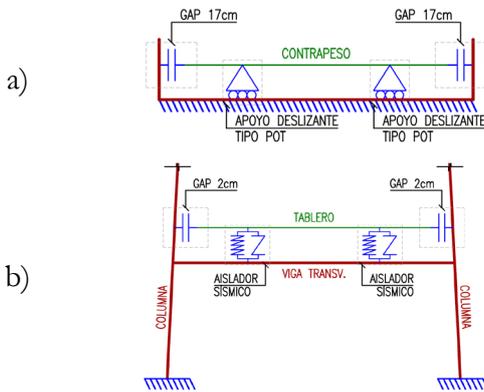


Figura 19. Esquema sistema de resistencia sísmica transversal. a) En contrapeso y b) en Pila

Una vez el tablero entre en contacto con los pilones, se generan esfuerzos internos en las pilas que se han diseñado para que trabajen como un pórtico dúctil. Los elementos de disipación de energía asociados a este mecanismo son rótulas plásticas en los extremos de las riostras garantizando que los pilones permanezcan esencialmente elásticos. No obstante, el nivel de daño permitido fue limitado de acuerdo al criterio de puente *esencial* mediante un control de las máximas demandas de deformación unitaria permitidas en los materiales.

#### 4.4.2. Dirección longitudinal

El tablero se encuentra conectado a la infraestructura a través de amortiguadores viscosos, en los contrapesos, y aisladores

sísmicos de alto amortiguamiento en las pilas. Ambos dispositivos se definieron con el objetivo de reducir la demanda sísmica vía amortiguamiento y facilitar el recentrado del puente. El factor de modificación de respuesta en sentido longitudinal utilizado para el diseño de la infraestructura es  $R=1.0$ , es decir, comportamiento elástico para el sismo de diseño.

La reducción en la demanda sísmica se basa en la mitigación de las solicitaciones a través de: 1) Elongación del periodo estructural mediante el uso de aparatos de apoyo deslizantes tipo POT en los contrapesos y aisladores sísmicos con núcleo de plomo en los pilones. 2) Incremento de la disipación de energía mediante el aumento del amortiguamiento del sistema, a través del trabajo de los amortiguadores viscosos, los cuales incrementan la disipación efectiva de energía en la entrada sísmica al sistema del puente (Figura 20). Estas estrategias permitieron alcanzar un periodo fundamental en sentido longitudinal de 5.5 s acompañado de una reducción del 40% de la demanda sísmica de diseño.

El diseño de aisladores sísmicos con amortiguamiento utilizando un modelo elástico lineal equivalente, implica un proceso iterativo en el cual se analiza la estructura asignando a los aisladores una rigidez efectiva que depende del nivel de desplazamiento que sufran a causa del sismo. El desplazamiento longitudinal obtenido fue de 24 cm, por lo cual el aislador (HDRB/H 800x280) en conjunto con los amortiguadores, permiten que el sistema alcance un 27% de amortiguamiento respecto al crítico, lo cual se traduce en una reducción del espectro de diseño en sentido longitudinal al 60% de su valor original.

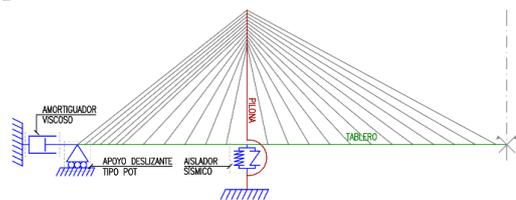


Figura 20. Esquema sistema de resistencia sísmica longitudinal. En contrapeso y en Pila

## ***Agradecimientos***

- *Consortio VCT083 (EIFFAGE, Castro - Tcherassi, Valorcom).*
- *MAB Ingeniería de Valor*
- *Instituto Nacional de Vías (INVIAS)*

## ***Referencias***

- [1] Instituto nacional de vías, ministerio de transporte. Norma colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP 14. 2014.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials. Load and Resistance Factor Design, Bridge Design Specifications. 2012.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications. 2010.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide specification for LRFD seismic bridge design. 2012.
- [5] Post tensioning institute. Recommendations for stay cable design, testing and installation. 2012.
- [6] Bozorgnia, Y. y Campbell, K. W. The vertical to horizontal response spectral ratio and tentative procedure for developing simplified V/H and design spectra. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 2 (2004), pp. 175-207.
- [7] Asociación Española de Normalización. EUROCÓDIGO 2. Diseño de estructuras de hormigón. UNE-EN 1992-1-2:2011
- [8] MAB Ingeniería de valor. “*Puente Honda fortalecerá la conexión vial entre Cundinamarca y Tolima*”. Junio 2017.  
<http://mab.com.co/nuevo-puente-honda/>