

Puentes colgantes con calzada en concreto - Puente sobre el río Chinchiná -

Resumen de conferencias del Ingeniero Domenico Parma Marré.

1. INTRODUCCION

El presente artículo es una condensación de las diferentes conferencias que sobre el tema del diseño y construcción de puentes colgantes con calzada en concreto dictó el Ingo. Domenico Parma Marré durante los últimos tres años de su vida. Los métodos y cálculos por él planteados fueron la base de varios programas para computador que le permitieron concretar el diseño de la que fue su última obra, el Puente sobre el río Chinchiná distinguida durante el presente año con el Premio Nacional en Ingeniería otorgado por la Sociedad Colombiana de ingeniero y con el Premio Excelencia en Concreto, categoría Obras Civiles concedido por la Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ASOCRETO).

Se complementa el artículo con aportes del mismo Ingo. arma y del grupo de ingenieros que participaron en la ejecución del proyecto.

2. FILOSOFIA DEL DISEÑO

Los puentes que conocemos son en su gran mayoría estructuras conformadas por cables de acero de alta resistencia de diseño y construcción altamente sofisticada, más una estructura de calzada compuesta por grandes celosías y torres metálicas.

En puentes de grandes luces es muy importante el peso propio en el diseño y la formula TODO METALICO es probablemente la que mejor controla este estado de carga.

En nuestro medio, sin embargo, es de todos conocido el alto costo de las soluciones metálicas. Un estudio detallado nos ha permitido concluir que para luces modestas en este tipo de estructuras (entre 100 y 250 metros) el uso del concreto como materia prima no sólo es aceptable sino que puede presentar ventajas considerables tales como la utilización de materias primas netamente nacionales y una considerable reducción en los costos de mantenimiento.

En este puente de CONCRETO se tendría la estructura de calzada en concreto de refuerzo convencional y tensionado, las torres que normalmente son metálicas, serían columnas o pórticos de concreto reforzado y por último los cables serían

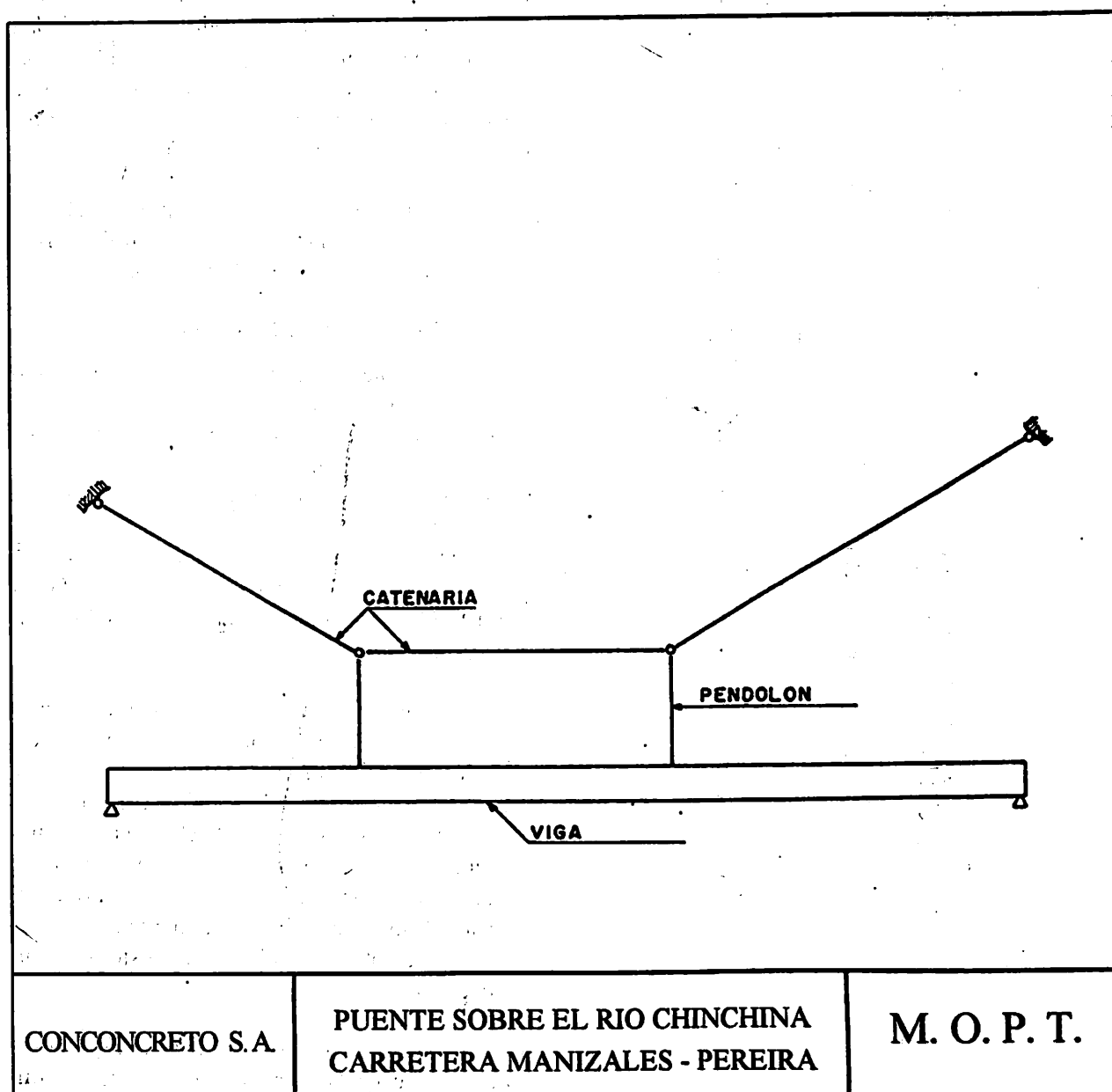
torones de tensionamiento de fabricación nacional debidamente tratados para evitar su corrosión.

El puente resultante es indudablemente más pesado que su equivalente TODO METALICO (Equivalente en su capacidad de carga viva). Sin embargo, es indudable que hay menor valor para las torres y calzada el cual compensaría el aumento que podría presentarse en los cables de catenaria y sus macizos de anclaje.

3. DISEÑO

Asumiendo transitoriamente que torres y macizos de anclaje configuran una estructura independiente, el puente colgante simple puede considerarse integrado por:

- Catenaria o estructura superior
- Pendolones o Estructura de Conexión
- Viga, Calzada o Estructura Inferior



La figura A esquematiza un modelo mínimo

En este caso el diseño en lo que a capacidad de carga se refiere no tendría ningún inconveniente.

La catenaria es en los puentes colgantes la estructura fundamental. Si se asume como una poligonal de fuerzas se presta a una investigación directa y muy fácil, determinando los esfuerzos de tracción que en ella actúan.

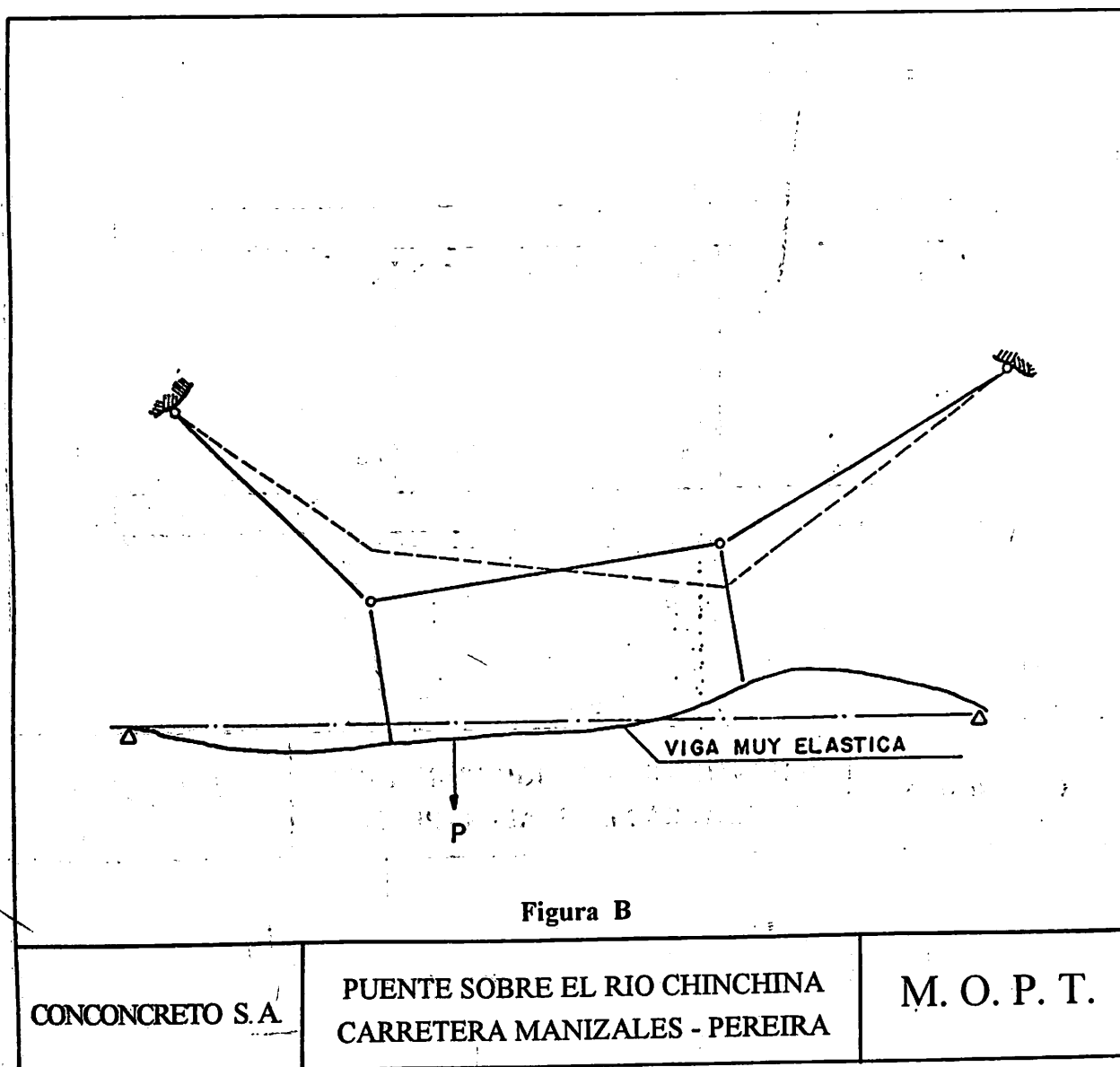
Pero un diseño para atender solo los requisitos de estabilidad de la catenaria, en el momento de estar sometido a cargas variables podría presentar deformaciones tan considerables que lo harían inaceptable.

Para evitar respuestas de este tipo es necesario y se deberá asignar a la viga una rigidez incrementada y debidamente calculada.

Se origina así el aspecto fundamental del diseño en puentes colgantes, o sea el hecho de tener que

asumir la estructura en su conjunto y resolver el problema de la interacción CATENARIA - VIGA.

Este problema presenta aspectos peculiares que lo diferencian de los casos habituales de interacción entre estructuras.



Considérese por ejemplo, el modelo esquematizado en la Figura C. Este caso es un caso convencional de interacción entre dos estructuras conectadas y mediante la aplicación de una carga P . Los pendolones desarrollan fuerzas de interacción X_a

y X_b , que serán fácilmente calculadas por medio de un par de ecuaciones simultaneas de compatibilidad de deformación; o sea un modelo clásico de comportamiento elástico.

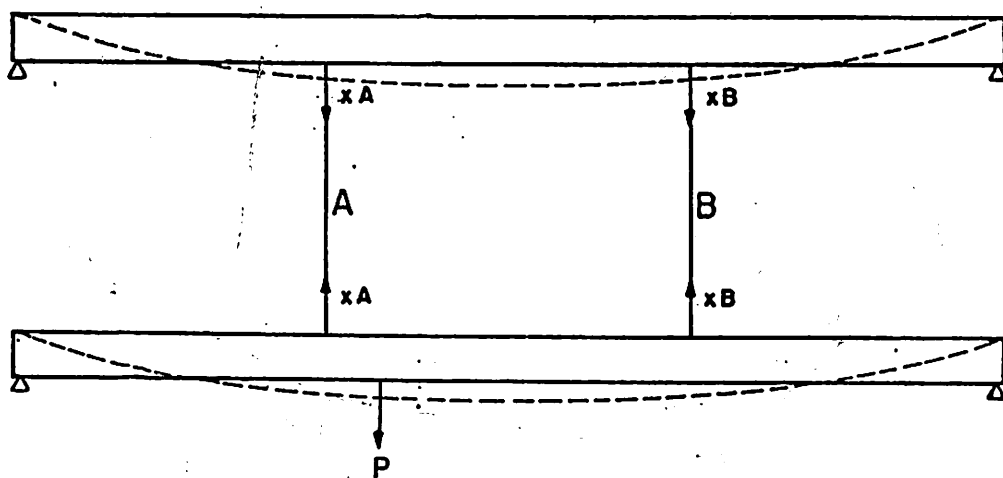


Figura C

CONCRETO S. A.

PUENTE SOBRE EL RIO CHINCHINA
CARRETERA MANIZALES - PEREIRA

M. O. P. T.

El modelo esquematizado en la Figura D. es la estructura objeto de este estudio. Ofrece una res-

puesta a al aplicación de la carga, bastante diferente al caso anterior..

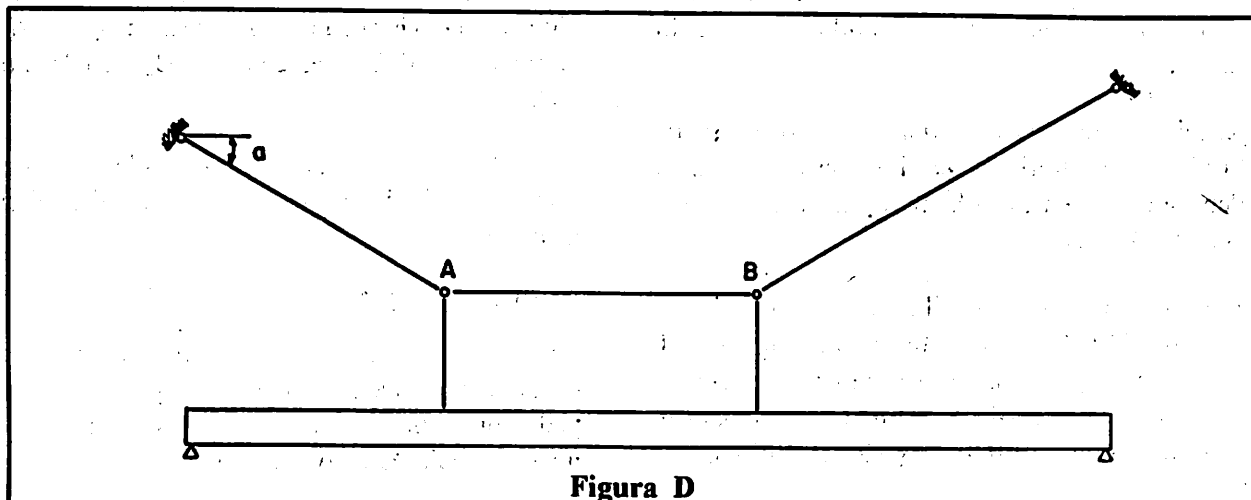


Figura D

CONCRETO S. A.

PUENTE SOBRE EL RIO CHINCHINA
CARRETERA MANIZALES - PEREIRA

M. O. P. T.

En efecto:

- Sean los nudos de la catenaria ubicados antes de aplicar la carga en A y B.
- Aplíquese la carga P
- La estructura asumirá una figura deformada semejante a la esquematizada en la Figura E, en la cual los nudos se han reducido en A_0 y B_0 .

Este movimiento es el resultado de:

- Un proceso de deformación elástica de la viga
- Un proceso de deformación elástica de la Catenaria
- De una modificación geométrica de la misma catenaria

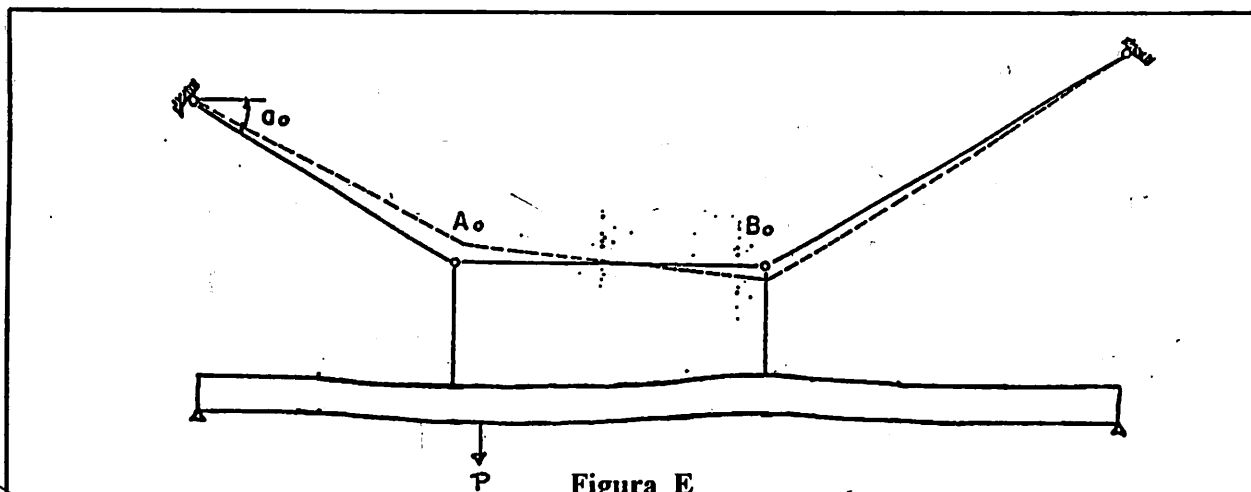


Figura E

CONCRETO S. A.

PUENTE SOBRE EL RIO CHINCHINA
CARRETERA MANIZALES - PEREIRA

M. O. P. T.

Las modificaciones de la figura son tales que la poligonal de fuerzas que resulta es bastante diferente a la que habría correspondido en el modelo inicial.

Resulta obvio pensar que por razones de compatibilidad y equilibrio la distribución de esfuerzos debe ser coherente con la nueva ubicación de A y B o sea A_o y B_o .

Así que mientras el caso ilustrado en la Figura C (VIGA - VIGA), se tenía un dato fijo que era el factor de proporcionalidad entre cargas y deformaciones, tal modo de operar no es válido para el caso de la Figura D (CATENARIA - VIGA).

Con todo lo anotado anteriormente se puede deducir que un procedimiento iterativo de cálculo será el apropiado para deducir A_o , B_o , una vez dados A,B y los demás parámetros del problema.

Así que de la posición A,B podemos pasar a otra A_1 , B_1 por medio de un procedimiento de cálculo que asume una distribución de esfuerzos según A,

B. Una vez determinada A_1 , B_1 , pasar a una figura A_2 , B_2 , calculando esfuerzos según A_1 , B_1 . Se sigue iterando hasta que se llegue a una figura A_u , B_u tal, que su diferencia con A_{u-1} , B_{u-1} sea despreciable.

Todas las consideraciones anteriores han orientado los procedimientos de cálculo que se describen a continuación.

4. PUENTE SIMPLE

Se denomina puente simple al representado en la Figura F integrado por una viga simplemente apoyada, torres, macizos y catenaria en lo que se conoce como figura convencional.

La estructura presenta una solo incógnita hiperestática independiente representada por la fuerza de la catenaria en cualquiera de sus tramos. En efecto, al suprimir un tramo cualquiera de la catenaria por ejemplo el 0-1 como ocurre en la Figura G la estructura presenta una figura isostática en la cual la viga responde a las cargas P como miembro simplemente apoyado.

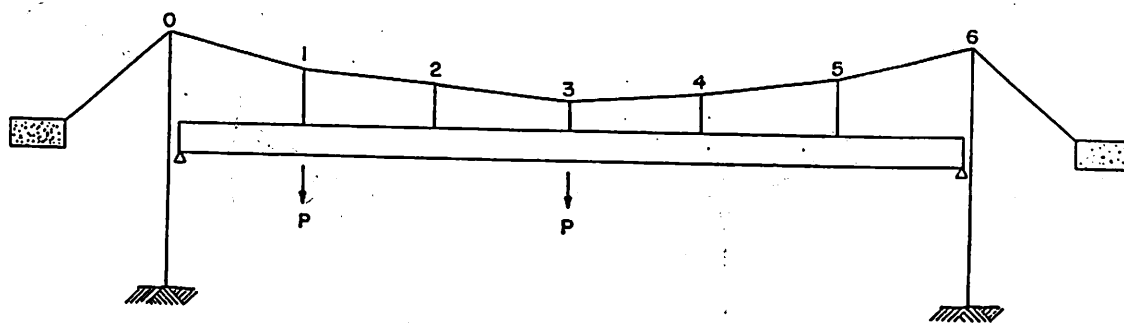
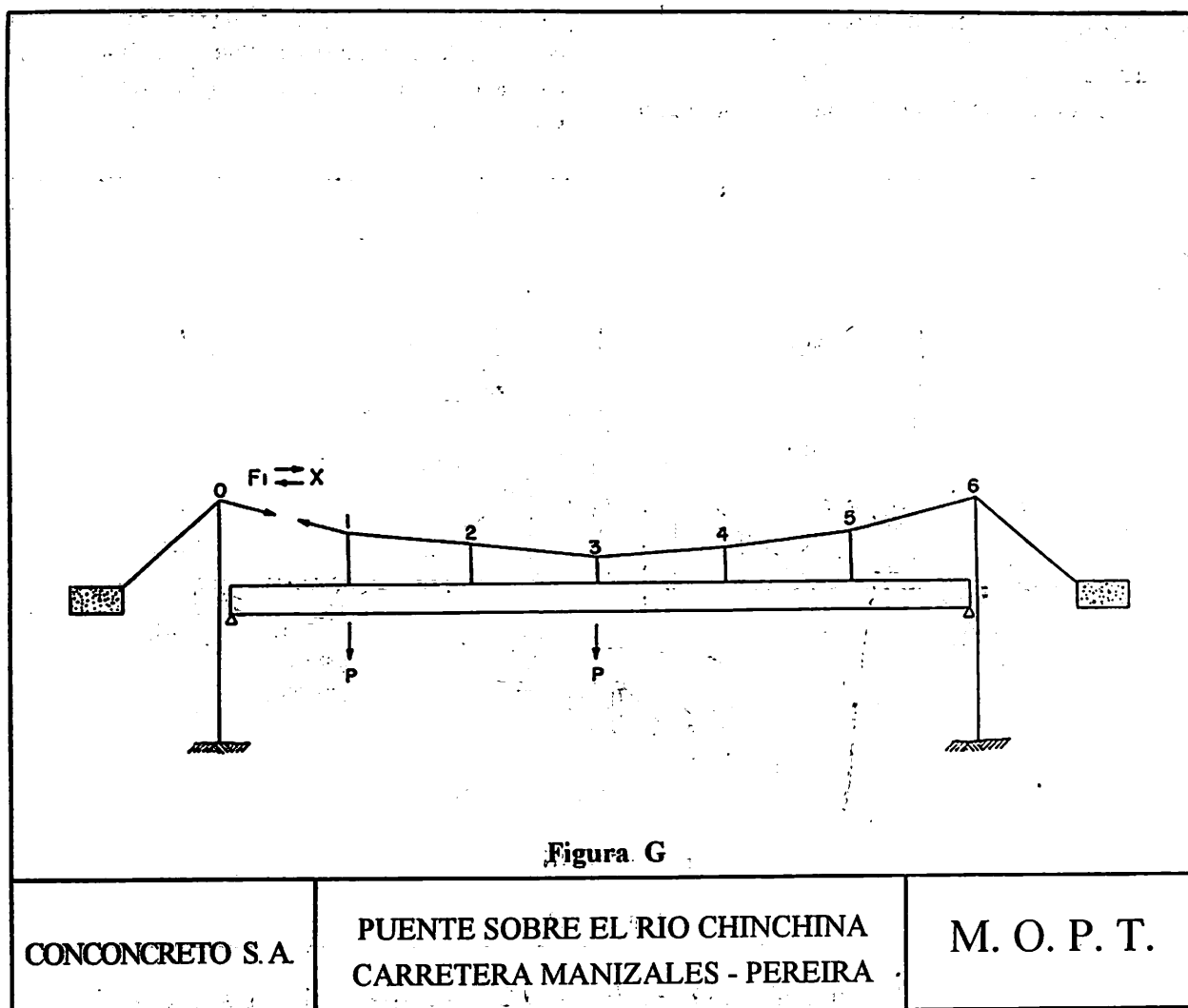


Figura F

CONCRETO S. A.

PUENTE SOBRE EL RIO CHINCHINA
CARRETERA MANIZALES - PEREIRA

M. O. P. T.



5. PUENTE CONTINUO

Es un puente integrado por varios claros iguales o no entre sí, con viga continua discontinua, monolítica o no con las torres que puede ser estudiado con un programa organizado de la siguiente manera:

- Una subrutina A que computa las coordenadas de los vértices de las torres en función de fuerzas aplicadas por los tramos extremos de la catenaria.
- Una subrutina B que calcula todas las deformaciones versus cargas, de la estructura Calzada - Torre denominada Pórtico, teniendo también en cuenta una conexión torsional entre calzada y torre.

- Una subrutina C que para una geometría dada de la catenaria y una fuerza inicial $F1$ en el primer tramo, calcula las fuerzas en todos los tramos de la catenaria y pendolones.
- Una subrutina D que calcula las coordenadas del punto 1 en función de la deformación de la viga, del desplazamiento del vértice de la torre y de las variaciones de longitud de los tramos de catenaria y pendolones por elasticidad y/o temperatura.

Este programa ha sido denominado CHINA 3. Esta en capacidad de recibir no solamente cargas de gravedad y temperatura sino también cargas laterales longitudinales a nivel de calzada y/o a tope de torre. Esto permitirá investigar la respuesta sísmica de la estructura.

6. PUENTE DE CHINCHINA

Se trata de una estructura continua y suspendida en dos claros de 125 metros cada uno. La estructura

denominada pórtico está integrada por una calzada continua de 250 metros de longitud simplemente apoyada sobre los estribos y monolítica con la torre central. Figura H.

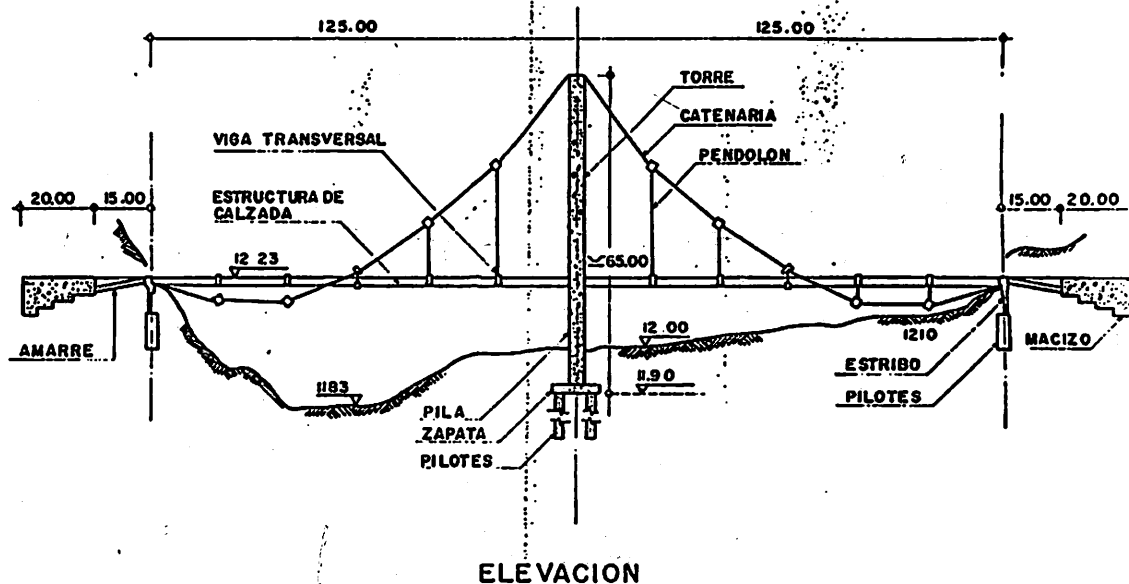


Figura H

CONCRETO S. A.

PUENTE SOBRE EL RIO CHINCHINA
CARRETERA MANIZALES - PEREIRA

M. O. P. T.

La torre tiene configuración tubular y se divide en dos partes:

- La parte inferior que tiene un ancho igual al ancho de la calzada.
- La parte superior son dos columnas también tubulares a lado y lado de la calzada que suben hasta el nivel requerido para soportar el centro de la catenaria.

La estructura de calzada está integrada por vigas transversales dispuestas cada una más o menos a 21 metros, colgadas de los pendolones. Reciben la calzada propiamente dicha configurada por tres vigas longitudinales, placa superior y placa inferior.

Las vigas transversales son prefabricadas con refuerzo principal postensionado. Las vigas longitudinales también son prefabricadas con apoyo de silleta sobre las transversales, y su refuerzo es postensionado solo para el manipuleo. Presentan una serie de ductos longitudinales destinados a alojar cables de tensionamiento que unirán las vigas longitudinales y transversales a lo largo del puente, creando así parte de la continuidad que es complementada con cables de postensionamiento colocados en placas inferior y superior.

El diseño de la torre asume un riesgo sísmico alto ($C = 0.14$ en sentido longitudinal y $C = 0.18$ en sentido transversal) y también tiene en cuenta impacto de lodo en toda la altura de la zona inferior.

Cada pendolón de la zona central está integrado por dos barras macizas de 3" de diámetro, roscados en su extremo inferior para permitir ajustes de nivel.

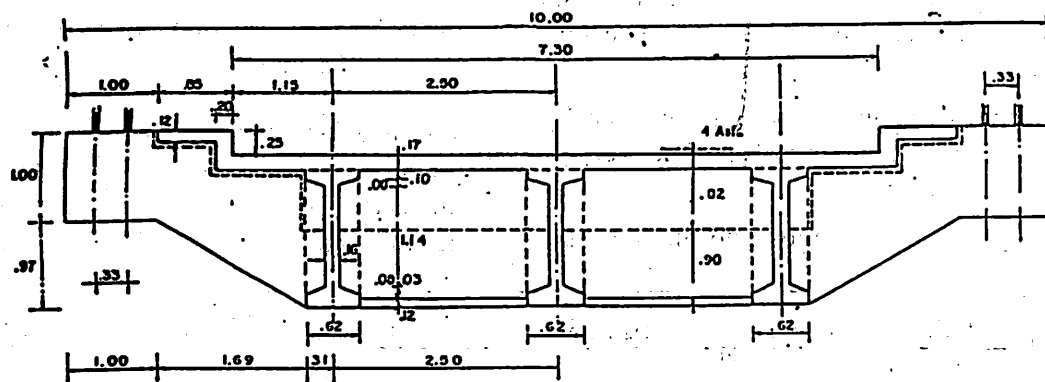
En la parte superior los pendolones son suspendidos de la catenaria por un sistema de abrazaderas, que operan por fricción contra la catenaria,

Los pendolones correspondiente a las zonas laterales en donde la catenaria pasa a un nivel inferior al de la calzada, y por consiguiente están sometidos

a esfuerzos de compresión, tienen la configuración de torres metálicas con conexión a catenaria y calzada que permite nivelación y escualización.

Cada catenaria está integrada por 112 torones de $\frac{1}{2}$ " de diámetro del tipo utilizado para tensionamiento clase 270 K.

La catenaria es anclada monolíticamente en el vértice de la torre y en los estribos se dejó posibilidad de ajustes transitorios durante la construcción.



SECCION TRANSVERSAL

Figura I

C. E. I.
Ingenieros Consultores

PUENTE SOBRE EL RIO CHINCHINA
CARRETERA MANIZALES - PEREIRA

M. O. P. T.

7. CONSTRUCCION DEL PUENTE

La construcción del puente se programó en una serie de etapas que implicaron con frecuencia cálculos estructurales locales correspondientes a estados de carga especiales de algunos miembros. Por tal razón se establecieron dos programas para ejecutarse en la obra, para atender con rapidez los cálculos locales necesarios y tener con facilidad información suficiente para las operaciones de construcción y montaje.

EL PROGRAMA CATE calcula los efectos de cargas variadas aplicadas a la catenaria libre y suministra la figura de la misma o sea que permite calcular qué desplazamientos van a ocurrir y qué fuerzas se van a desarrollar cuando se suspende de la catenaria un elemento cualquiera.

El programa CATE opera así:

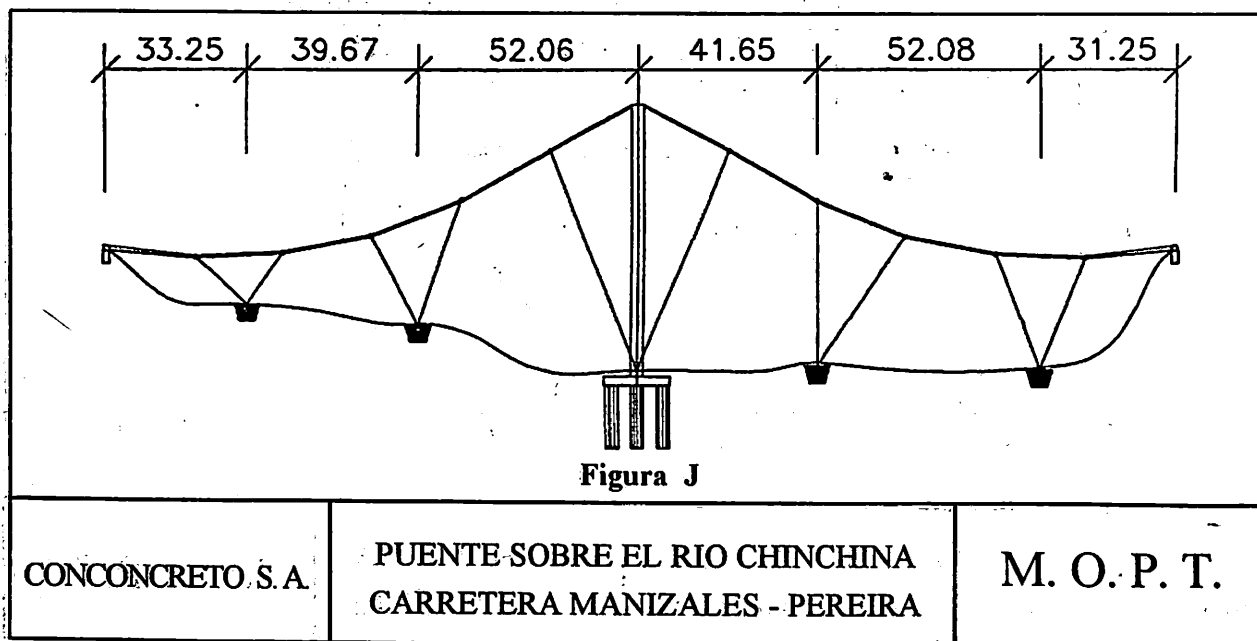
- Se conocen los diferentes elementos como longitudes, módulo de elasticidad, sección, punto inicial y punto de llegada de la catenaria.- Se asume que la figura de la catenaria es un polígono de fuerzas que se encuentra en equilibrio.
- Se suponen una fuerza resultante horizontal y una fuerza resultante vertical para iniciar el proceso de iteraciones.
- El programa inicia con los datos de entrada, a

localizar con base en las fuerzas, longitudes y ángulos, los diferentes puntos. Partiendo del inicial hasta uno final que casi nunca coincide con el final.

- El programa cambia las fuerzas horizontal y vertical que han sido supuestas inicialmente, y arma nuevamente al polígono, partiendo del mismo punto inicial hasta localizar otro punto final real.
- Cuando se encuentra que el punto final calculado no difiere en más de 0.001 metros con el punto final real, entonces se calculan con los esfuerzos en los diferentes tramos de catenaria, las longitudes deformadas de cada uno de estos.
- Luego el proceso se repite hasta que con longitudes deformadas, ángulos y esfuerzos el polígono parte de el punto inicial real y llega al punto final con una diferencia igual o menor de 0.001 metros.

El terreno permitió amarrar la catenaria a tierra evitando grandes deformaciones y facilitando los procesos d montaje y construcción.

Teniendo la catenaria amarrada a tierra como muestra la Figura J el programa CATE no representó ninguna utilidad pues el número de incógnitas indeterminadas se aumentaban considerablemente.



Fue así como fabricando una matriz de «RIGIDEZ» a partir de un estado de cargas cualquiera y moviendo una carga unitaria mediante el progra-

ma CATE por todos los nudos se calcularon los diferentes coeficientes.

EJEMPLO

Para el lanzamiento de cuarta viga central se tienen los siguientes datos de entrada, y los resultados de niveles correspondientes:

PUNTO	CARGA BASE	NIVELES DE CATEGORIA	
1	29.00	-	2.009
2	30.00	-	0.768
3	26.00	+	3.833
4	25.00	+	11.355
5	25.00	+	21.770

CORRIDAS CON CARGAS UNITARIAS

NIVELES

PUNTO	BASE	+1 EN 1	+1 EN 2	+1 EN 3	+1 EN 4	+1 EN 5
1	-2.009	-2.059	-2.015	-1.992	-1.985	-1.992
2	-0.768	-0.773	-0.808	-0.763	-0.745	-0.748
3	3.833	3.850	3.837	3.795	3.830	3.841
4	11.355	11.379	11.378	11.352	11.309	11.342
5	21.770	21.787	21.790	21.779	21.757	21.728

Donde $a(1,1) = (\text{Base} - +1 \text{ EN } 1) \times 100$ en cm

Implica $-2.009 - (-2.059) \times 100 = 5.0$ cm

Donde $a(1,2) = -0.768 - (-0.773) \times 100 = 0.5$ cm

Donde $a(1,4) = -2.009 - (-1.985) \times 100 = -2.4$ cm

Los signos significan: + Baja
- Sube

Así se sigue hasta completar la matriz:

$$5.0X1 + 0.6X2 - 1.7X3 - 2.4X4 - 1.7X5 = d1$$

$$0.5X1 + 4.0X2 - 0.5X3 - 2.3X4 - 2.0X5 = d2$$

$$-1.7X1 - 0.4X2 + 3.8X3 + 0.3X4 - 0.8X5 = d3$$

$$-2.4X1 - 2.3X2 + 0.3X3 + 4.6X4 + 1.3X5 = d4$$

$$-1.7X1 - 2.0X2 - 0.9X3 + 1.3X4 + 4.2X5 = d5$$

Nótese que la matriz resultante a pesar de haber sido fabricada con el mismo método que cualquier matriz de rigidez, confirma el hecho de la no proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones, pues si así fuera el resultado sería una matriz simétrica lo cual no ocurrió.

En donde se llaman X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 : Fuerzas adicionales a P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 en todos los nudos. Esto implica que cuando se sabe ciertamente que en uno de los nudos no habrá ninguna fuerza adicional $X_i = 0.00$

Los términos d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 son los desplazamientos de los diferentes nudos que cuando el resultado es (+) quiere decir que baja y si es (-) sube. Como la catenaria permanece amarrada a tierra, hay algunos nudos en los que se puede asegurar que por lo menos no suben y se puede decir que ese $d_i = 0.00$.

En las descripciones anteriores se anota la manera que se utilizó para eliminar incógnitas y poder resolver más fácilmente el estado de cargas requerido.

Los diferentes desplazamientos fueron datos a los que mayor importancia se dio. Ya que en el momento de lanzar las vigas longitudinales era importante conocer con anterioridad cuál era el descenso de los puntos de apoyo para no poner en peligro tanto la estructura de lanzamiento como la viga en sí.

ETAPAS DE CONSTRUCCION

1. Construcción de subestructuras, macizos de anclaje, estribos y vigas tensoras a los macizos por procedimientos convencionales.
2. Construcción de la torre central con formaleta deslizante.
3. Colocación de la catenaria previa marcación rigurosa en todos los torones de la posición del vértice de la torre y en todas las abrazaderas. Una vez efectuados los respectivos controles (niveles, longitudes y posiciones teóricas de abrazaderas), será sellado el vértice de la torre de concreto, fijando definitivamente la posición de los torones. Los extremos de la

catenaria serán asegurados a los estribos por medio de barriletes que permitirán ajustes posteriores.

4. Colocación de las abrazaderas por medio de una plataforma de trabajo sostenida por cables adicionales. Estos elementos trabajan por fricción y fueron probados en banco al doble de la carga de servicio.
5. Construcción de muertos para el amarre de la catenaria a tierra. Esta operación se desarrollo simultáneamente con las anteriores.
6. Prefabricación de las vigas transversales. En el suelo y en la proyección de su posición final para aquellas que serán suspendidas de la catenaria. Sobre la calzada y en cercanías de los estribos, aquellas que serán apoyadas sobre la catenaria.
7. Prefabricación de las vigas longitudinales sobre las calzadas de acceso al puente.
8. Colocación de pendolones de tracción y compresión estabilizados por medio de estructuras metálicas transitorias.
9. Izada y posicionamiento de las vigas transversales suspendidas y lanzamiento desde los estribos de las vigas transversales apoyadas utilizando sistemas de gatos y cables para el izaje y una estructura de metálica convencional para el lanzamiento.
10. Lanzamiento de las vigas longitudinales. Primero toda la hilera central y luego las laterales. Hasta este punto todos los controles y chequeos han sido controlados por CATE y La MATRIZ DE «RIGIDEZ».
11. Enhebrada de cables y tensionamiento principal para crear la continuidad. A partir de este momento el programa CHINA 3 controlará las operaciones.
12. Fundida programada de placas inferior y superior.
13. Tensionamiento final, rectificación de niveles, y obras de acabado.