

Diseño estructural de un puente en tubería petrolera

Tipo Casing de despunte*

José Vicente Rodríguez Bolívar**

William Javier Orduz Pérez***

Luis Alejandro Bernal Romero****

Carlos Wilber Plazas Vargas*****

Recibido: 16 de abril de 2012 Aprobado: 13 de junio de 2012

L'esprit Ingénieux Tunja - Colombia V 3 pp. 36 - 48 enero - diciembre 2012

Resumen

Para el presente diseño estructural se hizo un estudio concienzudo tomando tubería que por razones de transporte o mala manipulación, las empresas petroleras las rechazan. Luego con sus diámetros, longitudes, espesores se obtuvieron los esfuerzos máximos con una carga de 52 ton. y deflexiones menores a las permitidas al código. El método de diseño es el LRFD, método de diseño basado en factores de carga y resistencia es un método probabilístico, y con la ayuda de un software como el SAP2000 se obtuvieron las deflexiones máximas y mínimas al modelo de puente tipo viable. Los puentes de tubería petrolera vehiculares se han construido en locaciones petrolera ubicadas en los departamentos de Casanare, Meta, Santander, Arauca, Norte de Santander y Putumayo de una forma empírica. Se tienen registros de aproximadamente 50 puentes con una luz máxima de 8 m. entre pilas, con diámetros de máximo de 13" y espesores de 3/8". El sistema constructivo de todos estos puentes tubulares consta de una superestructura, en vigas simplemente apoyadas y losas en concreto de espesor de 20 cm. y lámina steeldeck con un calibre de 3 mm. La infraestructura está conformada por tubería tipo Casing (A-37) y desde el punto de vista constructivo estos tipos de puentes para las empresas petroleras presentan las siguientes ventajas: El tiempo de construcción es menor con respecto a otro tipo de puentes (concreto, madera y acero). La facilidad adquisitiva de la materia prima (tubería) debido a la utilización de ésta, que ha sido rechazada por defectos generados por manipulación y transporte, no genera sobrecostos constructivos y operacionales para las empresas petroleras. Las desventajas que presenta el sistema son las siguientes: solamente estos puentes están destinados para zonas o áreas donde existen locaciones petroleras y pueden presentar problemas patológicos en estos elementos como oxidación y corrosión.

PALABRAS CLAVE: Casing, Tubería petrolera, Puentes en Colombia

Abstract

For the present structural design a conscientious study was made taking pipe that for transport reasons or bad manipulation; the oil companies reject them, with its diameters soon, lengths, thicknesses smaller ton and deflections to the allowed ones to the code were obtained the maximum forces with a 52 load of. The design method is the LRFD and with the aid of a software as the SAP2000 obtained the maximum and minimum deflections to the model of viable standard bridge.

Abstract This type of vehicle bridges have been built on oil leases located in the departments of Casanare, Meta, Santander, Arauca, Norte de Santander and Putumayo in an empirical way. Have records approximately 50 bridges with lights up to 8 meters between cells with diameters up to 13 "and thicknesses of 3 / 8".

The construction system of all these bridges consist of a tubular superstructure simply supported beams and thick concrete slabs of 20 cm and rolled steeldeck with a caliber of 3 mm. The infrastructure is casing pipe formed by type (A-37) and from the point of view these types of bridge construction for the oil companies have the following advantages: The construction time is less compared with other of bridges (concrete, wood and steel), the purchasing power of the art facility premium (pipeline) due to the use of this has been rejected by defects caused by handling and transport, not generate extra costs construction and operational for oil companies. Disadvantages presented by the system are as follows: These bridges are designed for areas or areas where there are oil leases, can present pathological problems in these type items oxidation and corrosion.

KEY WORDS: Casing, oil Pipe, Bridges in Colombia.

* Artículo de investigación, como producto final del proyecto de investigación del mismo nombre.

** Ingeniero Civil UPTC, asesor Independiente.

ingjosevic@gmail.com

*** Ingeniero Metalúrgico UPTC, Corseing Ltda.

wijaop@yahoo.com

**** Ingeniero Civil Universidad de La SALLE, especialista en Geotecnia Vial UPTC, Geociviles Ingeniería Ltda.

geotecluis@yahoo.es

***** Ingeniero Civil Universidad del Cauca, especialista en Patología, asesor Independiente.

plazasvargas@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

Existen en Colombia empresas dedicadas a la construcción de infraestructura vial para la exploración de Pozos petroleros. En las fases preliminares de la exploración se tienen problemas de alto costo para la implementación de vías de comunicación. Las zonas donde se encuentran estas exploraciones no cuentan con redes viales adecuadas para el transporte de maquinaria pesada requerida para tal fin.

Por esta razón, empresas como Copco S.A. han venido implementando la construcción de puentes con tubería tipo Casing, abundantes en estos sectores. Actualmente, estos puentes se construyen sin ningún tipo de diseño y la distribución de los elementos estructurales en que se realiza es de manera empírica, gracias a la experimentación.

En este artículo se describe la metodología y resultados provenientes de un estudio, teniendo en cuenta la información proporcionada por esta empresa para revisar la construcción de puentes utilizando tubería tipo Casing de despunte con el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, CCP, de 1995 y las cargas especiales que se utilizan en la empresa de exploración petrolera.

La empresa que realiza la exploración en estas zonas se beneficia con este proceso constructivo debido a que se requiere menos tiempo y costo. Además la comunidad del sector se beneficia al tener estas vías de acceso ya que pueden transportar sus productos agrícolas, ganadería, bovinos, entre otros. También se contribuye con el medio ambiente ya que en cierta medida se están utilizando materiales de segunda mano. Al tener estas vías de acceso con este tipo de estructura se aumenta el progreso de la región. Una vez finalizado este proyecto la población de esta zona se beneficia en sus recorridos en menos tiempo destinado hacia las zonas urbanas o rurales alejadas al sitio donde habitan.

Es bueno mencionar que la tubería rechazada que se encuentra en lugares de almacenamiento destinado por las locaciones petroleras, está expuesta a la contaminación visual, problemas iniciales de corrosión e impacto ambiental. El objetivo es utilizar estas tuberías petroleras para el diseño y construcción de puentes vehiculares, dándole un beneficio no solo para el transporte de materiales o personal que requiera las locaciones petrole-

ras, sino como corredor vial de las comunidades que habitan en el sector.

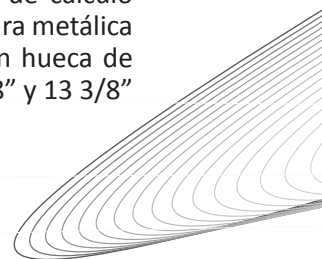
Las tuberías utilizadas de acuerdo a nuestro análisis desde el punto de vista de deflexiones, son aquellas que tengan longitudes hasta 8 m., diámetros de 4" a 13" y espesores de 3/8" a 5/8". Con lo anterior y según los esfuerzos máximos de estas tuberías con cargas de 52 ton, aplicando el diseño con el método LRFD y la ayuda del software SAP2000, se obtuvo el modelamiento más óptimo para la construcción del puente vehicular.

Con las características físicas de las tuberías disponibles o rechazadas por las locaciones petroleras, y efectuando varias iteraciones o modelamientos según las deflexiones máximas y mínimas dadas por el código, se cumplió con los objetivos estipulados adquiriendo una configuración típica para la construcción de un puente vehicular. Durante las iteraciones para obtener el modelo típico y óptimo, sería como limitante que para el caso que se debe utilizar tuberías petroleras tipo Casing de despunte con luces máximo de 8 m. Además, por razones de costos no fue posible efectuar un banco de pruebas en el sitio donde se proyecta construir un puente vehicular.

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

Se recopiló información en la empresa Copco S.A. que construye este tipo puentes para la industria petrolera, encontrando modelos constructivos para los cuales se revisó si cumplen con los criterios de diseño exigidos por el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes.

Las siguientes son las memorias de cálculo del diseño de puentes en estructura metálica con tubería petrolera con sección hueca de diámetros 4 1/2", 5 1/2", 7 5/8", 9 5/8" y 13 3/8" tipo Casing.



A. Descripción de la Estructura

Se trata de un puente de una (1) luz de ocho (8) metros y un ancho de tablero de 4.2 metros, conformado por una placa de concreto reforzado tipo Metaldeck de 3" para el primer caso. La lámina tipo Metaldeck está unida con las vigas ubicadas en sentido paralelo al tráfico simplemente apoyadas con conectores de cortante. Para el segundo caso una placa conformada por estructura de entablado en madera.

La infraestructura dice Herrera Mantilla, J. (1996) está conformada por dos (2) pórticos metálicos por cada costado con sección trapezoidal en la vista longitudinal, los cuales soportan las vigas longitudinales o principales y los respectivos tableros antes mencionados.

B. Información Básica

1) Geometría y especificaciones del material. La información fue suministrada por Copco S.A. y se resume en la tabla I:

**TABLA I.
GEOMETRÍA DE LA TUBERÍA UTILIZADA**

DIÁMETRO EXTERNO		PESO	DIÁMETRO INTERNO		ESESOR PARED		ÁREA EXTERNA		ÁREA INTERNA		ÁREA SECCIÓN	
(in)	(cm)	(lb/ft)	(in)	(cm)	(in)	(cm)	(in ²)	(cm ²)	(in ²)	(cm ²)	(in ²)	(cm ²)
4" 1/2"	114.30	11.6	4.000	101.60	0.250	6.35	15.90	10,258.04	12.57	8,109.66	3.33	2,148.38
5" 1/2"	139.70	17.0	4.892	124.26	0.304	7.72	23.75	15,322.55	18.80	12,129.01	4.96	3,199.99
7" 5/8"	193.68	29.7	6.875	174.63	0.375	9.53	45.66	29,458.01	37.12	23,948.34	8.54	5,509.67
9" 5/8"	244.48	40.0	8.835	224.41	0.395	10.03	72.75	46,935.39	61.31	39,554.76	11.45	7,387.08
13" 3/8"	339.73	61.0	12.359	313.92	0.430	10.92	140.50	90,644.98	119.97	77,399.85	20.53	13,245.13

Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

C. Normas de Diseño

Para el diseño de los elementos, se llevaron a cabo las recomendaciones del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (1995), el cual se denomina "C.C.P." y las especificaciones sobre el método de diseño a última resistencia para estructuras metálicas (LRFD), dadas por la AISI (American Institute of Steel Construction).

D. Materiales

Las características de los materiales empleados en el diseño, se resumen a continuación:

- Concreto, Placa: $f'c=210$ kgf/cm². (21 MPa); Peso unitario: = 2.4 tonf/m³, y Módulo de elasticidad, $E_c = 181000$ kg/cm²
- Acero de refuerzo, $f_y=4200$ kgf/cm²; Peso unitario: $\gamma_s= 7.85$ tonf/m³, y Módulo de elasticidad: $E_s = 2E5$ MPa

E. Parámetros de análisis y diseño

Cargas

Las cargas empleadas para el análisis y diseño de la estructura según Trujillo Orozco, J. (1993) son las siguientes:

- **Cargas muertas (D)**

Se incluye el peso propio de los elementos, empleando un peso unitario del concreto de 2.4 tonf/m³ y del acero de 7.85 tonf/m³.

- **Carga viva (L)**

De acuerdo con el Código Colombiano de Puentes (1995), se emplea el camión de diseño C40-95, el cual utiliza una carga de 40 toneladas. Teniendo en cuenta las sugerencias realizadas por la empresa Copco S.A., se modifican las cargas en el diseño del sistema, incrementándolas a 52 toneladas, las cuales se aplicaron 20 toneladas en los dos (2) ejes posteriores y 12 toneladas en el primer eje, pero teniendo en cuenta la misma separación del C4095.

• **Impacto (I)**

El Código Colombiano de Puentes (1995), especifica que la carga viva de los vehículos debe incrementarse en los elementos estructurales de la superestructura y en la infraestructura, que están por encima del suelo que soportan la superestructura, con los efectos dinámicos, vibratorios y de impacto.

• **Sismo en estructura (EQ)**

Siguiendo las indicaciones del Código Colombiano de Puentes (1995), se empleó el espec-

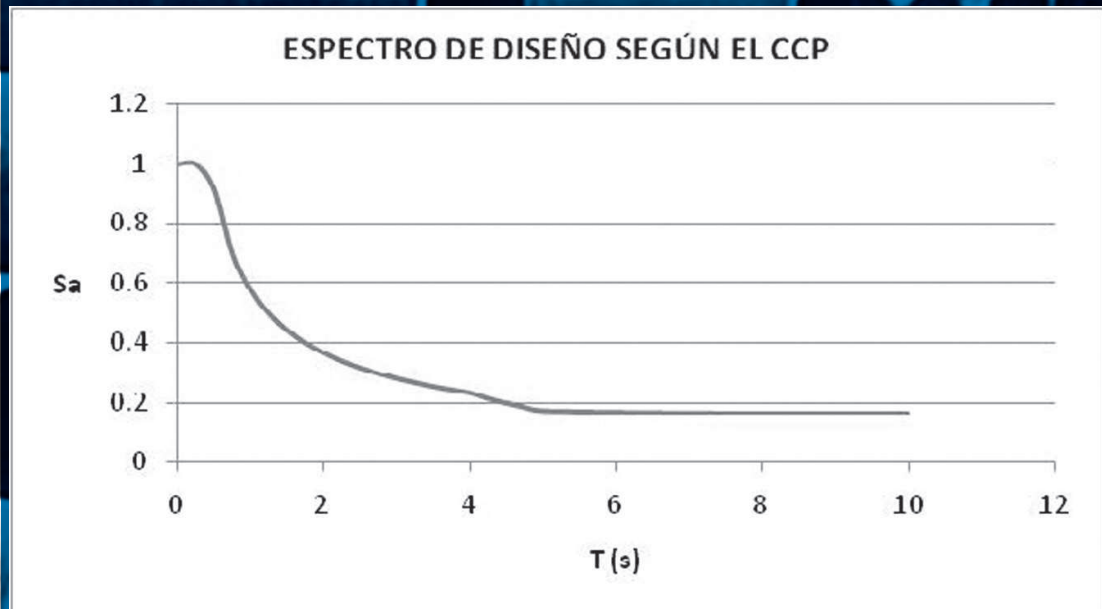
tro de diseño presentado en la Tabla II con los parámetros T(s) (período de vibración del sistema elástico, en segundos) y Sa (valor del espectro en aceleraciones de diseño para un período de vibración dado). Lo anterior es calculado a partir de los parámetros sísmicos asumidos, teniendo en cuenta la clase de importancia (I) y un coeficiente de aceleración sísmico de 0.4. Se utilizó una región 9, ello con el fin de proporcionar condiciones críticas de sismo al diseño, y se realiza un comportamiento sísmico de tipo de perfil D.

TABLA II.
ESPECTRO DE DISEÑO SEGÚN C.C.P. SECCIÓN

T(s)	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75
Sa	1.000	1.000	0.914	0.698	0.576	0.496	0.440	0.397	0.363	0.335	0.313	0.293
T(s)	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	7.50	10.00	
Sa	0.277	0.263	0.250	0.239	0.229	0.209	0.194	0.180	0.168	0.160	0.160	

Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

ILUSTRACIÓN 1
ESPECTRO DE DISEÑO



Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

F. Combinaciones de carga

Debido a las condiciones del diseño, las características propias de la estructura y de la magnitud de las cargas aplicadas, sólo se consideraron las siguientes combinaciones de carga de acuerdo con el CCP:

En condiciones últimas

Grupo 1 = 1.3 (D + 1.67 L * I) ; Grupo 7 = 1 (D + EQ)

G. Modelo de análisis

Para determinar las solicitaciones en los diferentes elementos que conforman la estructura, se empleó el programa SAP2000 para elaborar un modelo de análisis. Los modelos se denominaron vigas 13, vigas 9 y vigas 7, relacionando la utilización de vigas en el sentido paralelo al tráfico según los diámetros utilizados respectivamente y pórtico 4, 5 y 7 a las secciones utilizadas en los elementos de la infraestructura, teniendo en cuenta los diámetros respectivos. Estos elementos se modelaron con elementos tipo Frame (división de un elemento de la estructura en varias divisiones).

La placa de concreto reforzado se modeló con elementos tipo Shell, considerando los respectivos espesores y las características de los materiales. Para garantizar la estabilidad de la estructura, las uniones de los elementos se modelaron como nudos soldados, los cuales asimilan el comportamiento monolítico de la estructura por medio de Constraint – Weld.

Para los apoyos, se idealiza la estructura empotrada en el suelo de fundación, asumiendo nudos con restricciones en las diferentes direcciones de los movimientos horizontales como rotacionales. Más adelante se presentan varios esquemas con la geometría y las cargas aplicadas al modelo de análisis.

H. Condiciones de Carga

Las condiciones de carga empleadas en el modelo se resumen a continuación.

1. **Condición propia**

Corresponde al peso propio de los elementos, el cual fue calculado por el programa.

2. **Condición viva**

El efecto de la carga viva. Esta condición se emplea para determinar las máximas solicitaciones en la cimentación (Ralph, Peck, Hanson, Walter y Thornbun, 1992). Teniendo en cuenta que la luz del puente es menor a

8 metros, sólo existen dos (2) posibilidades de solicitaciones: que dentro del puente se presente uno de los ejes más cargados y que dentro del puente se presenten los dos (2) ejes más cargados.

3. **Sismo**

El análisis se realizó a partir del espectro presentado en el capítulo anterior. Para este caso, se tiene las siguientes condiciones de carga en sismo:

- SismoX0 (EQx): corresponde al sismo aplicado al 100% de su magnitud en sentido transversal del puente, es decir, a lo largo del eje X del modelo; SismoY0 (EQy): corresponde al sismo aplicado al 100% de su magnitud en sentido longitudinal del puente, es decir, a lo largo del eje Y del modelo.
- SismoX1 (EQx+0.3EQy): corresponde al efecto por el sismo aplicado al 100% de su magnitud a lo largo del eje X y el 30% de su magnitud a lo largo del eje Y del modelo; SismoY1 (0.3EQx+EQy): corresponde al efecto por el sismo aplicado al 30% de su magnitud a lo largo del eje X y el 100% de su magnitud a lo largo del eje Y del modelo.

I. Combinaciones de carga

Para determinar los esfuerzos en los elementos producidos por las solicitaciones de las cargas aplicadas, se realizaron las siguientes combinaciones de carga: 1) Combo 1: 1.3 (D + (1.67 L * I)); 2) Combo 2: D + SismoX0; 3) Combo 3: D + SismoX1; 4) Combo 4: D + SismoY0 y 5) Combo 5: D + SismoY1.

J. Diseño de los elementos

1. **Modelación de la placa**

La placa dentro del modelo, se generó con diferentes elementos Shell, en la cual se asignó la carga muerta como distribuida por metro cuadrado y la viva como distribuida por metro en la sección transversal de 20 toneladas, con el fin de generar los máximos esfuerzos sobre el tablero.

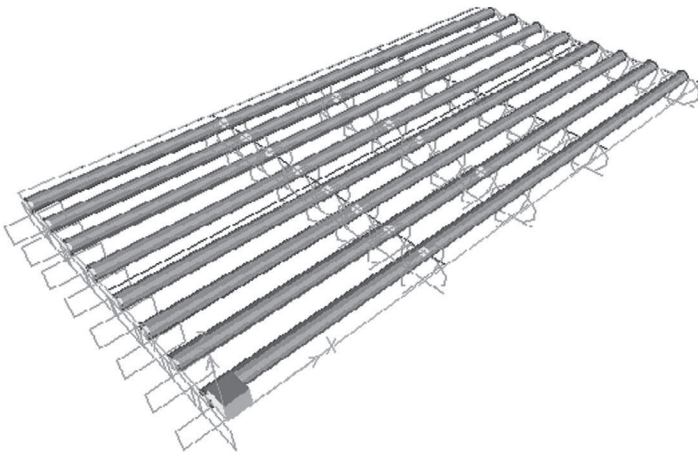
2. Modelación de las vigas

El análisis del modelo se realizó como una estructura simplemente apoyada, teniendo en cuenta que las cargas transmitidas por el tablero son distribuidas a lo largo de la longitud de las vigas. Se tomaron los valores de espesores correspondientes a los promedios especificados por las propiedades de los tubos metálicos.

a. Modelación de las vigas 7" 5/8"

Para las vigas de 7" 5/8" teniendo en cuenta como dirección de ubicación las vigas de sección transversal (ver modelo), se debe localizar 8 vigas, con luces de voladizos de 0.30 metros y luz entre ejes de vigas de 0.50 m. Las tuberías a utilizar tienen una longitud máxima de 8 m y son escogidas de acuerdo a los parámetros físico-químicos presentes en el lugar de almacenamiento.

ILUSTRACIÓN 2.
ESQUEMA DE VIGAS DE 7" 5/8"

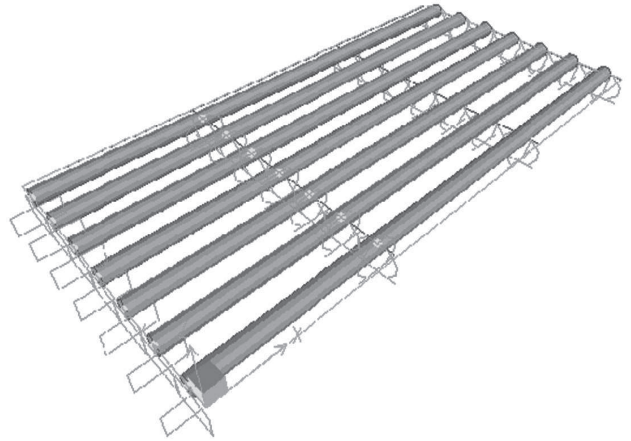


Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

b. Modelación de las vigas 9" 5/8"

Para las vigas de 9" 5/8", se deben colocar 7 vigas con una luz en el voladizo de 0.30 metros en los dos costados y luces centrales a ejes de vigas de 0.60 metros. Las tuberías a utilizar tienen una longitud máxima de 8 m. y son escogidas de acuerdo a los parámetros físico-químicos presentes en el lugar de almacenamiento.

ILUSTRACIÓN 3.
ESQUEMA DE VIGAS DE 9" 5/8"

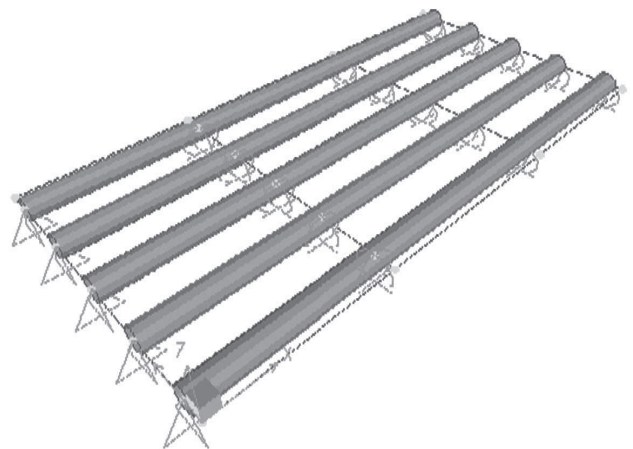


Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

c. Modelación de las vigas 13 3/8"

La localización de las vigas debe hacerse para una luz en el voladizo de 0.30 metros y luces centrales a ejes de vigas de 0.90 metros. Las tuberías a utilizar tienen una longitud máxima de 8 m. y son escogidas de acuerdo a los parámetros físico-químicos presentes en el lugar de almacenamiento.

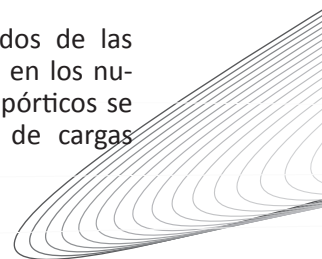
ILUSTRACIÓN 4.
ESQUEMA DE VIGAS DE 13" 3/8"



Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

K. Modelación de los pórticos

Utilizando los resultados obtenidos de las vigas por transferencia de cargas en los nudos establecidos para tal fin, los pórticos se modelaron con una asignación de cargas



puntuales y se determinaron los máximos esfuerzos en cada elemento que integra el pórtico.

De esta forma, el diseño de los elementos se simplifica a la comparación de los esfuerzos producidos por las cargas puntuales comparados con los esfuerzos ofrecidos por la capacidad de la sección y las condiciones de apoyo de los mismos.

Las uniones de los elementos se modelaron con uniones soldadas tipo Constraint – Weld, los cuales proporcionan uniformidad de la estructura y una adecuada transferencia de cargas y que ésta se comporte monolíticamente.

Se utilizó como sección de diseño, tubería de 5" 1/2" y 7" 5/8" de diámetro, teniendo en cuenta que para secciones de mayor diámetro, las condiciones de hincado en campo presentan mayor dificultad. Los pórticos se modelaron como una estructura monolítica, con elementos de arriostramiento diagonales de la misma sección que proporciona rigidez en la estructura.

a. Modelación de pórticos de tubería 4" 1/2". Se realizó un modelo, que contiene el diseño de la estructura como pórticos como una estructura de forma trapezoidal que incluye los dos apoyos.

b. Modelación de pórticos de tubería 5" 1/2". Se llevan a cabo dos (2) modelos; el primero contiene el diseño de la estructura como un pórtico independiente en cada apoyo, con elementos de apoyo superiores, para ofrecer mayor longitud de soporte a las vigas longitudinales, y el segundo como una estructura de forma trapezoidal que incluye los dos apoyos.

ILUSTRACIÓN 6 MODELO DE PÓRTICO INDEPENDIENTE DE 5" 1/2"

Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

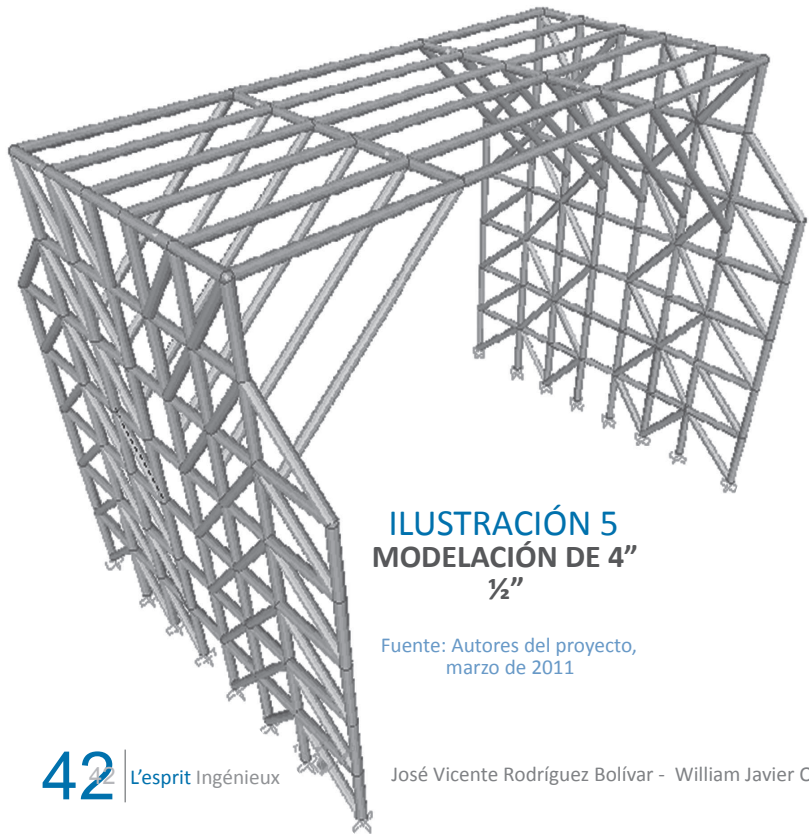
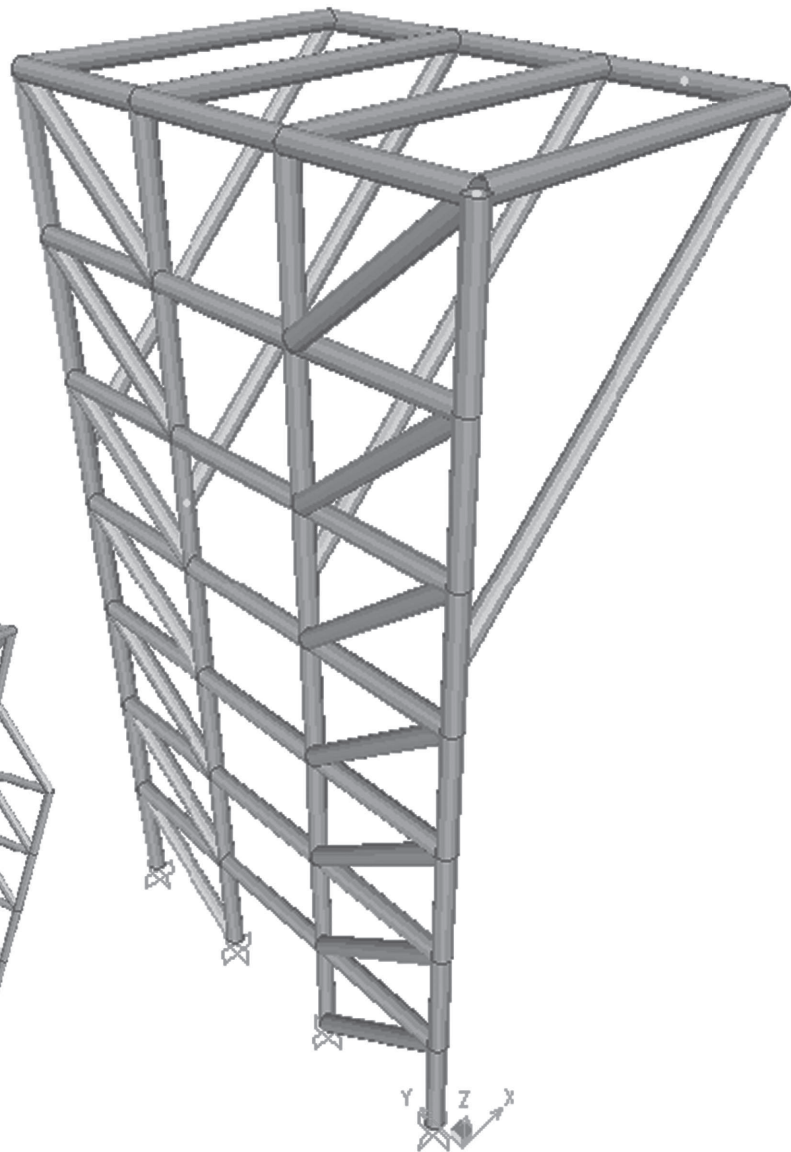


ILUSTRACIÓN 5 MODELACIÓN DE 4" 1/2"

Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

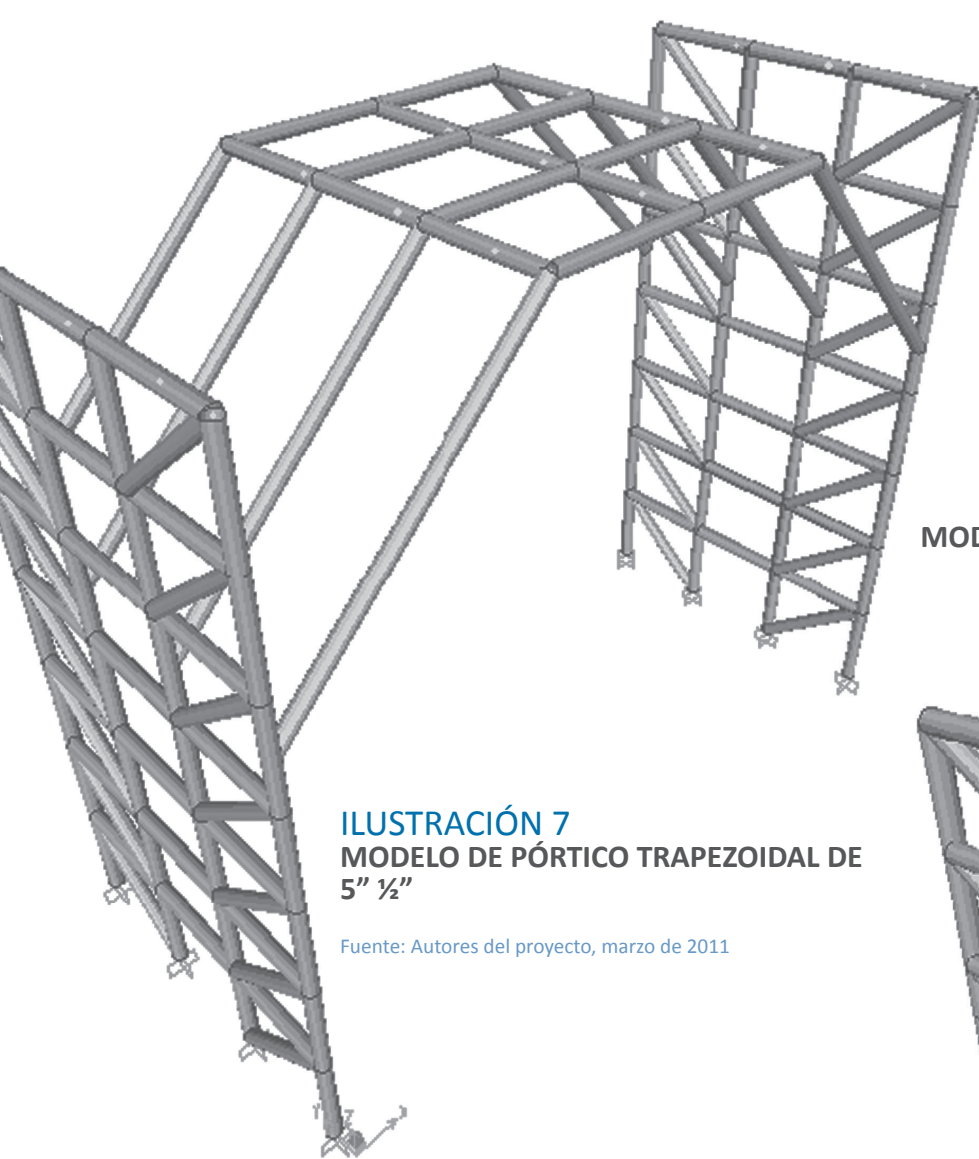
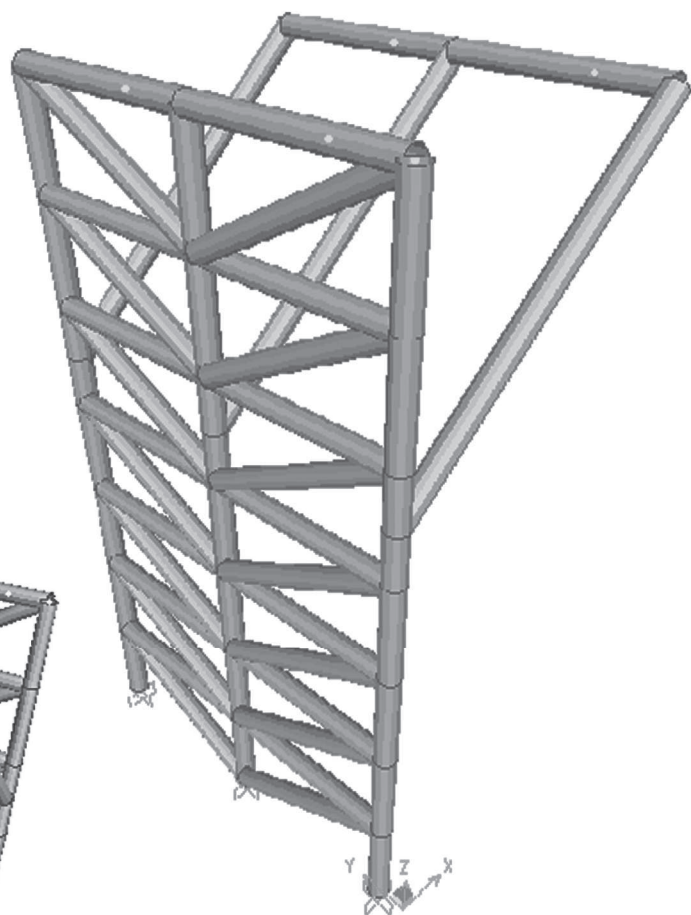


ILUSTRACIÓN 7
MODELO DE PÓRTICO TRAPEZOIDAL DE 5" 1/2"

Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

ILUSTRACIÓN 9
MODELO DE PÓRTICO INDEPENDIENTE DE 7" 5/8"



Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

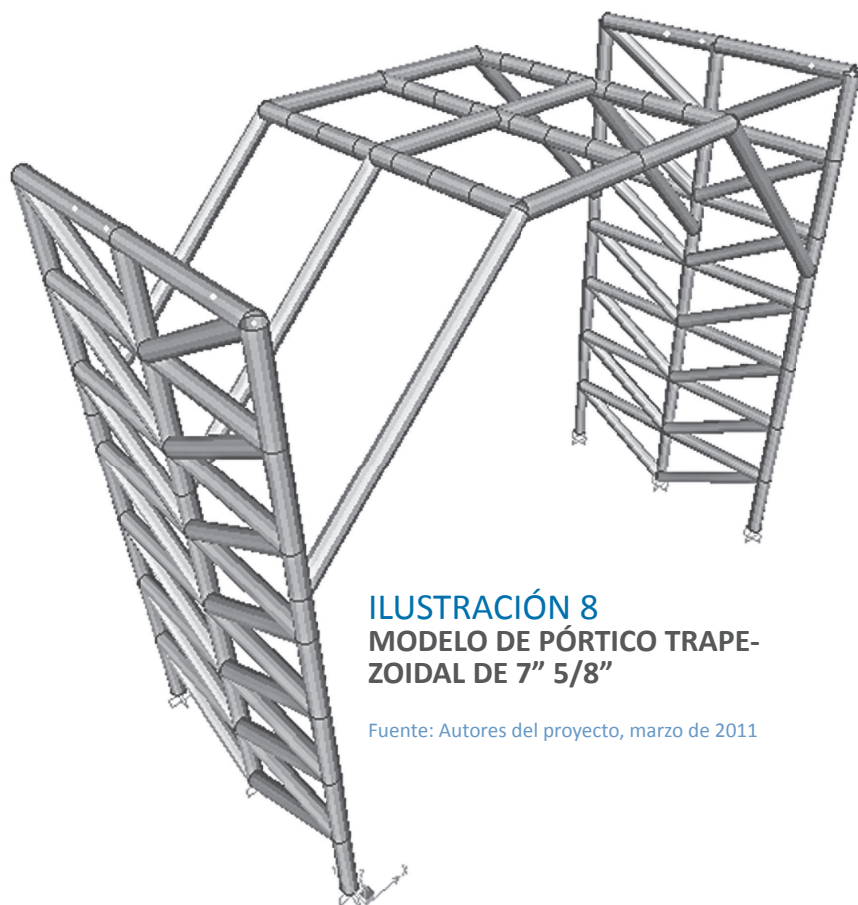
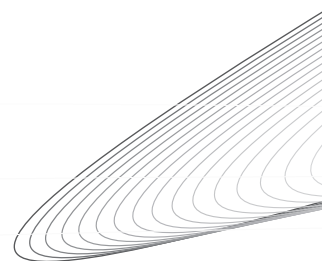


ILUSTRACIÓN 8
MODELO DE PÓRTICO TRAPEZOIDAL DE 7" 5/8"

Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011



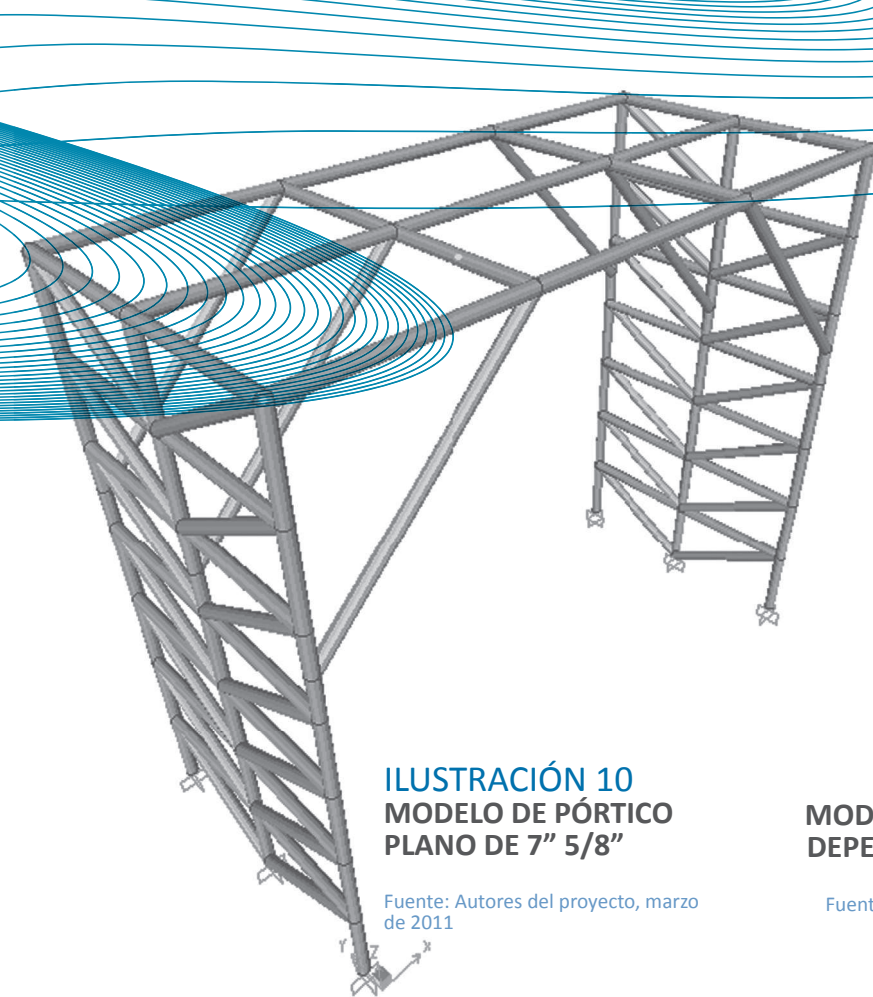


ILUSTRACIÓN 10
MODELO DE PÓRTICO
PLANO DE 7" 5/8"

Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

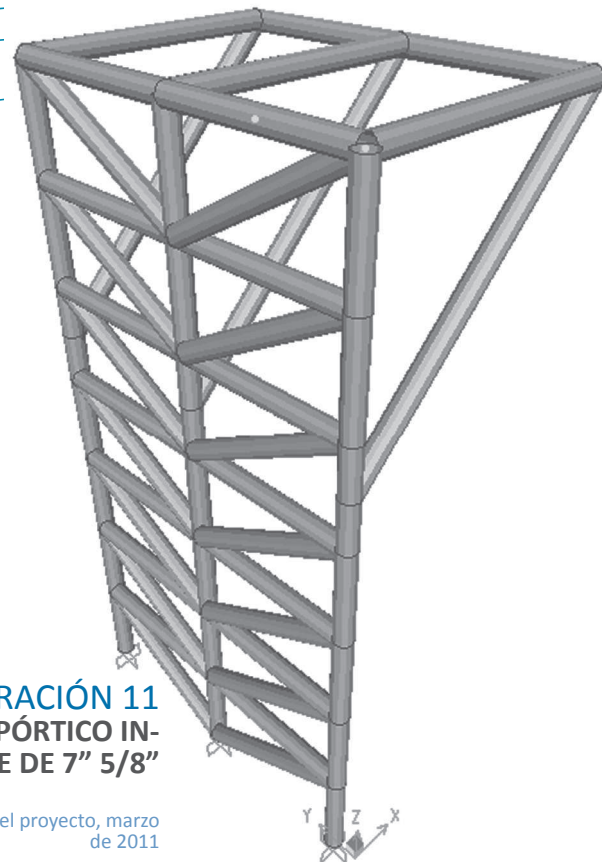


ILUSTRACIÓN 11
MODELO DE PÓRTICO IN-
DEPENDIENTE DE 7" 5/8"

Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

L. Resultados

1. Cortantes y momentos de diseño

Los resultados de los cortantes y momentos de los elementos más críticos, se resumen en la siguiente tabla:

TABLA III.
RELACIÓN DE CORTANTES, MOMENTOS Y AXIALES MÁXIMOS

ELEMENTO	CORTANTES		MOMENTOS		AXIAL		
	V_u (T)	ΦV_n (T)	M_u (T*m)	ΦM_n (T*m)	V_u (T)	ΦP_{nc} (T)	ΦP_{nt} (T)
Vigas 7 5/8"	13.84	62.57	11.19	12.21	0.00	53.78	208.21
Vigas 9 5/8"	14.72	83.64	13.11	20.80	0.00	114.95	278.47
Vigas 13 3/8"	31.56	127.77	28.11	44.56	0.00	263.76	425.60
Pórticos 4 1/2"	2.08	28.15	2.38	3.18	-4.53	78.85	93.53
Pórticos 5 1/2"	1.53	36.39	3.40	5.00	2.57	68.67	121.00
Pórticos 7 5/8"	3.20	62.57	10.47	12.21	5.88	128.60	208.20

Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, las cargas aplicadas en la superestructura, solicita en la mayor proporción de la capacidad de los elementos a momentos flexionantes, por tal motivo, es importante el papel que desempeñan los elementos transversales de

los pórticos en la reducción de las deflexiones.

De acuerdo al modelamiento del puente tipo se obtuvieron las especificaciones técnicas del material que son las siguientes:

Se trata de tubería de revestimiento utilizada en la extracción de hidrocarburos como gas y petróleo en pozos de exploración o de producción, teniendo en cuenta las normas ASTM A 53. En este estudio se tomó como base las más usadas en el medio denominada API grado S-135, cuyas propiedades son las siguientes:

- Módulo de elasticidad:
240.000 N/mm²
- Esfuerzo de fluencia:
135.000 psi = 930 Mpa
- Resistencia última:
155.000 psi = 1070 Mpa

Las características últimas de la tubería, después de su utilización tienen una pérdida entre el 10 y el 25% de resistencia (Leal, D; Jiménez, W, & Salvador, A, 2007). Además, se sabe que por la clase de aleación y su alto contenido de carbono el material tiende a comportarse de manera frágil cuando se sobrepasa una resistencia de más del 70%, por lo tanto, se trabajó con base en esta hipótesis y para asegurar que cuando se realice una estructura como puentes vehiculares se estén cumpliendo con las recomendaciones hechas por el código colombiano de diseño sísmico de puentes, 1995.

Para obtener los resultados se modeló con el programa SAP V.14, comprobando los resultados de diseño con el método del LRFD de 1999, ya que en el código colombiano de diseño sísmico de puentes en el título A.1.1.3 recomienda su utilización. Además se compararon con las normas establecidas por el comité de la AIS -200, encargado de preparar el "Código Colombiano de Puentes".

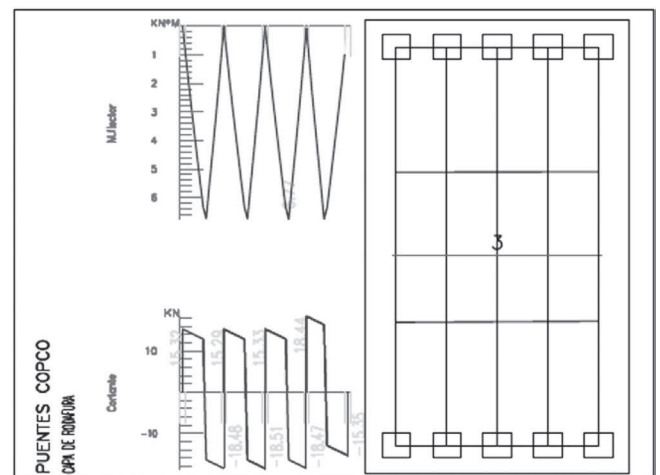
El modelamiento se realizó en dos etapas, ya que la superestructura del puente está conformada por vigas de tubería circular de diámetros entre 5 ½" y 13 3/8" tipo API de grado S-135, sobre las cuales descansa una placa de concreto de 20 cm. de espesor soportada por placas de Steel deck.

Se contempló como superficie de rodadura, una placa de concreto reforzado mediante el sistema de Metaldeck, la cual teniendo en cuenta el sistema estructural utilizado, se convierte en la mejor alternativa tanto en la construcción como en el funcionamiento.

Este sistema presenta varias ventajas como mayor seguridad y facilidad en su instalación, sustituye la utilización de formaleta, sirve como refuerzo por momento positivo, disminuye los tiempos en obra debido a la sencillez y limpieza del proceso constructivo y funciona como plataforma de trabajo durante el proceso de instalación, permitiendo el tránsito del personal de la obra.

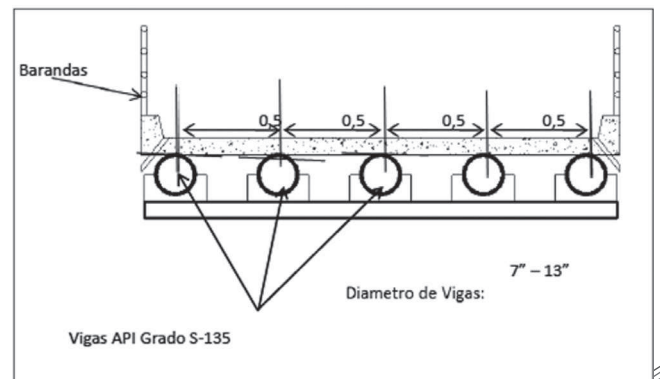
En la ilustración 12, se muestran los diagramas y momentos del diseño de la placa, teniendo en cuenta que se tomó como referencia la placa sobre vigas de 13 3/8", la cual es la más crítica por tener la mayor luz de cálculo.

ILUSTRACIÓN 12
ESFUERZOS DE LA PLACA DE
STEEL DECK



Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

ILUSTRACIÓN 13
CORTE TRANSVERSAL DE LA
SUPERESTRUCTURA



Fuente: Autores del proyecto, marzo de 2011

La máxima luz permisible con los diámetros disponibles es de 8 m. donde se obtuvo una deflexión máxima aceptable de acuerdo con lo permitido en la norma. La deflexión máxima se presenta en la parte central de las vigas de diámetro 7 5/8" con un valor de 0.0175m y teniendo en cuenta que el código colombiano de diseño sísmico de puentes 1995, dice que la deflexión depende de la luz del puente se obtuvo y no debe superar a $L/400 = 0.02m$. Se cumple esta condición.

El número de vigas necesarias para el puente tipo, en una luz de 8 ms, es de 8 tubos de diámetro de 12" y espesor de 7/8". Se llevó a cabo una combinación de tubos con diferentes diámetros disponibles donde se obtuvieron deflexiones aceptables de acuerdo a la permitida en la norma. De acuerdo a la modelación realizada se logró llegar a una luz de 8 mts con las combinaciones de tubos con diferentes diámetros disponibles (6" a 13") y espesores de 3/8" a 5/8". Para luces de 8 m es necesario arriostrar la superestructura con elementos transversales y estos a su vez con elementos diagonales a las pilas para rigidizar la estructura y obtener deflexiones permisibles.

Al comparar los resultados con el diseño y construcción de puentes en concreto se obtuvo que este tipo de puentes vehiculares con tubería petrolera, se puede utilizar en todo el territorio colombiano, ya que se aplicaron los parámetros máximos de diseño según el código colombiano de puentes, como también la norma sismo resistente NSR-10 2010, título F en el aspecto sísmico. Desde el punto de vista de capacidad portante, varía según el mapa sísmico, tipo de suelo e importancia.

La carga utilizada es mayor a las cargas máximas permitidas según el código de puentes,

pero debido a la utilización de tubos de diferentes diámetros, la deflexión es mínima con respecto a la máxima permitida por el código colombiano de diseño sísmico de puentes de 1995.

Según los resultados se puede decir que es posible el aprovechamiento de estos puentes tanto para uso de tránsito comercial, de pasajeros y particular. Es bueno mencionar que el tiempo de construcción de puentes vehiculares con tubería petrolera es más práctico, rápido, en un tiempo máximo de dos (2) meses con respecto a la construcción de puentes de concreto reforzado ya que el tiempo de ejecución puede superar los seis (6) meses para puentes de hasta 8 m. de luz.

El tipo de puente vehicular con tubería petrolera más acorde según las condiciones de deflexiones máximas, solicitaciones de carga, superestructura, infraestructura y cargas de diseño, con respecto a lo exigido en la norma sismo resistente NSR-10 título F 2010, como el código colombiano de puentes, son puentes de luces de 8 m. con combinaciones de tubos con diferentes diámetros disponibles (6" a 13") y espesores de 3/8" a 5/8", con arriostamientos con elementos transversales en la superestructura y diagonales a las pilas para rigidizarla.

En la actualidad el departamento con mayor porcentaje de construcción de puentes con tubería petrolera es Casanare. Aunque no se tienen registros de todos los proyectos ejecutados se sabe que en este año se están construyendo más de 70 puentes, para vías rurales, con capacidad de 40 ton. y anchos de 4.3m. Esta información fue obtenida del Informe de Gestión Segundo Semestre de 2010, del Departamento de Casanare.



III. CONCLUSIONES

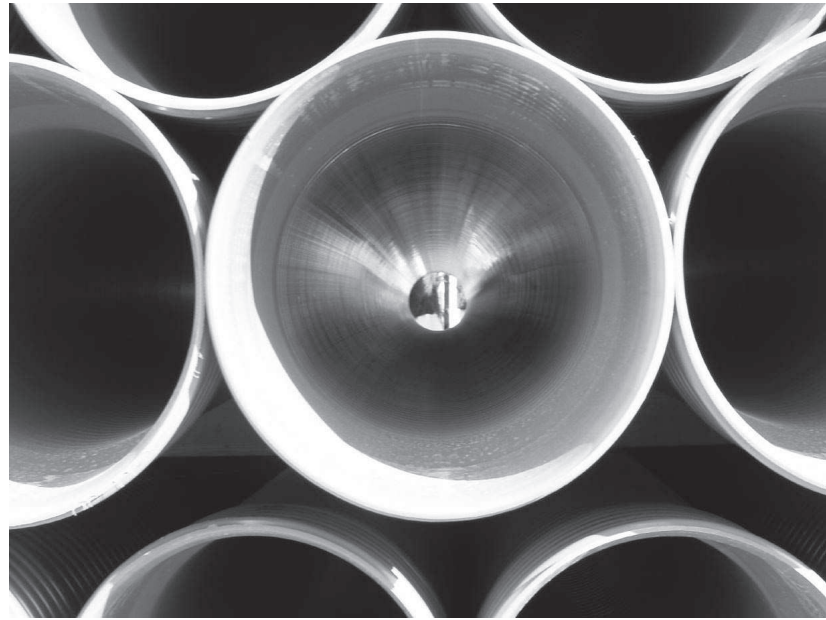
A. La máxima luz obtenida con la configuración propuesta es hasta de 8 ms; es posible trabajar con longitudes más grandes pero en tramos no mayores a 8 ms, lo cual solo se debe realizar en zonas donde no se cause una interrupción al cauce natural del río o donde por las condiciones topográficas del terreno no se requiera realizar un estudio hidrológico especializado.

B. Se trabajó con un factor de seguridad, disminuyendo en un 20% los valores de resistencia última y esfuerzo de fluencia para garantizar que la estructura trabaje siempre en el rango elástico, ya que es sabido que el acero con mayor porcentaje de carbón es menos dúctil que el acero de construcción (A36 y ASTM A500). De acuerdo a la modelación se cumplieron los requerimientos del código colombiano de diseño sísmico.

C. Recopilando información sobre el tema de puentes en tubería petrolera se encontró una monografía en la universidad de La Salle en el año 2007, en la cual se hicieron ensayos a la tubería utilizada dando un porcentaje de disminución en las propiedades físicas de aproximadamente un 20%, realizándose la modelación con este factor de seguridad. Se concluye que es posible utilizar la tubería de desperdicio para realizar estas estructuras de forma segura en puentes vehiculares de un carril y luces máximas de 8m. en todo el territorio colombiano.

D. La deflexión máxima con la combinación de tubos de diferentes diámetros disponibles es menor a la máxima permitida por el código colombiano de diseño sísmico de puentes de 1995; por esta razón se estaría dando estricto cumplimiento a la reglamentación de diseño en Colombia para cualquier zona del país.

E. El diámetro de la tubería petrolera de despunte tipo Casing que mejor comportamiento físico presenta ante las solicitaciones de carga es de 8" y espesor de 3/8". Las empresas encargadas de la construcción de este tipo de puentes en Colombia aseguran que tienen en almacenamiento una cantidad

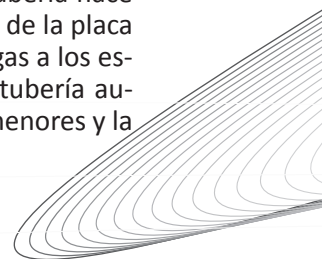


importante de tubería de estas dimensiones, por lo tanto se puede decir que los proyectos a corto tiempo son factibles y se cuenta con el material necesario para la construcción.

F. Para el diseño de las estructuras y la aplicación de la metodología LRFD es más práctico la utilización del software SAP-2000. Se obtuvo un modelo donde se recrearon las condiciones reales en construcción de este tipo de estructuras y ya se cuenta con una información base para seguir investigando sobre este tema.

G. Para garantizar que las vigas trabajen simplemente apoyadas es necesario colocar elementos sobre las pilas que permitan un desplazamiento horizontal por las vibraciones causadas por el tráfico vehicular. En la realidad esto se estaba realizando por medio de media luna soldada a los estribos de los puentes, garantizando que no se restrinja el movimiento horizontal. En la investigación se pudo comprobar la importancia de estos elementos y no se deben suspender en el proceso constructivo.

H. Para trabajar con tubería de diámetros mayores a 12" el proyecto no es viable técnicamente ni económicamente, ya que la distribución transversal de esta tubería hace ineficaz la transferencia de cargas de la placa en concreto a las vigas y de las vigas a los estribos. Además, el costo de esta tubería aumenta con relación a diámetros menores y la



existencia de este tipo de tubería es escasa en las zonas de exploración.

I. La cimentación de estos puentes vehiculares con tubería petrolera, son construidas con una cimentación tipo profunda (piloteaje), las cuales trabajan por fricción. El hincamiento de los tubos se realiza con una piloteadora hasta obtener condiciones de rechazo. Mediante la experiencia se puede decir que la profundidad máxima para producir estas condiciones es de 8mts.

J. De acuerdo a la modelación se obtuvo que las combinaciones de carga más desfavorables en este tipo de estructuras, son las que interfieren cargas vivas y de impacto, ya que se tiene un peso propio menor que en una

estructura convencional de concreto. Para rigidizar la estructura es necesario arriostrar el puente con elementos diagonales y evitar las deflexiones y movimientos laterales inducidos por un sismo.

K. Para la construcción de este tipo de puentes, se debe tener en cuenta, que solo es aplicable la utilización de estribos con tubería petrolera, en zonas donde no existan ríos o cauces naturales que alteren la estabilidad de la estructura, en cuanto a socavación y/o corrosión. En casos de presencia de estos cauces lo recomendable es el diseño y construcción de estribos en concreto reforzado.

IV. REFERENCIAS

Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Título F, Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Colombia, Ministerio de Transporte, (1995). Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Herrera, J. (1996). Puentes, Bogotá: Universidad Católica.

Leal, D; Jimenez, W, & Salvador, A. (2007). Tubería Petrolera... Recurso para la Construcción de Puentes, Tesis pregrado (Ingeniería Civil), Bogotá: Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería.

Trujillo, J, (1993). Diseño de puentes, Bucaramanga: Ediciones UIS Colombia.