

Theoretical and experimental analysis of the central piles of the General Rafael Urdaneta Bridge

Antonio Sarcos Portillo* e Hiltrun F. García Legl

*Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia, Apartado 1247, Maracaibo, Edo. Zulia, Venezuela*

**E-mail: asarcos@luz.ve*

Abstract

This paper presents a tridimensional structural model of the original central piers of the Lake Maracaibo bridge. This model can reproduce the actual structural responses measured during experimental static load tests "in situ" with a mean error of less than 3%.

The aforementioned model was obtained using the load conditions corresponding to load tests performed in 1989, taking into account the change of wires in 1981. The model is used to estimate damage in the concrete in the central piers and may be an effective tool to reproduce the actual structural responses of the central piers when subjected to any type of dynamic or static loads.

Key words: Piers, wires, pier table span, struts, frames.

Análisis teórico-experimental de las pilas centrales del Puente "General Rafael Urdaneta"

Resumen

En el presente trabajo se propuso un modelo estructural tridimensional de las pilas centrales originales del puente sobre El Lago de Maracaibo, capaz de reproducir las respuestas estructurales reales, medidas durante pruebas experimentales de carga estática en sitio, con un error promedio inferior al 3%.

Al analizar el modelo propuesto bajo los estados de carga correspondientes a pruebas realizadas en 1989, y habiéndose tomado en cuenta el cambio de guayas del que fueron objeto las pilas en 1981, se obtuvo un modelo estructural tridimensional de las pilas centrales del puente en su estado actual y se pudo evaluar una pérdida de resistencia en los concretos que forman los diferentes miembros de las estructuras. Este último modelo, es por sí mismo una herramienta que reproduce las respuestas estructurales reales de las pilas centrales en su estado actual, sometidas a cualquier sollicitación de naturaleza estática y/o dinámica.

Palabras clave: Pilas, guayas, viga mesa, fustes, pórticos.

Introducción

La construcción del puente "General Rafael Urdaneta" finalizó en el año 1962 [1] y hasta el presente, su mantenimiento ha sido mínimo en el aspecto de la preservación de la integridad física de la estructura, por lo que se hace nece-

sario verificar las condiciones actuales de resistencia y módulo de elasticidad del concreto.

Esta verificación puede llevarse a cabo a través de varias técnicas de análisis. La forma más directa de conocer los parámetros mencionados es mediante pruebas de compresión aplicadas a corazones de concreto extraídos de los

elementos estructurales a estudiar. Este método presenta varias desventajas entre las cuales se pueden señalar el debilitamiento de los miembros más esforzados de la estructura que es donde interesa conocer las condiciones del concreto, el riesgo de producir la ruptura de los aceros más superficiales al extraer las muestras y si no se toman las previsiones necesarias podría acelerarse el proceso corrosivo del acero al dejar las barras al descubierto. También se puede conocer la resistencia y módulo de elasticidad de los distintos miembros estructurales de las pilas al realizar pruebas experimentales dinámicas en sitio. Otra forma de verificar estos parámetros se basa en la elaboración de un modelo estructural de la pila que represente de una manera confiable el comportamiento de la misma en sus condiciones iniciales (conocidas las propiedades geométricas de las estructuras y los valores de resistencia y módulos de los concretos originales) y a través de un proceso de análisis iterativo variar los módulos de los miembros estructurales hasta lograr un modelo final cuyo comportamiento reproduzca las respuestas de la pila en las condiciones actuales. Los objetivos de este trabajo consisten en la elaboración de estos modelos estructurales tridimensionales calibrados para las pilas centrales del puente sobre el Lago de Maracaibo y en la verificación de la resistencia y módulo de elasticidad promedio actuales de los diferentes tipos de concreto utilizados en éstas.

Algunos autores afirman que el concreto, a medida que transcurre el tiempo, mejora sus propiedades [2] (resistencia, módulo de elasticidad, módulo de resistencia al corte, etc....), sin embargo, cuando éste se encuentre sometido a esfuerzos constantes durante largos periodos de tiempo, así como por efectos de la contracción debida a la pérdida de agua en el curado ó por un vibrado deficiente al momento de la colocación en obra, las propiedades mecánicas del concreto pueden disminuir. Para efectos de este trabajo, se supondrá un comportamiento elástico lineal del concreto, para esfuerzos menores al 50% de f_c , es decir, se obviará la naturaleza viscoelástica de este material en ese intervalo.

Este trabajo consiste en la proposición de un modelo estructural tridimensional de las pilas centrales (Pila 20 a 25) considerando la inte-

racción suelo-pilotes, basado en los planos de arquitectura y geometría de las pilas, en los resultados de pruebas de carga realizadas sobre pilotes de prueba y en estudios de Mecánica de Suelos llevados a cabo antes y durante la construcción de los cimientos del puente. Adicionalmente, se cuenta con los resultados de pruebas de resistencia aplicadas a probetas cilíndricas y cúbicas de los concretos utilizados en los diferentes miembros estructurales de las pilas centrales, así como con las mediciones hechas durante seis pruebas de carga estática realizadas sobre la calzada de la pila 24, tres de ellas por el M.O.P. en 1962 [3] y las tres restantes, por T.Y.Lin International en el año 1989 [4].

Con estos datos fue posible calcular los módulos de elasticidad y resistencias promedio de varios miembros estructurales de las pilas centrales del puente sobre el Lago de Maracaibo correspondientes a los años 1962 y 1989 y se pudo evaluar las propiedades mecánicas actuales de los materiales y verificar el deterioro de las mismas, a través del uso del programa de análisis estructural: SAP80.

Parte Experimental

La parte experimental de este trabajo se fundamentó en pruebas realizadas por el M.O.P y el CONSORCIO PUENTE MARACAIBO en 1962 [3],[5] y las practicadas por T.Y.Lin International en 1989.

Propiedades Mecánicas de los Materiales

La resistencia promedio, f_c , de los concretos se obtuvo de los resultados de pruebas de compresión sobre probetas cilíndricas y cúbicas de concreto fresco (posteriormente curado) tomadas en sitio durante el vaciado de las pilas. De cada tipo de concreto se ensayaron cien probetas obteniéndose curvas de distribución de frecuencias y el valor promedio de las resistencias nominales a los 28 días.

Los módulos de elasticidad de los concretos se calcularon con base en la expresión:

$$E = 15.000 (f_c)^{1/2} \quad (1)$$

Tabla 1
Propiedades mecánicas de los materiales

Propiedad mecánica	Partes de la Pila					
	Pilotes	Cabezal	Pórtico A	Fustes X	Viga mesa	Guayas
f_c (kg/cm ²)	468.00	255.00	383.00	255.00	383.00	-
E (kg/cm ²)	324,499	239,530	293,555	239,499	293,555	1.7E+6
f_y (kg/cm ²)	-	-	-	-	-	16,053

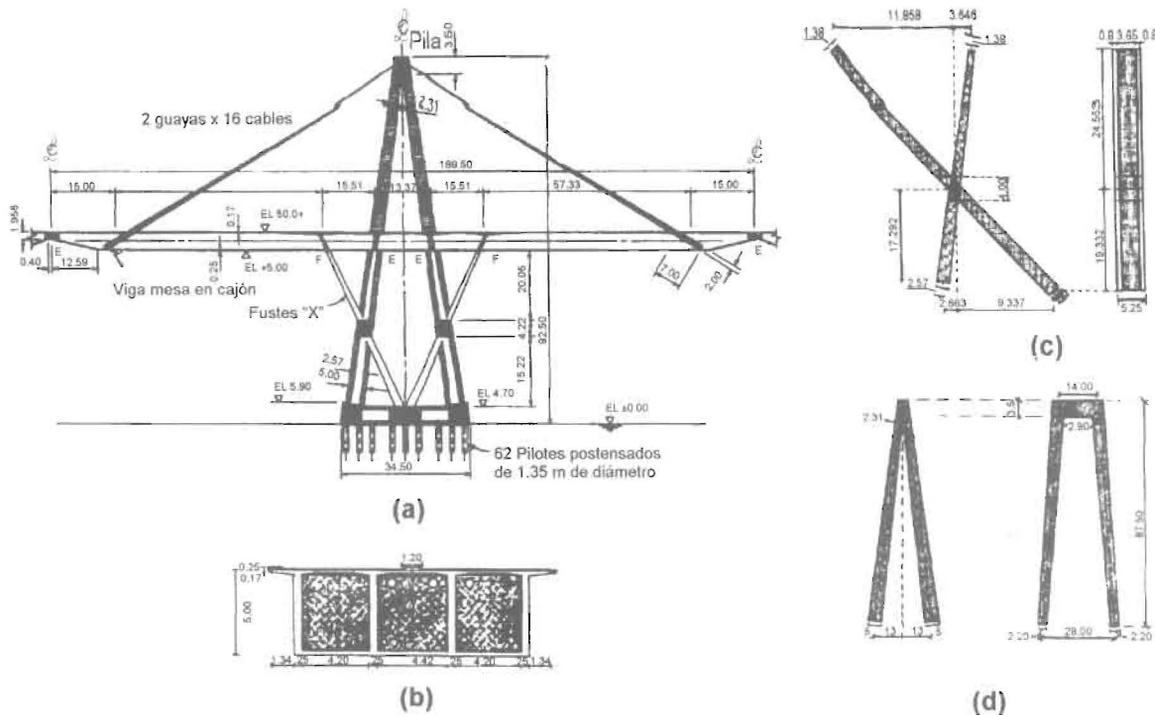


Figura 1. (a) Partes de una pila central, (b) Viga mesa, (c) Fuste X, (d) Pórtico A.

donde: E : módulo de elasticidad del concreto en (kg/cm²); f_c : resistencia promedio del concreto a la compresión, en(kg/cm²).

Los módulos de elasticidad E , las resistencias f_c de los concretos, así como los esfuerzos de fluencia, f_y , y módulos de elasticidad de las guayas de las pilas aparecen en la Tabla 1 (ver Figura 1).

Medición de los Parámetros que rigen la Interacción Suelo-Pilotes

Con base en las pruebas de carga realizadas sobre pilotes de prueba se analizó principalmente el conjunto de curvas Carga vs. Asentamiento en su rango de comportamiento lineal, así como los registros de las pruebas de penetración estándar hechas en zonas cercanas a las

pilas 20 y 24, las curvas de fricción lateral y de punta obtenidas de los pilotes de perforación a diferentes profundidades [5]. Con los datos anteriores, se elaboró un modelo formado por cuerpos elásticos lineales (cuerpos de Newton) colocados a lo largo de la longitud del pilote, en tres direcciones ortogonales, de manera tal que para cargas inferiores a 800 toneladas (rango de comportamiento lineal de los pilotes) el modelo reprodujera los asentamientos del pilote de prueba con aproximación aceptable. Véase Figura 2.

Pruebas de Carga sobre la Viga Mesa realizadas en 1962

En el año 1962 el M.O.P llevó a cabo un programa de pruebas de carga estática sobre la calzada de la pila 24 del puente "General Rafael

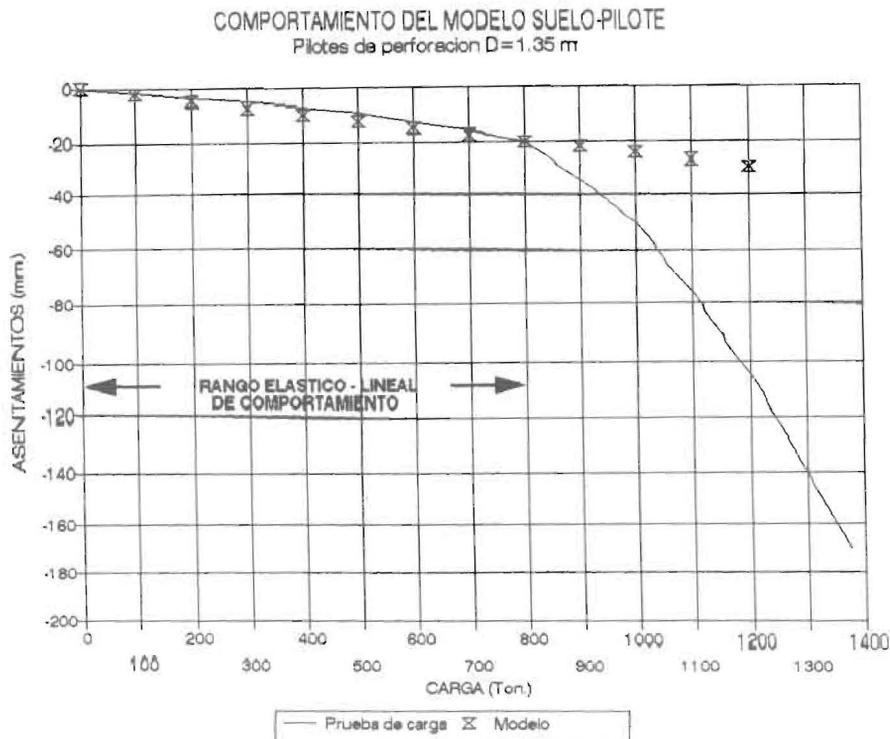


Figura 2. Comparación entre las respuestas real y teórica del conjunto Suelo-Pilote.

Urdaneta". Se colocó una carga de camiones equivalente a la carga normativa vigente para la época. Se realizaron nivelaciones topográficas antes y después de colocar la carga y se midieron los desplazamientos verticales producidos por ésta. Las pruebas se realizaron para verificar la capacidad de recuperación de la horizontalidad de la viga mesa una vez retirada la carga. La Figura 3 ilustra las pruebas.

Medición de la Tensión de las Guayas

Una vez que finalizó la colocación de las guayas de las pilas centrales del puente, se logró medir la tensión remanente en las mismas, a través de un análisis de oscilaciones in situ y paralelamente, colocando gatos de presión en los extremos de las guayas, de este modo se midió la tensión de cada uno de los 64 tirantes. La tensión promedio resultó ser de 170 toneladas. Ver Figura 4.

Medición de las Tensiones de los Cables de Postensado de la Viga Mesa

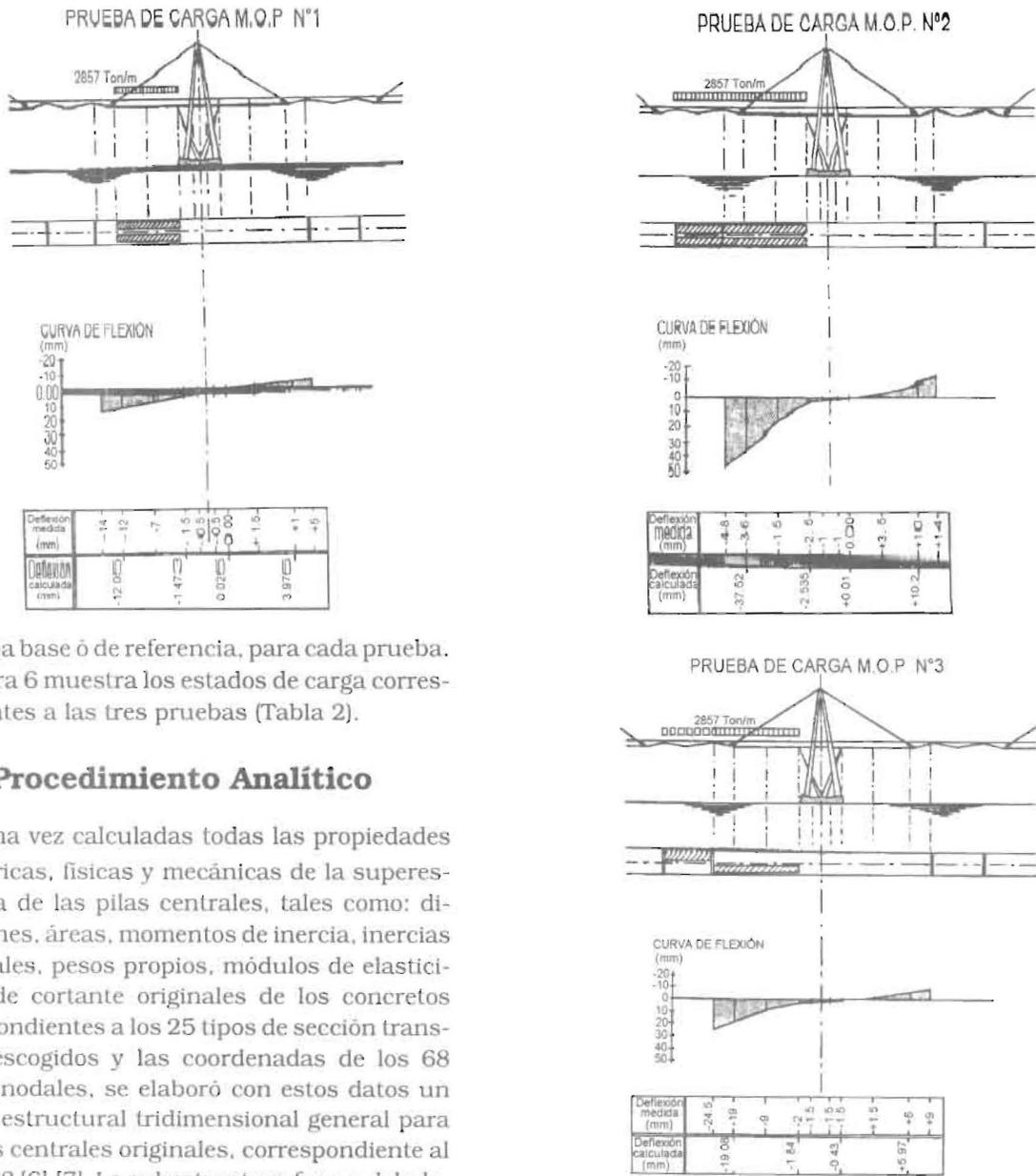
Para mantener la horizontalidad de las vigas mesas de las pilas fue necesario colocar en

los cuatro nervios de su sección transversal (Ver Figura 1(b)) un total de 396 cables, cada uno de los cuales está dividido en seis tirantes.

Durante el tensado de estos cables de la pila 24 se colocaron manómetros en los gatos hidráulicos que permitieron elaborar un registro diario de las tensiones para cada uno de ellos, obteniéndose un total de 2376 tensiones medidas, cuyo valor promedio resultó ser de 185.61 toneladas por cable. La Figura 5 muestra un detalle de la distribución de las guayas en el postensado de la viga mesa en la zona de los fustes "X de una pila central.

Pruebas de Carga Estática sobre la Viga Mesa realizadas en 1989

En el mes de Julio de 1989, la empresa T.Y. Lin International fue contratada por el Gobierno Venezolano para realizar una evaluación de la estructura del puente sobre El Lago de Maracaibo. Uno de los trabajos experimentales realizados por los ingenieros consistió en la realización de tres pruebas de carga estática sobre la calzada de la pila 24. Se colocaron cuatro camiones diferentes, cargados a su máxima capacidad, en distintas posiciones sobre la calzada de la pila y se midieron los desplazamientos verticales de ciertos puntos de la viga mesa, con respecto a



una línea base ó de referencia, para cada prueba. La Figura 6 muestra los estados de carga correspondientes a las tres pruebas (Tabla 2).

Procedimiento Analítico

Una vez calculadas todas las propiedades geométricas, físicas y mecánicas de la superestructura de las pilas centrales, tales como: dimensiones, áreas, momentos de inercia, inercias torsionales, pesos propios, módulos de elasticidad y de cortante originales de los concretos correspondientes a los 25 tipos de sección transversal escogidos y las coordenadas de los 68 puntos nodales, se elaboró con estos datos un modelo estructural tridimensional general para las pilas centrales originales, correspondiente al año 1962 [6],[7]. La subestructura fue modelada, con base en los resultados de pruebas de carga

Figura 3. Pruebas de Carga Estática sobre Viga Mesa realizadas en 1962.

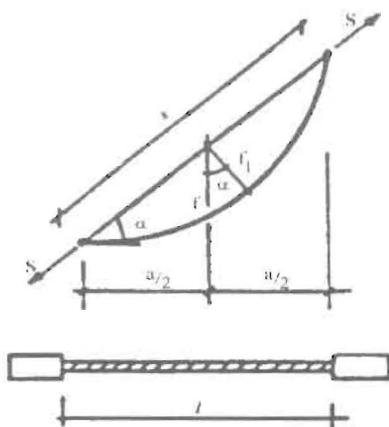


Figura 4. Método de las Oscilaciones utilizado para medir la Tensión en las Guayas.

donde:

P: Tensión de la guaya, en kg

g: aceleración de la gravedad, en m/s²

q: peso del cable, en kg/m

L: longitud libre del cable, en m

t: período de oscilación, en s

$$P = 4 \frac{qL^2 f_1^2}{g}$$

para $f_1 = \frac{n}{t} = \frac{100}{t}$

$$P = 4 \frac{qL^2}{g} \left(\frac{100}{t} \right)^2$$

$$P = \frac{k}{t^2}$$

Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 19, No. 3, 1996

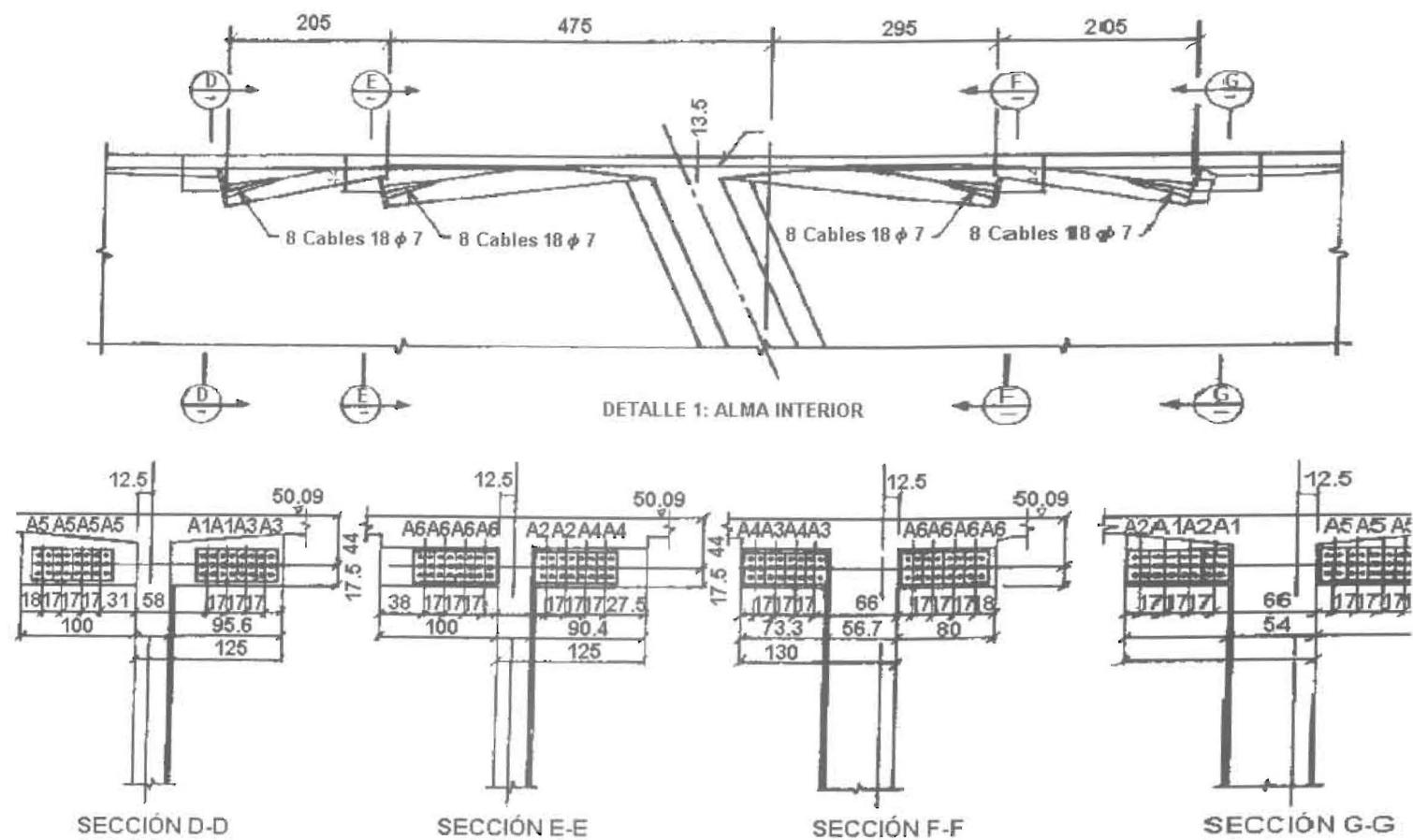
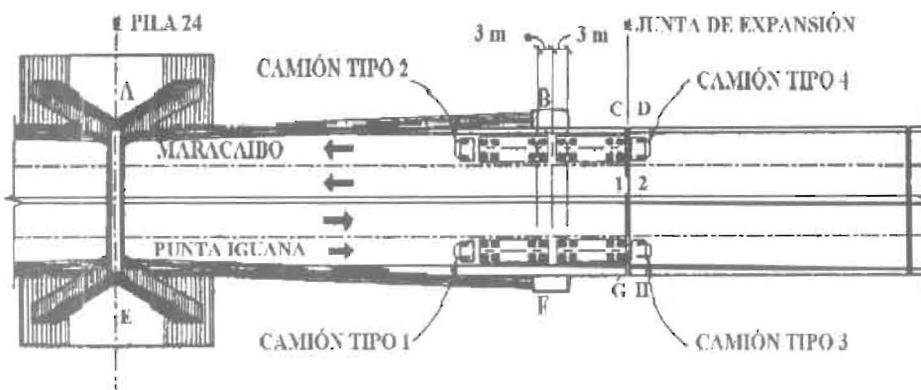
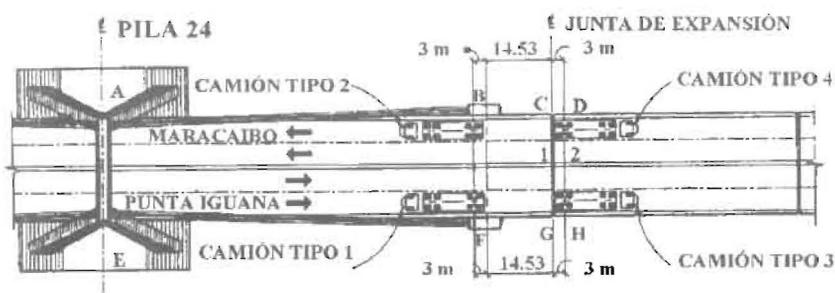


Figura 5. Postensado de la Viga Mesa.

PRUEBA DE CARGA T.Y.LIN No.1



PRUEBA DE CARGA T.Y.LIN No.2



PRUEBA DE CARGA T.Y.LIN No. 3

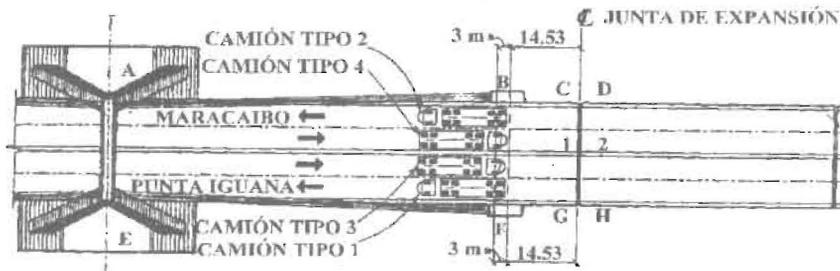


Figura 6. Pruebas de Carga Estática sobre la Viga Mesa realizadas en 1989.

Tabla 2
Resultados teóricos y experimentales de las pruebas de carga de 1989

Prueba N ^o	Deflexiones (mm)	Punto							
		A	B	C	D	E	F	G	H
1	Medida	+2	-30	-37	-40	0	-30	-40	-42
	Calculada	+2.03	-30.507	-	-	+2.03	-30.507	-	-
2	Medida	+4	-26	-35	-36	0	-27	-38	-41
	Calculada	4.041	-27.12	-	-	4.12	-28.09	-	-
3	Medida	+2	-24	-26	-33	0	-24	-30	-32
	Calculada	+1.96	-23.963	-	-	+1.936	-23.964	-	-

Tabla 3

Asentamientos medidos y calculados para un pilote de perforación de las pilas centrales

Carga (Ton.)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Asentamientos medidos (mm)	0	1.99	3.68	5.34	7.21	9.15	13.1	16.2	20.0	35.0	50.0	76.0
Asentamientos teóricos (mm)	0	2.50	5.00	7.50	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5

Tabla 4

Módulos de elasticidad promedio de los concretos y tensiones remanentes teóricas y experimentales de las guayas para los años 1962 y 1989

Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)	Pilotes	Cabezal	Pórtico "A"	Fustes "X"	Viga mesa	Tensión de Guaya medida (Ton)	Tensión de Guaya calculada (Ton)
Para 1962	3.30E+5	2.40E+5	2.99E+5	2.40E+5	2.99E+5	170	170.1
Para 1989	3.20E+5	2.37E+5	2.92E+5	2.37E+5	2.91E+5	171.6	173.1

sobre los pilotes de prueba y las características de resistencia a la penetración estándar del subsuelo bajo las pilas, como un conjunto de cuerpos elásticos lineales de Newton en tres direcciones ortogonales a lo largo de la longitud de los pilotes, se varió las constantes de los resortes en coincidencia con los cambios estratigráficos y de resistencia del suelo, para un total de 1,030 puntos nodales, y se sometió a una prueba de carga teórica idéntica a la prueba de carga aplicada en 1962 sobre los pilotes de prueba, obteniéndose los resultados de la Tabla 3.

Se analizó el modelo de las pilas originales sometido a las tres pruebas de carga estática sobre la viga mesa, realizadas por el M.O.P. en 1962 y se ajustó el conjunto de módulos de elasticidad de los concretos iterativamente hasta obtener una diferencia en las respuestas real y teórica, inferior a 3%. Con ese último conjunto de módulos de elasticidad, se analizó el modelo nuevamente bajo los estados de carga muerta, postensado original de la viga mesa y postensado de las guayas para calcular la tensión remanente en éstas y compararla con la tensión medida en 1962, los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 4.

Para calcular la tensión remanente en las guayas en forma teórica, se llevó a cabo un

análisis del modelo dividido en tres etapas: la primera consiste en someter a la estructura a la acción de su peso propio (carga muerta) y registrar los desplazamientos verticales que se produzcan en los puntos nodales de la viga mesa, ΔI , como se ilustra en la Figura 7(a). La segunda etapa corresponde a un análisis del modelo bajo los efectos del postensado de la viga mesa y el cálculo de los desplazamientos verticales que este estado de carga produce en los puntos nodales preestablecidos, ΔII , que aparece en la Figura 7(b), finalmente, se somete la estructura a cargas equivalentes al postensado de las guayas y se registran los desplazamientos verticales correspondientes, ΔIII , ver Figura 7(c). El análisis por postensado de las guayas se llevará a cabo tantas veces como sea necesario hasta lograr que se cumpla con la expresión:

$$\Delta I + \Delta II + \Delta III = 0 \quad (2)$$

Esto debe cumplirse para garantizar el mantenimiento de la horizontalidad de la viga mesa [6]. Todos los cálculos anteriores fueron hechos mediante un programa de análisis estructural matricial espacial.

Calibrado el modelo general para las pilas originales, se analizó bajo los estados de carga correspondientes a las pruebas estáticas reali-

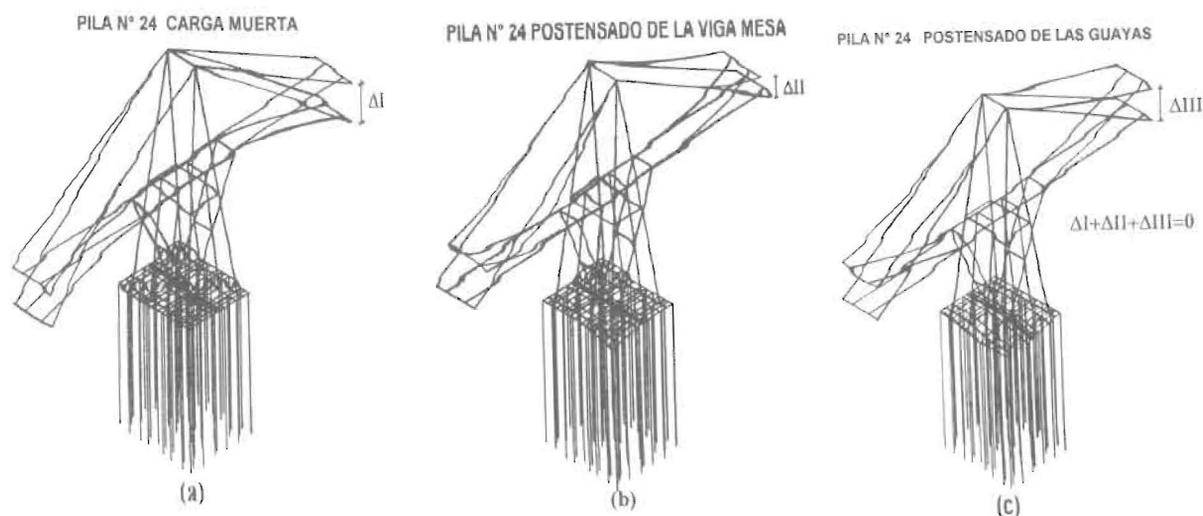


Figura 7. Etapas del análisis para el Cálculo de las Tensiones Remanentes en las Guayas.

zadas en 1989. Una vez más se varió en forma proporcional los módulos de elasticidad de los concretos hasta obtener una respuesta teórica satisfactoria con respecto a la medida en sitio, es decir, con una diferencia menor al 3% entre ambas. Con este nuevo conjunto de módulos se analizó el modelo modificado para calcular la tensión remanente en las guayas, el resultado que fue comparado con la tensión medida en sitio en ese año y aparece en la Tabla 4.

Resultados

Se sometió el modelo de interacción suelo-pilotes a una prueba de carga teórica similar a la aplicada sobre los pilotes de prueba colocados en las cimentaciones de las pilas centrales obteniéndose los registros teórico y experimental mostrados en la Tabla 3.

Se obtuvo los módulos de elasticidad, más probables, de los concretos de las pilas centrales para el año 1962 y los correspondientes al año 1989, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Se calcularon, también, las tensiones remanentes promedio de las guayas que atirantan a la viga mesa, para mantener su horizontalidad, y se obtuvo los valores correspondientes a las guayas originales (año 1962) y a las guayas colocadas en 1981, para las condiciones que presentaban en 1989. Estos se muestran en la Tabla 4.

Discusión de Resultados

Al concluir el presente estudio se cuenta con un modelo estructural tridimensional de las pilas centrales del puente "General Rafael Urdaneta", que toma en cuenta la interacción suelo-pilotes y que es capaz de reproducir con una aproximación superior al 97%, las respuestas reales de las estructuras, ante las solicitaciones estudiadas en el presente trabajo. Es posible, entonces, conocer a través del modelo propuesto, el comportamiento real de las pilas centrales bajo la acción de cualquier tipo de carga (viento, sismo, impacto de frenado, carga viva ó la falla parcial ó total de cualquiera de sus elementos estructurales, etc) de manera confiable.

Con los procedimientos de análisis aquí empleados, se logró determinar un módulo de elasticidad, E , y un esfuerzo máximo del concreto, promedio para las distintas subestructuras que forman la pila 24, correspondientes a los años 1962 y 1989. Los resultados mostrados en la Tabla 4 indican que las resistencias promedio de los concretos originales probablemente fueron ligeramente superiores a la media obtenida de las curvas de frecuencia realizadas con base en los resultados de las pruebas de compresión en el laboratorio, mostradas en la Tabla 1. La diferencia, en ningún caso, supera el 1%. Sin embargo, se observa pérdida de resistencia de los concretos actuales (1989) con respecto a los originales (1962) del 1.18% en cabezales y fustes

"X, del 2.3% en las vigas mesa y pórticos "A y del 3.13% para los pilotes. Este resultado indica que la calidad del concreto no ha sufrido una gran disminución en promedio, sin embargo, no da información acerca de posibles daños producidos por la corrosión y el flujo plástico en puntos o miembros localizados de las estructuras tales como: ménsulas, nodos en los voladizos y cimen-

tación, así como en los cables de postensado de la viga mesa y las guayas.

Conclusiones

Se obtuvo un modelo estructural tridimensional general de las pilas centrales del puente "General Rafael Urdaneta" tomando en cuenta la interacción suelo-pilotes, capaz de reproducir las respuestas de estas estructuras ante cualquier carga vertical, con una aproximación superior al 97%. Lo anterior representa una herramienta importante en la evaluación confiable del comportamiento de las pilas bajo otros tipos de excitación.

La calidad actual de los concretos que forman los miembros estructurales de las pilas centrales es inferior con respecto a la original, sin embargo, resulta ser aceptable, ya que no representa ningún tipo de riesgo para funcionamiento normal de las estructuras.

Agradecimiento

Se agradece al Centro de Corrosión de la Universidad del Zulia por el suministro de la información necesaria para la culminación de este trabajo.

Referencias Bibliográficas

1. Bauverlag, GmbH: "El Puente sobre el Lago de Maracaibo". Wiesbaden - Berlin. Alemania. 1970.
2. Meyer and Thomas, "Elastic, Shrinkage, Creep and Thermal Movement of Concrete". McGraw Hill Co. New York. U.S.A. 1969
3. Consorcio Puente Maracaibo: "Actas de las Pruebas de Carga Realizadas en la Calzada del Puente sobre el Lago de Maracaibo". Archivo del M.T.C. Maracaibo. Venezuela. 1962
4. T.Y.Lin International : "Final Report on the Structural Investigation of the Lake Maracaibo Bridge". Volumen I . San Francisco, California. U.S.A. Marzo 1990.
5. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS: "El Puente sobre el Lago de Maracaibo. General Rafael Urdaneta. S/Editorial. S/Fecha.
6. Sarcos Portillo, Antonio: "Análisis Estructural de una Pila Central del Puente General Rafael Urdaneta, a través del Computador. Trabajo de ascenso para obtener la categoría de Profesor Agregado de L.U.Z. Universidad del Zulia. Venezuela. Mayo 1990.
7. Oladis T. de Rincón, Miguel Sánchez, Daniel Contreras, Rafael Fernández, Waldo Zambrano, César Vezga, Antonio Sarcos Portillo, Heinz Hennerberg y Antonio González: "Contribución Técnico-Científica de la Facultad de Ingeniería al Puente sobre el Lago de Maracaibo". Rev. Técnica Ing. Univ. Zulia, vol 14, (63-111), 1991.

Recibido el 14 de Mayo de 1996

En forma revisada el 16 de Octubre de 1996