

Diseño del pendolón de un puente colgante

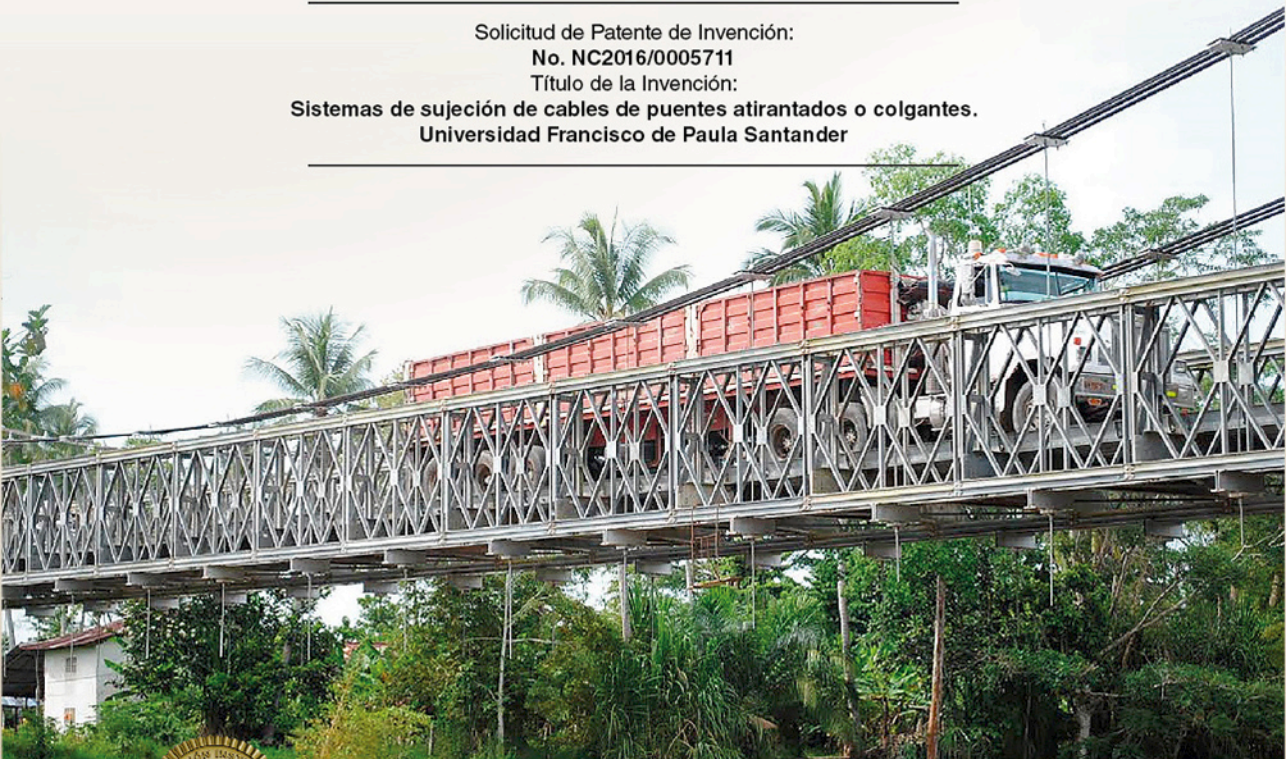
**MILTON COBA SALCEDO - EDER N. FLÓREZ SOLANO
CARLOS H. ACEVEDO PEÑALOZA**

Solicitud de Patente de Invención:

No. NC2016/0005711

Título de la Invención:

Sistemas de sujeción de cables de puentes atirantados o colgantes.
Universidad Francisco de Paula Santander



EL MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL ACREDITA
INSTITUCIONALMENTE A LA UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
Resolución 23095, del 15 de diciembre de 2016

Diseño del pendolón de un puente colgante

**MILTON COBA SALCEDO
EDER N. FLÓREZ SOLANO
CARLOS H. ACEVEDO PEÑALOZA**

Solicitud de Patente de Invención:

No. NC2016/0005711

Título de la Invención:

Sistemas de sujeción de cables de puentes atirantados o colgantes.

Universidad Francisco de Paula Santander



PRESIDENTA SALA GENERAL
ANA BOLÍVAR DE CONSUEGRA

RECTOR FUNDADOR
JOSÉ CONSUEGRA HIGGINS (q.e.p.d.)

RECTOR
JOSÉ CONSUEGRA BOLÍVAR

VICERRECTORA ACADÉMICA
SONIA FALLA BARRANTES

**VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN
E INNOVACIÓN**
PAOLA AMAR SEPÚLVEDA

VICERRECTORA FINANCIERA
ANA CONSUEGRA DE BAYUELO

VICERRECTOR DE INFRAESTRUCTURA
IGNACIO CONSUEGRA BOLÍVAR

SECRETARIA GENERAL
ROSARIO GARCÍA GONZÁLEZ

DIRECTORA DE INVESTIGACIONES
ALIZ YANETH HERAZO BELTRÁN

DEPARTAMENTO DE PUBLICACIONES
MILENA I. ZABALETA DE ARMAS

MIEMBROS DE LA SALA GENERAL
ANA BOLÍVAR DE CONSUEGRA
OSWALDO ANTONIO OLAVE AMAYA
MARTHA VIVIANA VIANA MARINO
JOSÉ EUSEBIO CONSUEGRA BOLÍVAR
JORGE REYNOLDS POMBO
ÁNGEL CARRACEDO ÁLVAREZ
ANTONIO CACUJA PRADA
PATRICIA MARTÍNEZ BARRIOS
JAIME NIÑO DÍEZ †
ANA CONSUEGRA DE BAYUELO
JUAN MANUEL RUISECO
CARLOS CORREDOR PEREIRA
JORGE EMILIO SIERRA MONTOYA
EZEQUIEL ANDER-EGG
JOSÉ IGNACIO CONSUEGRA MANZANO
EUGENIO BOLÍVAR ROMERO
ÁLVARO CASTRO SOCARRÁS
IGNACIO CONSUEGRA BOLÍVAR

MILTON COBA SALCEDO
EDER N. FLÓREZ SOLANO
CARLOS H. ACEVEDO PEÑALOZA

Diseño del pendolón de un puente colgante

Solicitud de Patente de Invención:

No. NC2016/0005711

Título de la Invención:

Sistemas de sujeción de cables de puentes atirantados o colgantes.
Universidad Francisco de Paula Santander



EL MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL ACREDITA
INSTITUCIONALMENTE A LA UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
Resolución 23095, del 15 de diciembre de 2016

Coba Salcedo, Milton F.
Diseño del pendolón de un puente colgante / Milton F. Coba Salcedo, Eder N. Flórez Solano Carlos H. Acevedo Peñaloza -- Barranquilla : Ediciones Universidad Simón Bolívar, 2017.

90 p.; 17x24 cm.
ISBN: 978-958-8930-76-3

1. Puentes colgantes – Diseño y construcción 2. Diseño en ingeniería 3. Diseño estructural 4. Armaduras estructurales 5. Construcción de puentes I. Flórez Solano, Eder N. II. Acevedo Peñaloza, Carlos H. III. Tit.

624.5 C652 2017 SCDD 21 ed.
Universidad Simón Bolívar – Sistema de Bibliotecas

DISEÑO DEL PENDOLÓN DE UN PUENTE COLGANTE

© Carlos H. Acevedo Peñaloza • Eder N. Flórez Solano • Milton F. Coba Salcedo

Facultad de Ingeniería

Grupo de Investigación Diseño Mecánico y Materiales y Procesos Universidad Francisco de Paula Santander

Director: Ismael Humberto García Páez

ISBN: 978-958-8930-76-3

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada en sistema recuperable o transmitida en ninguna forma por medios electrónicos, mecánicos, fotocopias, grabación u otros, sin la previa autorización por escrito de Ediciones Universidad Simón Bolívar y de los autores. Los conceptos expresados en este documento son responsabilidad exclusiva de los autores. Se da cumplimiento al Depósito Legal según lo establecido en la Ley 44 de 1993, los Decretos 460 del 16 de marzo de 1995, el 2150 de 1995, el 358 de 2000 y la Ley 1379 de 2010.

© Ediciones Universidad Simón Bolívar

Carrera 54 No. 59-102

<http://publicaciones.unisimonbolivar.edu.co/edicionesUSB/>

dptpublicaciones@unisimonbolivar.edu.co

Barranquilla y Cúcuta - Colombia

Producción Editorial

Editorial Mejoras

Calle 58 No. 70-30

info@editorialmejoras.co

www.editorialmejoras.co

Barranquilla

Marzo 2017

Barranquilla

Made in Colombia

DEDICADO A
Leandro

AGRADECIMIENTO

*A los ingenieros Edgar Rincón Mora (Ecopetrol);
Magda Pabón Burgos (UFPS) Edwin Leal Jaime (UFPS), quienes
han sido parte importante de las mesas de trabajo de cálculo,
diseño y toma de decisiones.*

CONTENIDO

Agradecimiento	7
Lista de anexos	10
Introducción.....	11
1. El Puente del Corregimiento de Campo dos.....	13
2. Aspectos legales del diseño.....	17
3. Análisis e Inventario Inicial del Puente.....	19
4. Cargas Muertas Y Vivas Sobre El puente.....	35
5. Aspectos Generales de las Cargas Propias del Pendolón.....	57
6. Tipo de Falla Detectada	61
7. Características del material actual del Pendolón	65
8. Diseño del Nuevo Pendolón y Componentes Generales.....	67
Referencias Bibliográficas.....	75
Anexos	77
Acerca de los autores.....	88

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Puente de Campo Dos (Tibú).....	77
Anexo B. Capacidad de carga y altura del puente de Campo Dos.....	77
Anexo C. Herraje central donde ocurrió la falla.....	78
Anexo D. Parte superior del pendolón por donde ocurrió la falla.....	78
Anexo E. Panel estructural	79
Anexo F. Vigueta estructural.....	80
Anexo G. Losa.....	81
Anexo H. Vigueta vertical tipo Z	82
Anexo I. Vigueta horizontal tipo W	83
Anexo J. Vigueta de rigidez.....	84
Anexo K. Vigueta vertical de acabado final.....	85
Anexo L. Apoyo estructural.....	86
Anexo M. Velocidad del viento en Colombia.....	87

INTRODUCCIÓN

Los puentes son estructuras que permiten sobrepasar accidentes geográficos o fuentes hídricas logrando mejorar el acceso a un lugar determinado. Existe gran variedad de tipos de puentes y estos dependen de la forma estructural, la cual debe considerar factores como el terreno, los recursos y la disponibilidad del personal capacitado para su instalación.

Los puentes se clasifican en: de viga, de ménsula, colgante, de arco y atirantado. En este libro se desarrolla el estudio de un puente tipo colgante, que se caracterizan por soportar la estructura mediante cables de acero en forma de arco. El mecanismo de fijación entre los cables y la estructura se da por medio de tirantes (pendolones), el cual es el caso en estudio.

En el puente colgante del corregimiento Campo Dos sobre el río Sardinata, se presenta una falla de diseño sobre los pendolones, los cuales ocasionalmente se han venido fracturando a la altura del sistema de sujeción al cable. Si este problema no es corregido puede ocasionar daños irreparables para el puente e incluso accidentes con pérdidas humanas.

Este libro muestra los resultados del estudio del rediseño del pendolón del puente Campo Dos, teniendo en cuenta su comportamiento, los tipos de carga presentes, los materiales de construcción y forma del pendolón y del sistema de fijación.

Igualmente el libro muestra un estudio de las condiciones iniciales de carga que resiste el puente, para determinar las posibles cau-

sas de la ruptura del pendolón. Se destaca que se tienen en cuenta factores como propiedades del material, forma del pendolón y los sistemas de sujeción tanto en el cable como en la estructura del puente. El libro considera la forma del puente teniendo en cuenta la distribución geométrica de los cables, la plataforma montada sobre la estructura y la estructura del puente.

EL PUENTE DEL CORREGIMIENTO DE CAMPO DOS

1.1. Resumen de antecedentes y marco Contextual

El puente de Campo Dos se encuentra ubicado a la entrada del corregimiento que recibe el mismo nombre, sobre el río Sardinata en la vía que comunica al municipio de Tibú con gran parte del departamento de Norte de Santander; tiene una capacidad de carga de 52 toneladas, consta de un solo carril, y fue fabricado por la empresa constructora de puentes metálicos Mabey. Este es un puente de acero de instalación rápida o modular, de una sección, con una luz de aproximadamente 100 metros; debido a esta distancia el puente tiene que ser colgante ya que por norma un puente metálico no debe sobrepasar los 50 metros. Soporta una altura máxima de vehículos con carga de 4,7 metros.

El pendolón es el elemento que une la estructura metálica del puente a los cables que lo sujetan. Está compuesto por una varilla, dos tuercas y dos placas rectangulares tanto en la parte superior e inferior como indican las Figuras 1.1. y 1.2.



Figura 1.1. Distribución de pendolones hacia la torre de sostenimiento



Figura 1.2. Pendolón en la parte inferior

Su herraje está compuesto por dos platinas rectangulares que se unen por medio de ocho tornillos, y por el claro que se encuentra entre los tornillos van los seis cables que unen al pendolón con la estructura (Véase la Figura 1.3.).



Figura 1.3. Herraje de un pendolón

El puente de Campo Dos sobre el río Sardinata presentó ruptura de uno de sus pendolones. Este miembro estructural es el elemento que une la estructura del puente al cable que soporta la carga. Si estos presentan una falla masiva, la estructura colgante colapsará inmediatamente provocando graves impactos a la comunidad aledaña, e incluso, dejaría totalmente inhabilitada la vía que comunica la ciudad de Cúcuta con el municipio de Tibú.

La falla del pendolón pudo haberse producido por muchos factores; es posible que el puente haya estado expuesto a sobre peso, pudo ocurrir que el pendolón hubiese igualado su frecuencia natural junto con las oscilaciones producidas por los vehículos en el momento de transitar sobre el puente o un efecto de resonancia. Además, no se pueden descartar otras fallas por factores como el ensamble.

Esta investigación y los resultados descritos en este libro favorecerán a toda la población del departamento de Norte de Santander ya que el puente comunica a la capital del Departamento con el Catatumbo, zona de agroindustria y de hallazgo de petróleo, gas y combustibles alternativos, la cual provee de alimentos a la capital del Departamento y a otras ciudades a nivel nacional. Además, por esta vía se moviliza una gran cantidad de productos como la palma de cera, cacao y otros insumos hacia otras ciudades como Bucaramanga y Bogotá. Esto hace de esta vía un eje vial importante para la región, considerando también, que va a permitir el desplazamiento y comunicación de personas desde y hacia la capital del Departamento.

Este proyecto servirá como un aporte al estudio de fallas en puentes colgantes ya que estos son muy usados en el país. También, este trabajo pone en evidencia la falta de estudios a nivel nacional sobre este tipo de puentes y conmina a observar el estado en que

se encuentran los puentes en las vías de comunicación terrestre más importantes del país para contribuir con el desarrollo vial, comercial, turístico y cultural de Colombia.

1.2 Hipótesis

- Las posibles causas de la falla del pendolón del puente de Campo Dos sobre el río Sardinata pueden ser:
- Sobrepeso: Pudo haber un sobrepeso por la falta de cultura de los conductores, ya que el puente puede soportar una carga máxima de 52 toneladas. Si dos tractomulas ingresan al puente con una carga máxima de acuerdo a la norma colombiana que es 35 toneladas por tractomula, la suma de estas dos a carga máxima da 70 toneladas, superando ampliamente la carga máxima del puente.
- Material del pendolón: Este material es corrugado y por lo tanto tiene facilidad para concentrar esfuerzos, y estos afectan al material por fatiga o por cortante puro.
- Frecuencia natural: El pendolón pudo igualar la frecuencia natural y esta hizo que el pendolón se fisurara, y como su material es corrugado, los esfuerzos fluctuantes provocaron que este fallara por fatiga o por cortante puro.

2

ASPECTOS LEGALES DEL DISEÑO

A continuación se presenta el marco legal o reglamentación a tener en cuenta para el correcto desarrollo de las etapas de diseño de los puentes.

2.1. Marco Legal

2.1.1. Ley 400 de 1997

Ley colombiana que obliga a que toda obra de construcción deba ser sismo resistente. Esta ley contiene 10 títulos con los siguientes temas: Objeto y Alcance - Definiciones - Diseño y Construcción - Revisión de los diseños - Supervisión técnica de la construcción - Profesionales - Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes - Potestad reglamentaria.

2.1.2. Norma sismo resistente

Títulos B y F. Esta norma es internacional y da instrucciones estrictas sobre cómo las estructuras deben soportar los sismos y vientos fuertes. El título B describe las cargas que se deben tener en cuenta y a las cuales se les debe hacer estudios técnicos. El título F describe los requisitos que deben cumplir las estructuras metálicas en la parte de las uniones y uniones soldadas (AIEA, 2009).

2.1.3. Código colombiano de diseño y construcción de puentes

Este código describe cuáles deben ser los pasos a seguir para cumplir requisitos de cargas tanto vivas como estáticas, concreto, acero estructural, distribución de cargas vivas a los elementos resistentes (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2000).

2.1.4. Norma AASHTO

(American Association of State Highway and Transportation Officials) Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte. Es una norma para el cálculo y diseño de vías que pone en consideración factores como por ejemplo los máximos y mínimos para el cálculo de curvas verticales y curvas horizontales, tanto para carreteras de dos carriles como para autopistas.

2.1.5. EI LRFD

(Load and Resistance Factor Design) Factores de Carga y Resistencia de Diseño; Definen y detallan todas las cargas que se deben contemplar en el diseño de los puentes y obras afines. Este es un método de diseño aprobado por la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Transportes Oficiales.

3

ANÁLISIS E INVENTARIO INICIAL DEL PUENTE

3.1. Descripción del entorno

El puente salva el accidente geográfico conocido como río Sardinata en cercanías al corregimiento de Campo Dos del municipio de Tibú (Norte de Santander). Al observar las características del puente se puede ver cómo se comporta cuando es transitado por un vehículo de carga y por vehículos particulares, dando una idea de la forma como reacciona la estructura con el paso de estos vehículos (Anexo A).

El puente de Campo Dos fue donado por la nación hermana de Venezuela y fue instalado de carácter provisional para restablecer el tráfico vehicular luego de la destrucción del anterior puente, acción perpetuada por grupos al margen de la ley en el año 2010. Hay que resaltar que el país vecino solo donó la estructura metálica, los demás componentes fueron responsabilidad del gobierno colombiano.

El puente es fabricado por la constructora inglesa Mabey Bridge y es de tipo Compact modular; estos puentes son de especial utilidad para reemplazar aquellos puentes que fallan repentinamente o son destruidos para hacer un nuevo diseño ya que son de alta resistencia y fácil armado; pueden soportar una carga elevada y poseen la característica de ser de sencillo o de doble carril y en este caso el puente de Campo Dos es de un solo carril (para que transite sobre él un solo vehículo a la vez) (Anexo B).

El puente de estudio consta de una longitud de 109,128 metros de luz en estructura; pero la norma AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes) en sus especificaciones LFRD (Metodología del Diseño por factores de Carga y Resistencia) aclara que la longitud del puente no debe sobrepasar los 60 metros luz. Debido a esto los ingenieros decidieron utilizar dos estructuras para adaptarlas en una sola como un puente colgante y así sobrepasar el accidente geográfico (río). El tránsito en esta zona es muy concurrente y el paso por esta vía es importante para el comercio y la industria del Departamento y la región, por esta razón se hizo la adaptación de forma rápida y espontánea porque la prioridad era rehabilitar el paso vehicular.

Este puente Mabey Compact 200 se caracteriza por ser uno de los sistemas de puentes modulares más utilizado en el mundo; está ensamblado por un juego estándar de componentes pre-diseñados que facilitan su transporte y armado, formando parte del sistema popular de puentes prefabricados con un gran legado que se remonta al sistema original de puentes Bailey (primeros puentes de ensamble estructural en el mundo).

En la llanura del río se observa perfectamente el puente y el paso de vehículos sobre él, ya sea de carga pesada o carga ligera; se deliberan ciertas hipótesis por la falla en el sistema de pendolón o sujeción de la estructura y el cable, y se toman datos variables de masa de los vehículos que cotidianamente hacen su recorrido por la zona, datos del ambiente y el entorno al cual está expuesto el puente a ciertas horas del día y en diferentes épocas del año y se descubre que en el tablero del puente no existe un ángulo convexo requerido en este tipo de estructuras sino que es de forma plana.

Este puente Compact 200 posee las siguientes características:

- Por el servicio que presta, es un puente vehicular.
- Es de tipo estructural, modular colgante.
- La estructura es de acero galvanizado, material que aporta gran protección ante la corrosión en la agresiva atmósfera que rodea los puentes y las carreteras.
- Según sus apoyos es un puente hiperestático.
- El proceso constructivo del puente es prefabricado.
- Su trazo geométrico es recto.
- Uniformidad: Las propiedades del acero no cambian considerablemente con el tiempo
- Alta resistencia: La resistencia del acero por unidad de peso implica que será poco el peso de las estructuras, esto es de gran importancia en puentes de altos claros.
- Durabilidad: Las estructuras durarán si tienen un adecuado mantenimiento.
- Ductilidad: Es la propiedad que tiene un material de soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altos esfuerzos de tensión. La naturaleza dúctil permite fluir localmente evitando fallas prematuras.
- Tenacidad: Poseen resistencia y ductilidad siendo la propiedad de un material para absorber energía en grandes cantidades.
- Elasticidad: Se acerca más a la hipótesis de diseño que sigue la Ley de Hooke.

3.2. Elemento

A continuación se describen algunos elementos del puente, sus características y el estado en el que actualmente se encuentra.

3.2.1. Cables

Los cables metálicos del puente colgante son un elemento flexible, estos van por encima de las torres y continúan más allá hasta

que alcanzan un punto de anclaje en un pilar de cemento rectangular que posee cierto ángulo de inclinación, que a su vez está puesto en tierra y contribuye a la distribución de las cargas de los cables.

En el anclaje del cable al pilar de cemento en tierra se observa un ajuste de cada cable con grapas; para este proceso al cable se le hace un giro o montaje tipo eslinga que sobrepasa los 180° y es tensionado en la base de anclaje quedando un extremo sobrante que es unido al mismo cable con ocho grapas en forma de “U” que se ubican a lo largo del extremo vivo del cable y aseguradas con tuercas apretadas alternadamente hasta alcanzar el torque requerido, y estos prensacables o grapas son debidamente espaciados a una misma distancia entre ellos (Ver Figura 3.1.).



Figura 3.1. Cables asegurados a la torre de anclaje

En total son 12 los cables que soportan la estructura, seis por cada lado del puente. Cada cable hace una curva en forma de catenaria.

El puente presenta una variación a tener en cuenta y es la sujeción del cable a la superficie terrestre, debido a que los ángulos de

inclinación a la torre de anclaje no son iguales en ambos extremos del puente.

Para puentes colgantes se utilizan cables nuevos con alma de acero y galvanizado, convenientemente revisados y de una sola pieza, rechazándose aun los que tengan una sola sección deteriorada.

Las tensiones mínimas de los alambres que conforman los torones y posteriormente los cables para este proyecto son de 180 kg/mm^2 a 200 kg/mm^2 .

El coeficiente de seguridad mínimo utilizado en puentes colgantes es de 3,5 teniendo en cuenta factores que deben considerarse como el peso muerto de la carga, la velocidad de izaje, la aceleración y desaceleración del izaje, el diámetro y los posibles efectos de corrosión y abrasión.

Los cables que sostienen el puente colgante sobre el río Sardinata presentan la máxima resistencia a la abrasión con un mínimo de flexibilidad. Sus alambres exteriores poseen un alto grado de resistencia al desgaste o abrasión, pero sacrificando su capacidad de doblez y su resistencia a la fatiga. La construcción de este tipo de cable es standard 6×19 con alma de acero y torones galvanizados, su diámetro nominal de $1 \frac{1}{4}$ de pulgada, pesa 4.30 kg/m y cada cable posee una resistencia de 54,14 toneladas (Ver Figura 3.2.).

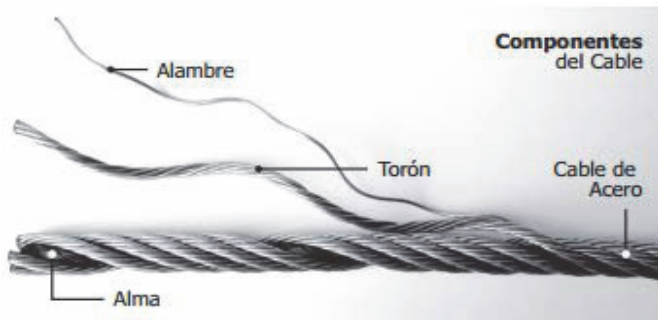


Figura 3.2. Composición de un cable de acero

El cable tiene un Torón Seale de 6x19 de acero galvanizado; en su construcción la última capa tiene dos alambres de mayor diámetro que en la capa inferior, dándole al torón mayor resistencia a la abrasión.

La composición del torón del cable es $1+9+9=19$ como se muestra en la Figura 3.3.

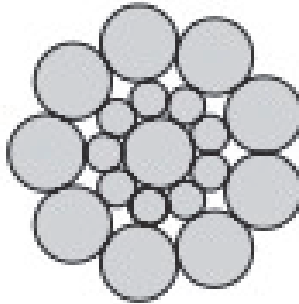


Figura 3.3. Torón del cable

3.2.2. Torres de apoyo

Las torres de acero del puente de Campo Dos están formadas por dos pilares en cada extremo del puente, construidos de acero galvanizado y con una altura de 12 metros desde el nivel de la superficie vial.

Tal como se ve en la Figura 3.4., cada torre es formada por tres elementos estructurales de forma cilíndrica de seis pulgadas de diámetro y se une en cada extremo a la otra torre con cuatro miembros estructurales que cumplen la función de arriostramiento (flechas rojas). Estas torres son de acero galvanizado y en cada extremo del puente los pilares son de sección de cajón de alma llena.

Estas torres han sido montadas mediante grúas trepadoras ancladas a ellas que se van elevando a la vez que van subiendo; el transporte y montaje de estas torres es de cuidado debido a su tamaño y a las características geográficas de la zona y el suelo. La altura de

estas torres dirigen hacia arriba las fuerzas de tensión (que halan) de los cables principales para que estos puedan sostener el peso del tablero y la adición de carga que transite por el puente.

A simple observación, las torres no plantean problemas de construcción y cumplen legalmente los parámetros requeridos en este tipo de estructuras (poseen el ancho mínimo en la dirección de la luz consistente con la estabilidad, pero suficientemente amplio en la parte superior para la sujeción de los cables) y poseen cierto ángulo de inclinación necesario para sobrepasar el terreno y dar estabilidad a la estructura, característica que da una rigidez en la dirección transversal del puente y muy poca rigidez en la dirección longitudinal. Solo se denota la dificultad para elevar los cables y sujetarlos correctamente en cada extremo.

La forma no convencional de la estructura, compuesta por conjuntos de tres tubos soldados entre sí, da mejor aspecto visual y estético al puente y además contribuye con la rigidez y estabilidad de la misma.



Figura 3.4. Vista de frente del puente

3.2.3. Estructura

La estructura es considerada como un ensamble de elementos que mantienen su forma y unidad, esta posee peculiaridades tales como resistencia de cargas, rigidez y estabilidad junto con otros miembros y cables; en un puente colgante la estructura se elige teniendo en cuenta la longitud del obstáculo a pasar. En Campo Dos el accidente geográfico o río supera los 90 metros y por tanto se utiliza una estructura de corte recto y se proporciona una longitud que sobrepase los 100 metros, dando un espacio adecuado para superar la barrera natural del río Sardinata y un espacio prudente para su anclaje.

La estructura o conjunto de tramos de soporte de este puente colgante es muy peculiar debido a su extensión, originalmente el puente Mabey Compact viene hecho para superar obstáculos de 60 metros y en esta zona el espacio sobrepasa esta longitud. Para superar este impase los ingenieros deciden ampliar la estructura utilizando paneles de un segundo puente con las mismas características y forma, y así alcanzar los 109,128 metros de luz necesarios para sobrepasar el cruce del río Sardinata de Campo Dos. El sistema de puentes utilizado es 200 de Mabey; está prediseñado utilizando paneles de 3,048 m (10 pies) de largo, reforzados para formar armaduras modulares laterales y construir el cruce ya sea de una o dos vías (en este caso una sola vía). Las vigas transversales de acero se extienden entre las armaduras laterales y llevan un sistema patentado de tablero de acero empernado.

El puente tiene una longitud total de 109,128 metros. El número de paneles dobles en el puente es de 72 por cada costado o parte lateral, dando un total de 144 paneles, que están hechos de acero galvanizado para mayor duración y un mantenimiento mínimo (Anexo C).



Figura 3.5. Vista lateral de la estructura del puente

La configuración de la estructura es doble-simple, extra-ancha de una vía.



Figura 3.6. Configuración de la estructura doble-simple

3.2.4. Viguetas

Las viguetas son los miembros estructurales en los que se soporta la losa o tablero. Estas están apoyadas a la estructura doble sencilla como indica la imagen anterior; cumplen con la función de soportar las cargas verticales al momento de pasar los vehículos y estos miembros transmiten esas cargas a la estructura y esta a su vez a los pendolones para que las fuerzas finalicen en los cables.

El puente de Campo Dos cuenta con 37 viguetas de seis metros de longitud, de acero galvanizado las cuales hacen a la vez de viga con doble apoyo en cada costado.

Las viguetas en un puente colgante deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- Rigidez: La estructura no se deforma al aplicar fuerza sobre ella.
- Estable: Conservar la disposición con la cual la aseguren.



Figura 3.7. Ensamble de viguetas (Fuente: Página Web de Mabey)

3.2.5. Calzada

La calzada del puente está en óptimas condiciones y se define como una calzada de circulación lenta, posee la singularidad de ser utilizada por los diferentes tipos de vehículos ya sea de carga ligera o carga pesada en ambas direcciones.

El puente Mabey Compact 200 cuenta con una sola calzada extra ancha de 4,2 metros para el flujo vehicular; cabe recordar que este puente puede soportar 52 toneladas como máximo peso, incluidos el peso del vehículo y la carga. Incluso, el fabricante recomienda que un solo vehículo de carga transite a la vez sobre el puente.



Figura 3.8. Calzada del puente de Campo Dos

3.2.6. Losa del tablero

La losa es la pieza de la superficie donde actúa la carga móvil o dinámica (paso de todo tipo de vehículos). Se observa el buen estado del tablero, el cual está seccionado por diferentes láminas de acero, esto facilitó el traslado y armado del puente al corregimiento.

Se tiene acero con un acabado en plancha estirada “Durbar” o con revestimiento antideslizante adicional aplicado en fábrica para una mayor adhesión sobre la superficie y una mayor resistencia al deslizamiento. En el caso de este puente el tablero que sostiene la losa va empernado a la estructura.

La losa del puente está dividida de la siguiente manera: Cuatro secciones de 1,05 metros de ancho por 3,048 metros de largo. En total a lo largo del puente existen 36 losas en cada sección para un total de 144 tableros o losas independientes.

3.2.7. Pendolones o péndolas

Son elementos que unen la viga transversal (que en este caso es la parte baja de estructura) y los cables principales del puente. Los pendolones hacen que el cable tenga rigidez, esto permite controlar el movimiento aerodinámico y limitar las deformaciones del tablero. (Anexo D).

Los pendolones del puente están constituidos por diferentes formas geométricas en cada uno de sus extremos; son los encargados de transmitir la carga del puente a la catenaria.

El puente consta de 33 pendolones por cada costado o parte lateral del mismo, para un total de 66 pendolones en toda la estructura.

El pendolón posee una varilla roscada y un herraje, el diámetro de la varilla es de una pulgada y un cuarto ($1\frac{1}{4}$ "), además una tuerca sujetadora en la parte superior del herraje.

Según SIPUCOL (Sistema de Administración de Puentes de Colombia) los pendolones deben ser uno de los elementos más observados en un puente colgante y su inspección debe ser anual o periódica, según la luz del puente. La corrosión, deterioro y deficiencias estructurales en pendolones son fallas indeseables en este tipo de estructuras. Los pendolones del puente de Campo Dos carecen de una fijación más próxima entre el herraje y los cables que sostienen la estructura.

Los transeúntes de este puente nos informan que recientemente la varilla que une la estructura a los cables sufrió una fractura, razón por la cual se ha decidido tomar al pendolón como punto principal en esta investigación.

Una característica que poseen los pendolones es que son los encargados de soportar armaduras transversales constituidas por perfiles metálicos en I como se detalla en la Figura 3.9.

3.2.8. Herraje

Es el elemento que sostiene los cables y la armadura; este puente tiene dos herrajes por cada pendolón, uno en la parte superior sosteniendo los cables y otro en la parte inferior de la estructura asegurando la unión de los miembros del puente.



Figura 3.9. Vista del pendolón completo



Figura 3.10. Herraje del pendolón

En la Figura 3.10. se muestra el herraje de la parte superior, formado por dos platinas de forma rectangular. La platina superior tiene seis canales por donde pasan los cables (por cada ranura o canal va un cable), dentro de cada canal los cables son separados por pernos conectores y la varilla del pendolón.

Los pernos conectores que contribuyen a mantener los cables separados son ocho (8) en cada pendolón y tienen su respectivo elemento de sujeción o tuerca; se logra observar que los cables tienen un espacio horizontal en la ranura para deslizar sobre ella. La varilla conectora está sujeta en su parte superior con una tuerca y su respectiva arandela cuadrada. Las corrugaciones son el paso de rosca de la tuerca.

La varilla pasa por medio de la armadura como indica la Figura 3.11. y es sujeta por una platina y una tuerca.



Figura 3.11. Vista inferior del roscado del pendolón

El puente tiene arriostres de forma rectangular; al interior de estos se dispone de una estructura en rombo, es decir, cuatro elementos que unen sus vértices.

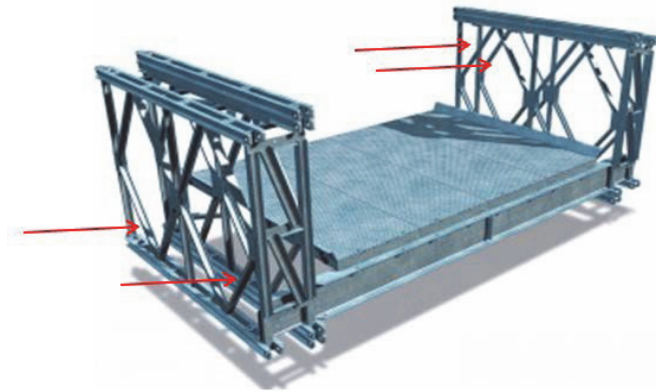


Figura 3.12. Arriostres

4

CARGAS MUERTAS Y VIVAS SOBRE EL PUENTE

4.1. Descripción de las cargas que actúan sobre el puente

La AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes) Standard y AASHTO LRFD (Factores de Carga y Resistencia de Diseño), definen y detallan todas las cargas que se deben contemplar en el diseño de los puentes y cómo estas se deben combinar, y tener en cuenta la distribución en el tablero, estructura, cables y torres.

El peso de la estructura más la suma de componentes como cables y los diferentes sistemas de sujeción se denominan carga muerta. Cuando a esta carga se le adicionan cargas móviles de vehículos, peatones y viento, se da un tipo de carga denominada carga viva; los efectos de la carga viva en un puente colgante están sujetos a factores y parámetros como las dimensiones del vehículo, peso total y cargas por eje, así como la configuración de ejes, la posición de estas cargas en forma longitudinal y transversal, el número de vehículos en el puente, la velocidad de estos, las características del puente en cuanto a materiales, tipología estructural y dimensiones; todos estos parámetros implicarían estudios complejos causa-efecto y estudios dinámicos, por lo que las normas en general asumen modelos matemáticos e hipotéticos que no representan a ningún vehículo particular en existencia.

4.2. Cargas muertas

Para la carga muerta se tiene en cuenta el peso de la estructura, el tablero, los pendolones, los cables y los elementos de sujeción. Los

elementos estructurales están diseñados a fuerzas axiales y el sistema abierto permite mayores alturas. Debido a esto reducen la cantidad de material para disminuir el peso propio. La configuración, distribución o ensamble de los miembros estructurales es como lo indica la Figura 4.1.

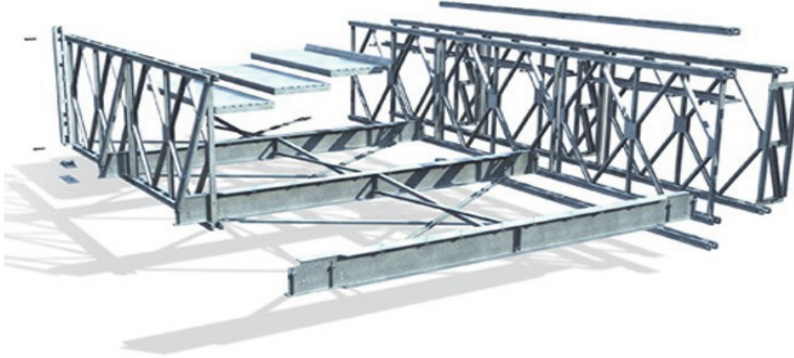


Figura 4.1. Distribución de la estructura

4.2.1. Paneles

La estructura está dividida en paneles y cada panel es como lo muestra la Figura 4.2.



Figura 4.2. Panel. Fuente: Gongchang, 2014

Las características principales con las que cuenta el panel del puente de Campo Dos son las siguientes (Anexo E):

- Largo: 3,048 m
- Alto: 2,250 m
- Peso: 316 kg
- Material: Acero galvanizado Q345B

Este panel está diseñado y construido para que soporte condiciones climáticas extremas e impredecibles como pueden ser desiertos, selvas y zonas de alta humedad gracias a que su principal material es acero galvanizado, el cual da confiabilidad en duración y da la certeza que necesita un mantenimiento mínimo.

En total, se utilizaron 144 paneles para la construcción del puente. Esto da un peso en unidades de masa total de 44.064 kilogramos.

4.2.2. Viguetas

La estructura está compuesta por 37 viguetas, las cuales unen las dos estructuras laterales dobles pero simples.



Figura 4.3. Viguetas

Las características principales de las viguetas son (Anexo F):

- Longitud: 6 m
- Altura: 25 cm
- Geometría: perfil en I
- Peso: 396 kg
- Material: Acero galvanizado

El número total de viguetas es de 37 y el peso de cada una es de 396 kilogramos para un peso total en unidades de masa de 14.652 kilogramos.

4.2.3. Losa o tablero

Tablero antideslizante con sistema de sujeción por pernos (Anexo G):



Figura 4.4 Losa

Las características principales son:

- Largo: 3,048 m
- Ancho: 1,05 m
- Peso: 330 kg
- Material: Acero

El tablero pesa 330 kg por unidad y el puente de Campo Dos cuenta con 144 tableros para un peso total por unidad de masa de 47.520 kilogramos.

4.2.4. Vertical tipo Z

Elemento que une a los dos paneles mediante pernos y está por encima de las viguetas (Anexo H):



Figura 4.5. Vigueta vertical tipo Z.
Fuente: Gongchang, 2014

Las características principales:

- Largo: 1,694 m
- Ancho: 0,480 m
- Peso: 52,93 kg
- Material: Acero galvanizado grado Q345

Cada elemento pesa 52,93 kilogramos y en el puente hay 72 unidades las cuales pesan en unidades, de masa un total de 3.810 kilogramos.

4.2.5. Horizontal tipo W

Elemento que une horizontalmente en la parte superior a los paneles. Esta unión está dada por pernos (Anexo I):



Figura 4.6. Vigueta horizontal tipo W
Fuente: Gongchang, 2014

Las características principales:

- Largo: 2,30 m
- Ancho: 0,480 m
- Peso: 52,72 kg
- Material: Acero galvanizado Q345

Cada unidad tiene un peso de 52,72 kg y el puente de Campo Dos consta de 72 unidades las cuales pesan en unidades de masa un total de 3.792 kilogramos.

4.2.6. *Vigueta de rigidez*

Vigueta ubicada en la parte superior e inferior del panel para dar mayor rigidez a la estructura. Esta vigueta está sujeta al panel mediante pernos (Anexo J):

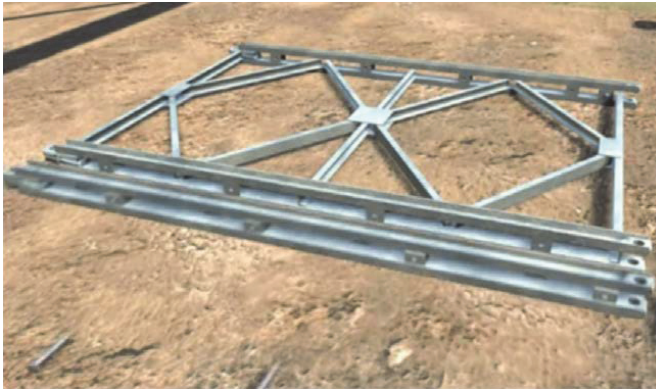


Figura 4.7. Ubicación de la vigueta de rigidez



Figura 4.8. Vigueta de rigidez

Las viguetas de rigidez tienen como características principales:

- Longitud: 3.048 m
- Peso: 90 kg
- Material: Acero galvanizado grado Q345

Cada unidad tiene un peso de 90 kilogramos y el puente de Campo Dos consta de 34 pares por cada costado para un total de 136 viguetas de rigidez, las cuales tienen un peso total de 12.240 kilogramos.

4.2.7. Vertical de acabado final

Está ubicado al final de cada costado del puente para dar un acabado y presentación, como indican las Figuras 4.9. y 4.10. (Anexo K).



Figura 4.9. Miembro estructural final



Figura 4.10. Miembro estructural de acabado final

Fuente:Gongchang, 2014

Las características principales son:

- Largo: 2,429 m
- Peso: 87 kg
- Material: Acero galvanizado Q345

Cada unidad tiene un peso de 87 kg y el puente de Campo Dos consta de 4 unidades las cuales pesan en unidades de masa un total de 348 kilogramos.

4.2.8. Apoyo del puente

Los apoyos del puente son los que permiten su fijación al concreto o la superficie donde se ubica. Figura 4.11 (Anexo L).



Figura 4.11. Apoyo del puente

Fuente: Gongchang, 2014

Las características principales son:

- Dimensiones: 300x200x700 mm
- Peso: 15 kg
- Material: Acero galvanizado Q345

4.2.9. Miembros cruzados

Este se une a las viguetas, en forma de cruz o equis, dando rigidez al puente (Figura 4.12.). El cruzado horizontal tiene forma de I o IPE (flechas rojas) y el cruzado vertical tiene forma de ángulo (flechas negras).



Figura 4.12. Especificación de miembros cruzados

Las características principales son:

- Perfil en I
- Largo: 5,2 m
- Ancho: 80 x 46 mm
- Peso: 31 kg
- Material: Acero galvanizado Q345

Perfil en ángulo:

- Largo: 3,045 m
- Ancho: 3,810 m
- Peso: 5,6 kg
- Material: Acero galvanizado Q345

Todos los miembros estructurales cruzados son dobles, el puente cuenta con espacio para 36 miembros. Para los miembros con estructurales en I se tienen un total de 72 unidades con un peso total de 2.232 kilogramos.

Para los miembros cruzados en forma de ángulo se tienen un total de 72 unidades y un peso total de 403 kilogramos.

4.2.10. Cables

Los cables que sostienen la estructura del puente son de acero galvanizado; en su totalidad son doce (12) cables, de tipo Standard 6 x 19 con alma de acero y Torón Seale.



Figura 4.13. Cables del puente de Campo Dos

Los cables presentan las siguientes características:

- Factor de Seguridad: 3.5
- Diámetro Nominal: 1 1/4"
- Peso: 4,30 kg/m
- Resistencia: 54,14 toneladas

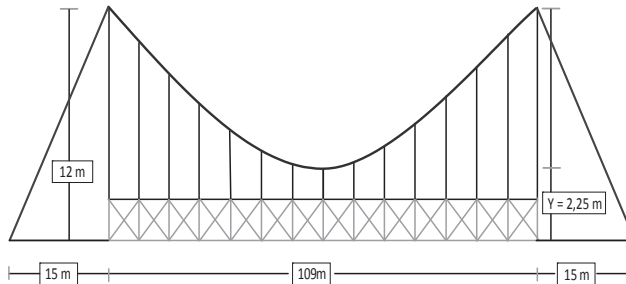


Figura 4.14. Geometría del puente

Ecuación de la curva:

$$Y = 2,25 \text{ m}$$

$$A = (12; -54.5) \text{ m}$$

$$B = (12; 54.5) \text{ m}$$

La ecuación de la longitud para una curva catenaria es:

$$s = c \sinh \frac{x}{c}$$

Donde:

S = longitud de medio arco

c = altura del nivel de la superficie al punto de origen de la curva

x = coordenada en el eje horizontal.

La ecuación para la altura de la catenaria es:

$$y = h + c$$

Donde:

h = altura desde el centro (c) hasta el punto superior h= 9.75

Reemplazando se obtiene

$$y = 9,75 + c$$

Utilizando la ecuación

$$s = c \cosh \frac{x}{c}$$

Igualando

$$9,75 + c = c \cosh \frac{x}{c}$$

Como x = 109/2 y reemplazando

$$9,75 + c = c \cosh \frac{54,5}{c}$$

Resolviendo

$$s = 154 \sinh \frac{54,5}{154} = 55,64 \text{ m}$$

Como S es solo medio arco lo multiplicamos por dos para la longitud total y esta va a obtener el valor de:

$$s = 55,64 \times 2 = 111,23 \text{ m}$$

Longitud del cable inclinada.
 Longitud horizontal (a) 15 m
 Longitud vertical (b) 12 m
 Longitud inclinada l

Ahora bien, para el cálculo de los triángulos se tiene:

$$l = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{15^2 + 12^2} = 19.21 \text{ m}$$

Como hay dos longitudes inclinadas multiplicamos por dos para obtener la total.

$$l_t = 19,21 \times 2 = 38,42 \text{ m}$$

La longitud de arco total es:

$$s_t = 38,42 \text{ m} + 111,23 \text{ m} = 149,65 \text{ m}$$

El peso total de un cable será de:

$$w_c = 149,65 * 4,30 = 643,5 \text{ kg}$$

4.2.11. Varilla

Altura de las varilla: utilizando la ecuación para la altura de una curva catenaria obtenemos la altura de la varilla:

$$s = c \cosh \frac{x}{c}$$

Donde C es un punto de referencia con el origen que está por debajo del nivel del puente. Para calcular el valor de la altura de la péndola se hace la siguiente operación: al valor calculado de C se le suman 2,25 metros, que es la altura del pendolón principal, y luego se le suma 0,5 metros a cada péndola o varilla para obtener su longitud total.

$$l_t = y + 2,25 + 0,5 - C$$

$$l_t = y + 2,25 + 0,5 - 154$$

$$l_t = y - 151,25$$

El valor de 0,5 metros se le adiciona para tener un nivel de referencia debajo del puente y una tolerancia para el ajuste del pendolón si es necesario tensionar los cables del puente. Estos cálculos se harán en una tabla de Excel. El nivel de referencia de la curva va a ser su centro tanto para X como para Y.

Tabla 4.1.
Cálculo de la longitud de las varillas

Número de varillas	Longitud (X)	Altura (Y)	Longitud total (m)
0	0	154,00	2,75
1	3,048	154,03	2,78
2	6,096	154,12	2,87
3	9,144	154,27	3,02
4	12,192	154,48	3,23
5	15,24	154,75	3,50
6	18,288	155,09	3,84
7	21,336	155,48	4,23
8	24,384	155,93	4,68
9	27,432	156,45	5,20
10	30,48	157,03	5,78
11	33,528	157,66	6,41
12	36,576	158,36	7,11
13	39,624	159,13	7,88
14	42,672	159,95	8,70
15	45,72	160,84	9,59
16	48,768	161,79	10,54

Se aclara que cada valor de longitud total se repetirá cuatro veces. El nivel de referencia 0 “origen”, es decir, la varilla o péndola cero solo se repetirá dos veces. Esto significa que cada repetición va a ser igual al número de varillas o péndolas.

Tabla 4.2.
Longitud total para el peso de las varillas

Altura total	Cantidad	Longitud (m)
2,75	2	5,50
2,78	4	11,12
2,87	4	11,48
3,02	4	12,09
3,23	4	12,93
3,50	4	14,02
3,84	4	15,35
4,23	4	16,92
4,68	4	18,74
5,20	4	20,80
5,78	4	23,10
6,41	4	25,66
7,11	4	28,46
7,88	4	31,50
8,70	4	34,80
9,59	4	38,35
10,54	4	42,15
Total		362,96

La longitud total de varillas es de 363 metros. La masa lineal de la varilla seleccionada es de 7,907 kg/m. Por lo tanto, el peso de las varillas va a ser de 2870.241 kilogramos.



Figura 4.15. Tamaños de las varillas

Masa de la estructura

130.706 kilogramos

Elementos de sujeción herraje y péndolas

El peso de los elementos de sujeción se va a tomar como el 10 % del peso total de la estructura, y da un valor de 13.070.6 kilogramos.

Masa de la estructura de los cables

La masa de los cables es de 3.658 kilogramos.

Masa final

La masa final o total de puente de Campo Dos tiene un valor de 147.634.60 kilogramos.

La Tabla 4.3. resume y describe el cálculo de la masa.

Tabla 4.3.
Masa total puente Campo Dos

Masa total de elementos puente Campo Dos			
Elemento	Peso unidad (kg)	Cantidad	Peso total (kg)
Panel	316	144	45.504
Viguetas	396	37	14.652
Losa	330	144	47.520
Vertical tipo z	52,93	72	3.810,96
Horizontal tipo w	52,72	72	3.795,84
Vigueta de rigidez	90	136	12.240
Vertical de acabado	87	4	348
Apoyos	50	4	200
Cruzado en l	31	72	2.232
Cruzado en ángulo	5,6	72	403,2
Peso total estructura			130.706,00
Peso sujeción y herraje			13.070,6
Cables	643	6	3.858
Varillas			2.870,241
Masa total			150.504,841

4.3. Cargas vivas

Son cargas gravitacionales debidas a la ocupación normal de la estructura y que no son parte de ella. La determinación de esta carga trae una gran incertidumbre, por eso han sido objeto de estudio durante muchos años y gracias a esto se cuenta con una estadística y en la actualidad hay una aproximación para el cálculo de esta de acuerdo al uso de la estructura.

En los puentes se puede encontrar cargas de vía, camión, frenado e impacto.

Carga de vía, es la carga de flujo vehicular que transita en el puente. Este flujo está limitado a automóviles livianos lo que quiere decir que son autos deportivos, camperos y camionetas livianas.

Carga de camión, lo primero que se debe hacer es especificar el tipo camión que va a transportar la mayor carga sobre el puente, luego hacer un estudio de deflexión del puente ubicando el camión a un cuarto y centro de luz del puente. Para el puente de Campo Dos se utiliza el camión C-40-95. Este tipo de camión es mencionado en el Código colombiano de Diseño sísmico de Puentes, pero debido a su similitud con el camión S-32 que utilizaba el ministerio de Transporte se aclarar las dudas sobre los vehículos mencionados en la norma AASHTO para vías primarias. Con el uso de este camión se pretende definir un factor de seguridad que se encuentra en 1,3 utilizado en los puentes colombianos siempre y cuando la carga del camión se encuentre en términos de legalidad. Lo que quiere decir que la carga no supere las 32 toneladas de masa.

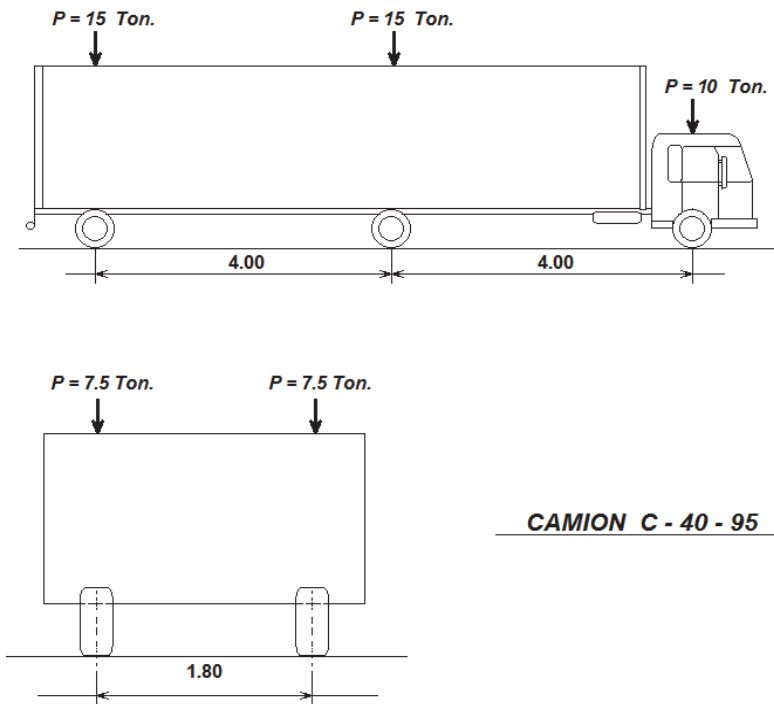


Figura 4.16. Camión C-40-95
Fuente: Código Nacional De Puentes

Cada país tiene su norma, el Código Nacional colombiano indica cómo combinar la carga de vía con la carga de camión, así se muestra en la imagen:

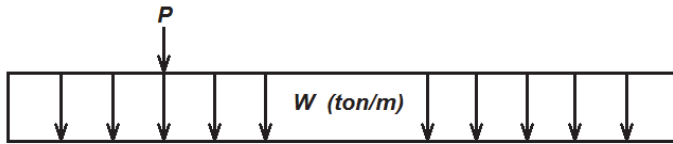


Figura 4.17. Carga de carril para carga de camión
Fuente: Código Nacional De Puentes

El Código colombiano también indica cómo calcular la carga cortante y el momento flector producido por la carga combinada dependiendo de la luz del puente.

	LUZ		CARGA	
Momento:	$L < 28.0$	Camión		
	$28.0 \leq L < 100$	Carril	$w = 1.50 - \frac{L - 28}{200}$	$P = 12.0 \text{ t}$
	$L > 100$	Carril	$w = 1.14 \text{ t/m}$	$P = 12.0 \text{ t}$
Cortante:	$L < 24.0$	Camión		
	$24.0 \leq L < 134$	Carril	$w = 1.50 - \frac{L - 24}{300}$	$P = 16.0 \text{ t}$
	$L \geq 134$	Carril	$w = 1.14 \text{ t/m}$	$P = 16.0 \text{ t}$

Figura 4.18. Cálculo del cortante y el momento flector para carga combinada
Fuente: Código Nacional de Puentes

Carga de frenado. De acuerdo a la norma AASHTO las fuerzas de frenado se pueden suponer como el 25 % de las cargas verticales de los ejes de cada vehículo de carga en cada una de las vías del mismo sentido, y en el puente de Campo Dos está limitado al tránsito de un solo vehículo a la vez en el puente.

Existe otro tipo de carga denominada carga ambiental, consiste en cargas de succión y presión de viento y cargas sísmicas (fuerzas inerciales causadas por movimientos sísmicos), cambios de temperatura que hacen que el suelo sobre el cual se apoya la estructura pierda propiedades y provoque deslizamientos.

Cargas de viento. Las amenazas eólicas han sido consideradas en la estructura metálica; los puentes colgantes tienen como característica el poco peso de su estructura, son rígidos pero livianos. La fuerza del viento depende de la velocidad con que este actúa sobre la estructura, incluso puede variar con la altura del puente sobre el piso y el grado de protección que ofrece la topografía, las edificaciones circundantes y de las propiedades aerodinámicas del perfil geométrico de la estructura.

Los factores que influyen en la magnitud de esta carga son: la velocidad del viento y su variación con la altura, la magnitud de las ráfagas, las condiciones locales de la superficie del terreno circunvecino, la forma de la superficie expuesta al viento, la zona o región.

La velocidad del viento en Norte de Santander es de 60 Km/hora según el mapa de vientos mostrado en el Anexo M.

La norma NSR-10, capítulo B.6 –Fuerza de viento– presenta métodos para evaluar el efecto del viento sobre las edificaciones y sus componentes. El denominado «método simple», puede aplicarse cuando los efectos producidos por el viento no son fundamentales en el diseño, la fuerza de viento W se obtiene multiplicando la presión del viento p , por el área lateral de la edificación.

Según el Manual de Diseño de Puentes, las presiones originadas por el viento se supondrán proporcionales a la velocidad del viento al cuadrado. Para puentes con una altura de 10 metros o inferior, medida desde el nivel del agua o la parte más baja del terreno, se supondrá que la velocidad del viento es constante.

$$P = P_B \left(\frac{V_Z}{100} \right)^2$$

Dónde:

P = presión de viento

P_b = presión básica correspondiente a 100 kilómetros por hora.
Dato tomado de la tabla 2.4.3.10.2 del manual Diseño de Puentes (150 kgf/m).

La norma AASHTO 3.8.3.1. escribe que cuando la relación luz/ ancho del tablero es menor a 30 no es necesario hacer estudios de estabilidad aerodinámica en el puente.

Cargas sísmicas o efectos de sismo. Un sismo es una liberación súbita de energía en las capas interiores de la corteza terrestre que produce un movimiento ondulatorio del terreno. Este movimiento ondulatorio se traduce en una aceleración inducida a la estructura que contando esta con su propia masa y conociendo la segunda Ley de Newton se convierte en una fuerza inercial sobre la estructura. Esta fuerza es inercial porque depende directamente de la masa de la estructura sometida al sismo.

$$F = ma$$

Las cargas sísmicas dependen de la rapidez y duración del sismo, de la longitud del puente y de estudios geotécnicos para identificar el tipo de suelo y analizar la velocidad de onda de corte del mismo. Según el Manual de Diseño de Puentes existen cuatro tipos de suelo:

Tipo I. Roca de cualquier característica o descripción o arcilla esquistosa o cristalizada en estado natural.

Tipo II. Es un perfil compuesto de arcilla rígida o estratos profundos de suelos no cohesivos donde la altura del suelo no excede los 60 metros.

Tipo III. Es un perfil con arcillas blandas a medianamente rígidas y arenas caracterizadas por nueve metros o más de arcillas blandas.

Tipo IV. Es un perfil con arcillas blandas o limos cuya profundidad es mayor a los 12 metros.

Las Normativas Sísmicas de Puentes permiten el uso de los siguientes métodos de análisis sísmico:

1. Método Simplificado o de Carga Uniforme (MCU).
2. Método de Análisis Espectral Unimodal (MEU).
3. Método de Análisis Espectral Multimodal (MEM).
4. Método de Análisis Tiempo-Historia (MTH). AASHTO, ASSHTO-LRFD.

Lamentablemente en el corregimiento de Campo Dos no se tienen datos ni estudios previos de suelo o de sismicidad en la zona, por lo tanto no fue posible aplicar ninguno de los cuatro métodos mencionados pues todos utilizan como dato de partida de condiciones iniciales de simulación, un historial estadístico de sismos previos.

Cargas térmicas. Se conoce como carga térmica a la fuerza que se origina en una estructura resistente a la dilatación o variación de temperatura que genera un elemento resistente al recibir calor. Este tipo de carga o fuerza térmica está incluido en la norma AASHTO en el artículo 3.16. de la sección 3.

Toda estructura de este tipo está expuesta a cambios de temperatura y varían de forma y dimensiones durante el ciclo de temperaturas diurnas y nocturnas, como en los ciclos de verano. Las acciones térmicas son notables en los puentes de acero, se enfatizan en el efecto de la diferencia térmica de sus elementos y esta variación de temperatura puede provocar deformaciones a la estructura.

La radiación solar es el flujo de energía que se recibe del sol en forma de ondas electromagnéticas (rayos), las estructuras metálicas a la intemperie siempre están expuestas a la radiación solar directa, las variaciones de un delta de temperatura dependen del revestimiento que posea dicha estructura:

Sin revestimiento: $DT \pm 20^\circ$

Con revestimiento: $DT \pm 10^\circ$

El coeficiente de dilatación térmica del acero: $\alpha = 0,000012^\circ\text{C}^{-1}$.

La deformación térmica (δ) depende del coeficiente de expansión térmica (α), de la longitud del elemento (L) y del cambio de temperatura (ΔT) se puede calcular como:

$$\delta = \alpha L (\Delta T)$$

A temperatura del ambiente, el intervalo de tiempo en donde se produce más calor por causa de radiación solar en el departamento de Norte de Santander es de 4 horas, en el horario de 11 am a 2 pm (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM).

5

ASPECTOS GENERALES DE LAS CARGAS PROPIAS DEL PENDOLÓN

El pendolón del puente de Campo Dos soporta una carga constante permanente de propio peso y otra cuando se genera el paso de un vehículo. El puente presenta una deformación en su estructura, esta es soportada en conjunto por el pendolón y el cable. Las torres se inclinan levemente y el cable se deforma al estar sometido a la carga vehicular o de tránsito y el pendolón es tensionado.

No se van a tener en cuenta las cargas de viento porque estas son bajas, e incluso a veces ni tienen efectos sobre el puente. Además, el puente es estable a cargas de viento, esto de acuerdo a la condición de la AASHTO 3.8.3.1. donde se especifica que un puente debe tener una relación de luz sobre ancho de calzada menor a 30 y este puente la cumple. La velocidad promedio del viento en el área que lo rodea es de 40 kilómetros por hora. Igualmente las cargas de frenado o de arranque en el puente tienen una probabilidad mínima de que se presenten ya que el mismo está condicionado a un vehículo a la vez. En el puente de Campo Dos no existe un dato determinado respecto al tránsito que circula sobre él; a esta incertidumbre se le debe sumar la falta de una báscula que controle la carga de cada tipo de vehículo que transita. Tampoco cuenta con un control policial o del Ejército Nacional que dirija el paso de vehículos de carga pesada adecuadamente.

La siguiente figura ayuda a la verificación que las cargas que actúan sobre el pendolón son de tensión pura.

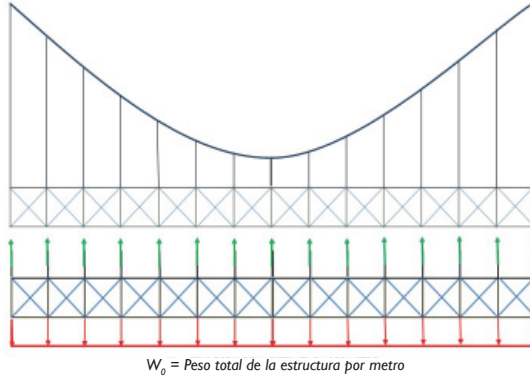


Figura 5.1. Diagrama de fuerzas de la y pendolón estructura

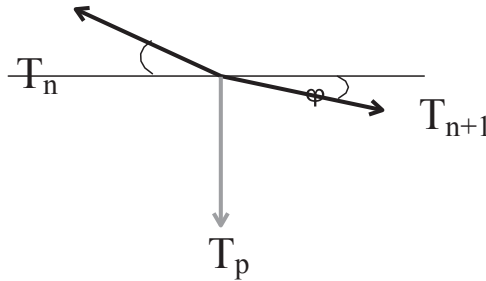


Figura 5.2. Diagrama de cuerpo libre de los pendolones del puente de Campo Dos

Donde:

T_n : Tensión del cable en el nodo

T_{n+1} : Tensión del cable en el nodo siguiente

T_p : Tensión del pendolón en el nodo

Además de soportar las cargas muertas por la estructura, el pendolón también soporta la carga del cable o el peso lineal del mismo. El pendolón presenta una ruptura o falla ya que sobre el puente se presenta un sobrepeso, es decir, este excedió su límite de carga.

El puente de Campo Dos tiene un límite de carga de 52 toneladas como capacidad máxima; por norma una tractomula puede cargar

32 toneladas más el peso del contenedor o cama baja y factores de carga como el peso del cabezote del tractocamión que varía de 8 a 15 toneladas.

Lamentablemente en el puente de Campo Dos se presentó con certeza el cruce en caravana de dos o más tractocamiones con carga pesada a la vez, es decir, que sobre el puente hubo más de 52 toneladas. Los conductores hicieron caso omiso a la recomendación de un solo vehículo en el tránsito del puente. Si cada una de las tractomulas lleva una carga de 45 toneladas el puente soportó una carga de 90 toneladas, donde claramente se nota el exceso de 38 toneladas. Esta sobrecarga posiblemente produjo un micro agrietamiento sobre la varilla central del puente donde ocurre la máxima deformación y está localizado el máximo esfuerzo.



Figura 5.3. Exceso de carga sobre el puente de Campo Dos

En la Figura 5.3 se observa el tránsito de tres vehículos sobre el puente, dos son de carga pesada y el restante es un vehículo liviano. Aunque no se tiene certeza del total de la carga que transportan los vehículos, la fotografía es una clara evidencia de que el puente soporta carga excesiva, lo cual favorece la ocurrencia de fallas.

6 TIPO DE FALLA DETECTADA

6.1. Consideraciones generales

La barra corrugada o varilla que hace parte del pendolón que ha fallado tiene una característica particular, y es su capacidad de concentrar esfuerzos debido a su geometría exterior corrugada. La Figura 6.1. muestra esta geometría particular la cual ha sido diseñada así para recibir una tuerca de sujeción (Figura 6.3.).



Figura 6.1. Estructura geométrica de la varilla del pendolón

El pendolón fracturado tiene corrosión superficial producida por su exposición al medioambiente húmedo de la zona y por el frotamiento causado por el ajuste existente entre los orificios de las platinas y la varilla corrugada (Figura 6.2.). Es de esperar por lo tanto que el valor de vida útil y resistencia a la fatiga del material, disminuyan en un porcentaje considerable (cerca de un 25 %) debido a esta fricción no calculada del diseño y a la humedad de la zona.



Figura 6.2. Corrosión del agujero en el herraje del pendolón

6.2. Método de observación

Analizando mediante observación directa la fractura del pendolón, se define que el mismo presenta dos caras (flechas rojas en Figura 6.3.) con dos secciones de corte, que indican dónde se originó la falla. Igualmente se observa con línea azul la parte final donde ha sufrido desgarramiento (Figura 6.4.). En esta figura, aunque no se evidencian marcas de playa claras por la corrosión presente, sí se contemplan estrías características en el material de la fatiga.



Figura 6.3. Varilla del pendolón fracturada



Figura 6.4. Marcas que representan falla por fatiga

La Figura 6.5. muestra otra característica que describe que el corte o desgarro no ha sido totalmente longitudinal, sino que tiene ángulo de inclinación, el cual se observa medido desde la línea roja de la figura. Esta es característica de la falla de fatiga por tensión.



Figura 6.5. Marca longitudinal

De acuerdo a lo anterior se concluye que la fractura de la varilla del pendolón es ocasionada por exceso de carga de una caravana de vehículos y no estuvo afectada por frecuencia natural o resonancia. La sobrecarga perjudicó la varilla central del puente, zona donde ocurre la máxima deformación y está localizado el máximo esfuerzo. Por lo tanto, el fallo del pendolón se originó por fatiga de materiales producto de una micro grieta que se expandió ocasionando la fisura o desgarro de la varilla del pendolón; este fenómeno aparece sin previo aviso.

En el pendolón del puente de Campo Dos la fatiga del material ha sido producida por los siguientes factores:

- Falta de homogeneidad de los materiales (acabado superficial sin calidad y no homogeneidad de los pendolones instalados).
- Aplicación de cargas variables (tránsito natural de vehículos de diferente peso y longitud).
- Aparición de micro fisuras, por corrosión y exposición al ambiente húmedo de la zona.
- Origen de la micro fisuras por sobrecarga (acceso no controlado al puente; se evidencia en la Figura5.3.).

7 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL ACTUAL DEL PENDOLÓN

El puente de Campo Dos es un aporte conjunto de los gobiernos de Colombia y Venezuela; los sistemas de sujeción y el cable fueron aportados por el gobierno de Colombia, y el gobierno de Venezuela donó la estructura del puente tipo Mabey.

Para el rediseño del pendolón ha sido necesario tener información y antecedentes del puente y sus diferentes elementos. El herraje del pendolón está formado por dos platinas planas de acero A36, las cuales poseen forma geométrica rectangular; cada platina tiene 4" x 3/8" de ancho por alto y 50 cm de longitud con ocho perforaciones de 3/4" para tornillos y tuercas de acero galvanizado A307. Estas platinas están cubiertas con anticorrosivo y cumplen con la función de ajustar seis cables de 1 1/4" de acero.



Figura 7.1. Herraje del pendolón fracturado

La varilla del pendolón es de acero fundido. Su altura varía de acuerdo al tramo del puente y posee la característica de ser una varilla corrugada con un diámetro de 13/8 de pulgada.

De la ficha técnica de la varilla del pendolón, Tabla 7.1., se obtienen los siguientes datos de diseño:

$D = 0,0345 \text{ mSy} = 478 \text{ MPa}$

Carga que soporta a fluencia: 45 toneladas



DIACO S/A
 Ciudadela Industrial Duitama (Boyaca),
 Duitama, Colombia. C.P - 99999 Tel/Fax:

CERTIFICADO DE CALIDAD

CLIENTE	MATERIAL	CANTIDAD / DIMENSION	LOGO
FACTURA 90910234/90	110000185	1 3/8"	3718707603
PRECIO (kg) 49.182	Nº PEDIDO DEL CLIENTE 496233/000090	GRABO	REMOCIÓN
Nº PEDIDO DEL CLIENTE PED11000037301302371			

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)											
C	Si	P	S	Mn	Cu	Ni	CF	Mo	Nb	V	C.E.
0.25	0.14	0.035	0.14	0.14	0.10	0.14	0.09	0.03	0.000	0.002	0.431

PROPIEDADES MECÁNICAS									
P.C.	D.R.	V.R./P.C.		Alacq		Doblado			
478	618	3.29	36.00	5	16.00	OE			

RESERVACIONES	RESPONSABLE DE CALIDAD
	DUITAMA, 03.08.2013
	<i>Mauricio Piracon Celis</i>
	MAURICIO PIRACON CELIS

Tabla 7.1. Propiedades químicas del pendolón (varilla de acero)

8

DISEÑO DEL NUEVO PENDOLÓN Y COMPONENTES GENERALES

El pendolón es una pieza vertical cuyo extremo superior se encuentra unido al vértice de la armadura y sostiene el tirante por su punto medio. En el caso del puente de Campo Dos el pendolón actualmente está compuesto por una varilla, dos tuercas y dos placas rectangulares: una en la parte superior y otra en la inferior del cable, también denominadas herraje del pendolón.

El pendolón es considerado un elemento importante en todo puente colgante y su diseño debe dar confiabilidad.

El rediseño del herraje del pendolón surge como necesidad de brindar seguridad a la vida útil del pendolón y los cables, para ello se han tenido en cuenta consideraciones propias del diseño y del funcionamiento actual del puente:

- Los cables que sostienen al puente no pueden ser cambiados, ni pueden sufrir modificación alguna, por tal razón la geometría del nuevo herraje debe ser diseñada teniendo en cuenta el diámetro de los cables principales y el espaciamiento que existe entre los mismos.
- Por las diferencias de altura que debe existir entre cada pendolón y para su fácil armado el nuevo diseño del herraje debe ser entendible estéticamente y su peso se propone por el personal de mantenimiento, no debe ser superior a 35 kg.

El nuevo diseño del herraje del pendolón se ha seleccionado con geometría elíptica, para de esta forma disminuir la corrosión por

acumulación de humedad en época de lluvias, es decir, para que tenga escurrimiento natural de agua.

Está compuesto por dos piezas que al unirse crean la elipse, además, este modelo es cerrado y en su línea de unión tiene seis canales cilíndricos donde se ubican los cables; se ha diseñado de esta manera para un mejor encajamiento e impedimento de movimientos axiales.

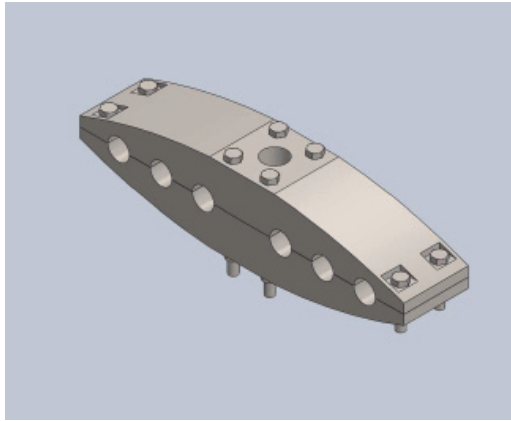


Figura 8.1. Nuevo diseño del herraje

La geometría de los tornillos que aprisionan el herraje del pendolón no se cambia en medidas de diámetro, ni de longitud del actualmente en uso.

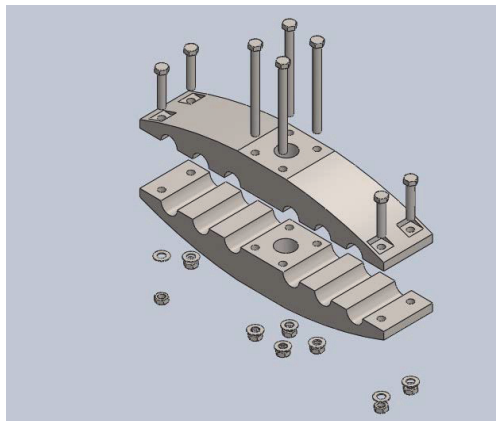


Figura 8.2. Vista explosionada del nuevo diseño del herraje

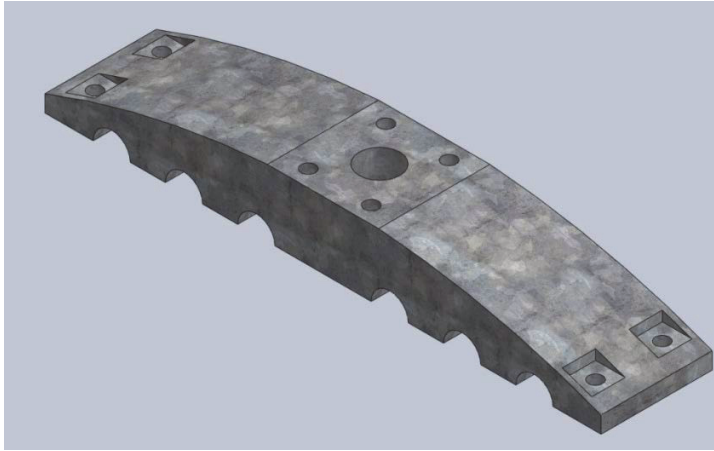


Figura 8.3. Vista de techo del nuevo diseño del herraje

8.1. Material del Pendolón y componentes

Para la selección del material se han considerado las normas:

- American Society for Test Materials, ASTM
- International Standard Organization, ISO
- American Institute of Steel Construction, AISC
- Japanese Industrial Standard Committee, JIC
- National Electrical Safety Code, NESC
- Japanese Electrotechnical Committee, JEC
- American National Standard Institute, ANSI

Por sus características físicas y mecánicas se opta por el **Acero Galvanizado** como material en el rediseño del pendolón.

8.1.1. Acero galvanizado

El pendolón satisface las normas ASTM A123 y B6-77 que señalan las tolerancias y acabados requeridos en la construcción de pendolones. Las estructuras de este tipo son de alta resistencia a condiciones ambientales y climáticas adversas (vientos, tempestades, lluvias y variaciones de temperatura) y frecuencia de ondas sísmicas de 1-10Hz.

Teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del acero galvanizado (ver Tabla 8.1.) se selecciona:

Acero estructural ASTM A572 de **Grado 50** que cumple con las propiedades mecánicas para el rediseño.

Tabla 8.1.
Propiedades mecánicas de aceros galvanizados

Propiedades mecánicas						
Calidad	Norma	Designación	Fluencia (Mpa)	Resistencia (Mpa)	Elongación (% mín.)	Usos
Comercial	ASTMA 1011	SAE 1006	-----	-----	-----	Ornamentación, tubo no estructural, autopartes
		SAE 1008				
Estructural	ASTMA 36	A 36	250	400 - 550	23	Estructuras metálicas, tubos, autopartes
	ASTMA 1011	SS GRADO 50	340	450	17	Acero de alta resistencia superior al A36
	ASTMA 572	SS GRADO 50	345	450	21	Acero de alta resistencia superior al A36
	ASTMA 588	TS>70	345	485	21	Acero de alta resistencia con resistencia a la corrosión. Fabricación de puentes
Alta presión	JIS 3116	SG 30 - SG 295	295	440	26	Recipientes metálicos para gases licuados o comprimidos
	JIS 3116	SG 33 - SG 325	325	490	22	
	ASTM 283	GRADO C	205	380 -515	25	Tanques de almacenamiento

Fuente: Importinox S.A., 2014

8.1.2. Características del Acero ASTM A572

Es un acero de alta resistencia/baja aleación, posee mayor resistencia que el acero al carbón, además de contar con gran ductilidad, facilidad de rolado y soldado, dureza y resistencia a la fatiga.

8.2. Varilla Corrugada

Para el material de la **Varilla Corrugada**, se selecciona el acero ASTM 706 Gr80 (Tablas 8.2. – 8.3. – 8.4.) con núcleo de sección circular, longitud continua (larga y recta), obtenidas por una laminación en caliente.

El ASTM A706 cubre barras y bobinas en dos grados, grado 60 y grado 80. El grado designa el límite elástico del material, es decir, del grado 60 tiene un rendimiento mínimo 60 ksi.

Tabla 8.2.

Características químicas del acero ASTM A706

Grado	% C (máx.)	% Mn (máx.)	% P (máx.)	% S (máx.)	% Si (máx.)
60	0.3	1.5	0.035	0.045	0.5
80	0.29	1.45	0.04	0.05	0.4

Tabla 8.3.

Propiedades mecánicas del acero ASTM A706

Grado	Límite de fluencia (mín.)		Resistencia a la tracción (mín.)		Elongación mín. % en 200 mm (8in)
	MPa	PSI	MPa	PSI	
60	420	45000	450	60000	12
80	550	65000	580	80000	14

Tabla 8.4.

Normas equivalentes del acero

NTP	ASTM
339.186	A706
	Gr80

Se ha cambiado el material de la varilla original del puente para dar un mayor factor de seguridad y vida al pendolón. La nueva varilla

se ha seleccionado con una masa lineal de 7.907 kg/m. Donde el cálculo del límite de fluencia con el nuevo acero ASTM A706 Gr80, teniendo en cuenta un diámetro $D = 0,0345$ m y un límite $S_y = 550$ MPa con carga que soporta a fluencia: 52,400 toneladas.

Diseñando a fatiga de materiales

$$S_e = k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_f \times s'_e$$

Donde:

k_a = Factor de la modificación de la condición superficial.

k_b = Factor de modificación del tamaño.

k_c = Factor de modificación de carga.

k_d = Factor de modificación de la temperatura.

k_e = Factor de la confiabilidad.

k_f = Factor de modificación de efectos varios.

s'_e = Límite de resistencia a la fatiga con vida rotatoria.

Con los valores de Factores:

Factor de la condición superficial. Varilla del pendolón de acabado corrugado,

$$k_a = 0,80$$

Factor de modificación de tamaño. Diámetro 34.93 mm,

$$k_b = 0,85$$

Factor de carga. Sometido a tensión y flexión,

$$k_c = 1$$

Factor modificación de temperatura. Temperatura no superior a 60°C grados,

$$k_d = 1$$

Factor por confiabilidad. diseño del 70 %,

$$k_e = 0,91$$

Factor de modificación de efectos varios, corrosión, humedad, desgaste,

$$k_f = 0,8$$

Límite de resistencia a la fatiga a carga cíclica. 0.5 Sut o resistencia última, esfuerzo menor a 1.400 MPa. Carga a fluencia $s'_e=52400$ Kgf. Da como resultado: 25940 kgf.

8.3. Sistema de sujeción tuercas y arandelas

Para el nuevo rediseño del herraje del pendolón se seleccionan **Tornillos De Alta Resistencia**, elemento que tendrá la tarea de sujetar los miembros y no va a soportar carga más que la del propio apriete de sujeción (Tablas 8.5. – 8.6.). Características principales del tornillo estructural seleccionado:

Material: Acero ASTM A490 tipo I

Tabla 8.5.

Requisitos de dureza del tornillo

Diámetro del tornillo	Longitud del tornillo	Rockwell C	
		Mín.	Máx.
1/2 - 1 in.	Menor a 2D	33	39
	2D y mayor		39
1 1/8 - 1 1/2 in.	Menor a 3D	33	39
	3D y mayor		39

Tabla 8.6.

Características químicas del acero ASTM A490

% C máx.	% P máx.	% S máx.
0.30 - 0.48	0.04	0.04
0.35 - 0.53	0.04	0.045

Las **Tuercas** seleccionadas que han de utilizarse con los tornillos, están bajo la norma ASTM 563 Grado HD, recomendada para usarse en la sujeción de Tornillos A490 Tipo I. Y el tipo de **Arandelas** se selecciona según la norma ASTM F436.

La tuerca que sujeta a la varilla con la estructura en la parte inferior y superior del puente es una tuerca larga hexagonal de especificaciones ISO 9001:2000 de acero al carbono con recubrimiento galvanizado que cumple con las especificaciones adecuadas para el nuevo rediseño; por lo tanto se selecciona la misma.

Una vez seleccionado el nuevo material del herraje (ver Figuras 8.1. – 8.2.) se puede comprobar que este cumple con el requerimiento de peso no superior a 35 kgf.

8.4. Nueva masa calculada según el rediseño

Tabla 8.7.

Masa recalculada del puente Campo Dos

Masa total de elementos puente Campo Dos			
Nombre	Peso Und. (kg)	Cantidad	Peso total (kg)
Peso total estructura			130.706
Peso sujeción			11.763
Herraje	30.2	66	1.993.2
Cables	643	6	3.858
Varillas			2.70,2
MASA TOTAL			151.190,9

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMPUERO, J. (2006). *Aspectos estructurales en el montaje de puentes colgantes*. (En línea) Recuperado de: http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/Seminario2006/Ampuero.pdf
- ARCUS COLOMBIA (2014). *Mapa eólico de Colombia*. (En línea) Recuperado de. <http://www.arcuscolombia.com/portal/archivos/PlanodeVientosdeColombia.pdf>
- ARQHYS ARQUITECTURA (2014). *Arrostramientos*. (En línea) Recuperado de: <http://www.arqhys.com>
- ASKELAND, D. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. (3ª ed.). México D.F.: International Thomson Editores.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (2000). *Código Colombiano de Diseño y Construcción de Puentes*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente*. NSR 10. Bogotá: AIS, 1997.
- BEER, F., JOHNSTON, E., DEWOLF, J. y MAZUREK, D. (2010). *Mecánica de materiales*. (5ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill.
- BUDYNAS, R. y NISBETT, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill.
- CARRILLO, F. y LÓPEZ, A. (2006). *Aplicaciones de puentes metálicos modulares en El Salvador*. Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador.
- CONGRESO DE COLOMBIA (1997). Ley 400 (19 agosto, 1997). Por la cual se adoptan normas sobre Construcciones Sismo Resistentes. Recuperado de: http://www.disaster-info.net/PED-Sudamerica/leyes/leyes/suramerica/colombia/otranorm/LEY_400.pdf
- DEUTSCHMAN, A., MICHELS, W., WILSON, C. (1987). *Diseño de elementos de máquinas. Teoría y práctica*. México: Compañía Editorial Continental S.A. de C.V.

- FAIRES, V. M. (1970). *Diseño de elementos de máquinas*. Barcelona: Montaner y Simón S.A.
- HAMROCK, B. JACOBSON, B. y SCHMID, S. (2000). *Elementos de máquinas*. México: McGraw-Hill
- HERNÁNDEZ, H. y ESPEJO, E. (2002). *Mecánica de fractura y análisis de falla*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- HISPAGUA (2007). *Sistema español de información sobre el agua. Desastres - colapsos de puentes*. (En línea) Recuperado de: <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/suplementos/Colapsos%20de%20puentes/desastres.htm>
- MOTT, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Educación.
- RAMÍREZ, P. y LEÓN, N. (2010). *Diseño de puentes por el método LFRD*. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia
- SMITH, W. (1998). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. (3ª ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- UNIVERSIDAD PONTIFICIA JAVERIANA (2012). *Manual para el mantenimiento de puentes*. (En línea) Recuperado de: <http://web.min-transporte.gov.co/pvr/images/stories/documentos/puentes/la2>
- YAMIN, L. y RUIZ, D. (2014). *Vulnerabilidad sísmica de puentes en Colombia y estrategias para su construcción*. (En línea) Recuperado de: <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/Rv13-A10.pdf>

ANEXOS

Anexo A Puente de Campo Dos (Tibú)



Anexo B Capacidad de carga y altura del puente de Campo Dos



Anexo C
Herraje central donde ocurrió la falla



Anexo D
Parte superior del pendolón por donde ocurrió la falla



Anexo E Panel estructural



Posted Date: 2013-12-01
Expiry Date: 2014-03-01
Min. Order Quantity: 1 piece(s)
Price Term: FOB
Port: Shanghai
Price: Negotiable
Payment Terms: L/C, T/T
Production Capacity: 2000 piece(s) Per Month
Delivery Time: 10 days after the prepayment, but it depends the quantity
Packaging Details: 40HQ Container

Brief Product Description

1. Easy Installed
2. Galvanized surface
3. Long-lasting life span
4. Avoid Being Rusted

Products Attributes

Standart	GB
Grade	Q345B
Dimintions	3.048m
Place of Origin	Jiangsu China (Mainland)
Brand Name	Bailey
Model Number	HD200
Type	Heavy
Application	Steel Structure Bridge
Unit Weight	316Kg
Dimention	3.048m * 2.250m

Detailed Product Description

Compare to the bailey panel whose surface is just painted by green original oil the zing coating can protect the surface from the damaging by the rain and wind. It prolong

Anexo F Vigueta estructural



Posted Date: 2013-12-01
Expiry Date: 2014-03-01
Min. Order Quantity: 1 Unit(s)
Price Term: FOB
Port: Shanghai
Price: Negotiable
Payment Terms: L/C. T/T
Production Capacity: 2500 Unit(s) Per Year
Delivery Time: In 30 days after receiving prepayment
Packaging Details: 40 & #39; Standart Container

Brief Product Description

1. To support bailey decking System
2. Bailey Transom
3. Made of H600 steel
4. Galvanized to protect the surface

Products Attributes

Standart	BS, GB
Grade	Q345B&Q235
Place of Origin	Jiangsu China (Mainland)
Brand Name	Bailey
Model Number	HD200
Type	Heavy
Application	Steel Structure Bridge
Usage	To be utilizad to assemble the bailey br...
Surface	Hot dip galvanized
Weight	396Kg
Length Single Lane	6m around
Length Double Lane	10m around

Anexo G

Losa



Posted Date: 2013-12-01
Expiry Date: 2014-03-01
Min. Order Quantity: 1 Piece(s)
Price Term: FOB
Port: Shanghai
Price: Negotiable
Payment Terms: L/C. T/T
Production Capacity: 2000 piece(s) Per Month
Delivery Time: 10 days after the prepayment, but it depends the quantity
Packaging Details: 40HQ Container

Brief Product Description

1. Used in bailey Bridge Decking System
2. Galvanized surface
3. Long-lasting life span
4. Avoid Being Rusted
5. High Strength

Products Attributes

Standart	BS, GB
Grade	Q345B
Dimintions	3.048m
Place of Origin	Jiangsu China (Mainland)
Brand Name	Bailey
Model Number	HD200
Type	Heavy
Application	Steel Structure Bridge
Unit Weight	330Kg
Dimention	3.048m * 1.05m
Surface	Hot dip Galvanized

Anexo H Vigueta vertical tipo Z



Posted Date: 2013-12-01
Expiry Date: 2014-03-01
Min. Order Quantity: 1 Unit(s)
Price Term: FOB
Port: Shanghai
Price: Negotiable
Payment Terms: L/C, T/T
Production Capacity: 2500 Unit(s) Per Year
Delivery Time: In 30 days after receiving prepayment
Packaging Details: 40 & #39; Standart Container

Brief Product Description

1. Bailey Bridge Component
2. Loated aside the Panel Bay
3. Easy Installed
4. Protected by zinc

Products Attributes

Standart	BS, GB
Grade	Q345B&Q235
Place of Origin	Jiangsu China (Mainland)
Brand Name	Bailey
Model Number	HD200
Type	Heavy
Application	Steel Structure Bridge
Usage	Connect the panel
Surface	Hot dip galvanized
Weight	52,93Kg around
Dimention	1694 * 480(mm)

Anexo I

Vigueta horizontal tipo W



Posted Date: 2013-12-01
Expiry Date: 2014-03-01
Min. Order Quantity: 1 Unit(s)
Price Term: FOB
Port: Shanghai
Price: Negotiable
Payment Terms: L/C, T/T
Production Capacity: 2500 Unit(s) Per Year
Delivery Time: In 30 days after receiving prepayment
Packaging Details: 40 & #39; Standart Container

Brief Product Description

1. Bailey Bridge Component
2. Loated aside the Panel Bay
3. Easy Installed
4. Protected by zinc

Products Attributes

Standart	BS, GB
Grade	Q345B&Q235
Place of Origin	Jiangsu China (Mainland)
Brand Name	Bailey
Model Number	HD200
Type	Heavy
Application	Steel Structure Bridge
Usage	Connect the panel
Surface	Hot dip galvanized
Weight	51,27Kg around
Dimention	2300 * 480(mm)

Anexo J Vigueta de rigidez



Posted Date: 2013-12-01
Expiry Date: 2014-03-01
Min. Order Quantity: 1 Unit(s)
Price Term: FOB
Port: Shanghai
Price: Negotiable
Payment Terms: L/C, T/T
Production Capacity: 2500 Unit(s) Per Year
Delivery Time: In 30 days after receiving prepayment
Packaging Details: 40 & #39; Standart Container

Brief Product Description

1. To Increase the bailey bridge strength
2. Bailey Bridge Component
3. Connected on the panel with bolts
4. Protected by zinc

Products Attributes

Standart	BS, GB
Grade	Q345B&Q235
Place of Origin	Jiangsu China (Mainland)
Brand Name	Bailey
Model Number	HD200
Type	Heavy
Application	Steel Structure Bridge
Usage	To strengthen the Truss Power Capacity
Surface	Hot dip galvanized
Weight	90Kg around
Legnth	3.048m

Anexo K

Vigueta vertical de acabado final



Posted Date: 2013-12-01
Expiry Date: 2014-03-01
Min. Order Quantity: 1 Unit(s)
Price Term: FOB
Port: Shanghai
Price: Negotiable
Payment Terms: L/C, T/T
Production Capacity: 2500 Unit(s) Per Year
Delivery Time: In 21 days after receiving prepayment
Packaging Details: 40 & #39; Standart Container

Brief Product Description

1. Bailey Bridge Component
2. Loated at the net of the bailey girder
3. Easy Installed
4. Protected by zinc

Products Attributes

Standart	BS, GB
Grade	Q345B&Q235
Place of Origin	Jiangsu China (Mainland)
Brand Name	Bailey
Model Number	HD200
Type	Heavy
Application	Steel Structure Bridge
Surface	Hot dip galvanized
Male End Post Weight	78Kg around
Male End Post Dimention	2429 * 174 * 131(mm)
Female End Post Weight	87Kg around
Female End Post Dimention	2434 * 231 * 176

Anexo L Apoyo estructural



Posted Date: 2013-12-01
Expiry Date: 2014-03-01
Min. Order Quantity: 1 Unit(s)
Price Term: FOB
Port: Shanghai
Price: Negotiable
Payment Terms: L/C. T/T
Production Capacity: 2500 Unit(s) Per Year
Delivery Time: In 21 days after receiving prepayment
Packaging Details: 40 & #39; Standart Container

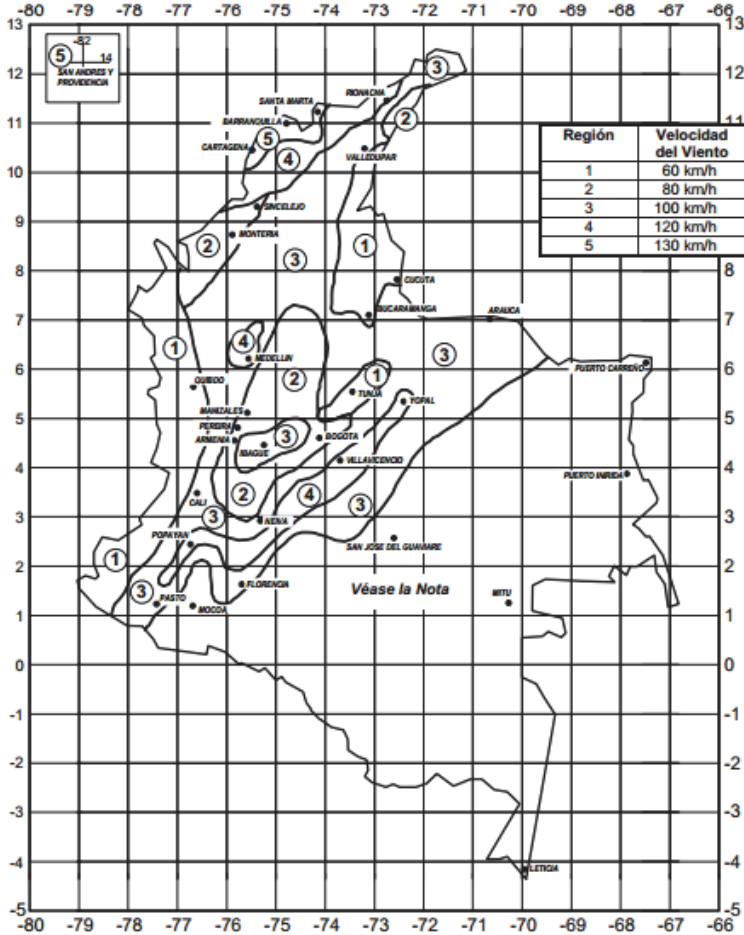
Brief Product Description

1. Bailey Bridge Component
2. Received the Press Power from the girder
3. Helpful to the Bridge Locating on Abutment
4. Zinc coa

Standart	BS, GB
Grade	Q345B&Q235
Place of Origin	Jiangsu China (Mainland)
Brand Name	Bailey
Model Number	HD200
Type	Heavy
Application	Steel Structure Bridge
Surface	Hot dip galvanized
Bearing Weight	15Kg around
Bearing Dimention	300 * 200 * 700(mm)
Bearing Plate Weight	7Kg around
Bearing Plate Dimention	1344 * 900 * 220(mm)

Anexo M Velocidad del viento en Colombia

NSR-98 – Capítulo B.6 – Fuerza de viento



Nota: Estas zonas no han sido estudiadas y se recomienda ser conservador al evaluar las fuerzas eólicas que puedan presentarse en ellas. Mientras no existan datos confiables se calcularán con base en una velocidad mínima de 100 km/h

Mapa de amenaza eólica: Velocidad del viento básico

ACERCA DE LOS AUTORES

Carlos H. Acevedo Peñaloza

Ingeniero Mecánico. M.Sc, en Ingeniería Mecánica. PhD en Ingeniería Mecánica. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander en el área de Diseño de maquinas y Mecánica teórica.

Milton F. Coba Salcedo.

Ingeniero Mecánico. PhD en Ingeniería Mecánica. Es docente de la Universidad del Atlántico y de la Universidad Simón Bolívar en el área de Mecánica de Materiales.

Eder N. Flórez Solano.

Ingeniero Mecánico. M.sc. en Ingeniería Mecánica. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander-Ocaña en el área de Ingeniería Mecánica.

El libro de investigación es el resultado de un estudio de consultoría realizado en el puente colgante del corregimiento Campo Dos sobre el río Sardinata, en el departamento de Norte de Santander, Colombia. El puente presentaba una falla de diseño sobre los pendolones, los cuales ocasionalmente se fracturaban a la altura del sistema de sujeción al cable.

El libro muestra los resultados del estudio del rediseño del pendolón, teniendo en cuenta su comportamiento, los tipos de carga presentes, los materiales de construcción, forma y sistema de fijación.