

Cimientos especiales.

Puente Vasco da Gama; Puente 25 de Abril; Puente de Alcácer do Sal

ANTONIO MANUEL PIRES CARRETO (*)

RESUMEN Las dimensiones singulares de los pilotes, con diámetros de 1.500 mm, 2.200 mm, 2.500 mm; las profundidades alcanzadas, de 30 m hasta 95 m, en condiciones geológicas y de ejecución extraordinariamente difíciles; los plazos cortos y las diversas tecnologías aplicadas, hacen de estas tres obras, la primera y la última inauguradas en el año 1998 y la otra, inaugurada en 1999, obras de ingeniería de carácter excepcional.

A continuación presentamos las soluciones y diversas tecnologías implementadas, así como una breve descripción del proyecto.

SPECIAL FOUNDATIONS VASCO DA GAMA BRIDGE; 25 DE ABRIL BRIDGE; ALCÁCER DO SAL BRIDGE

ABSTRACT. *The outstanding dimensions of the box piles, with diameters of 1500 mm, 2200 mm; the depths reached, from 30 m to 95 m, in extraordinarily difficult geological and working conditions; the short execution periods and different technologies applied, make these three constructions exceptional engineering works; the first and the last were opened in 1998 and the other in 1999.*

1. PUENTE VASCO DA GAMA - LISBOA

A finales de marzo del año 1998, se inauguró en Portugal el que es uno de los mayores pasos fluviales de Europa, ofreciendo una travesía al tráfico rodado sobre 10 Km de río y 8 Km de tierra firme, siendo considerado como una de las más bellas estructuras construidas por el hombre. De estos 18 Km de longitud, en los que no están incluidos los tramos de los nudos, 12,3 Km son de viaductos (distancia que equivaldría a atravesar París en su punto más largo), de los que destacan un puente principal atirantado con 830 m de longitud y 31 m de anchura, un viaducto central de 6,5 Km, dos viaductos hacia el norte con 1.160 metros y un viaducto hacia el sur con 3.825 m.

La obra, por su extensión, teniendo en cuenta su especificidad técnica, está compuesta por una sucesión de ocho obras:

- Acceso Norte: Conexión con la CRIL
Nudo con la A1
Nudo con la variante a la EN10
- Viaducto Norte
- Viaducto de la Expo
- Puente Principal
- Viaducto Central
- Viaducto Sur
- Acceso Sur
- Nudo de Coima

Las técnicas utilizadas en la construcción de esta obra ilustran las principales técnicas usadas para la construcción de puentes, pudiendo incluso afirmarse que el puente Vasco da Gama es una verdadera "Escuela de Puentes".

a) Acceso Norte

Con 28.100 m² de tablero, 2 viaductos, 6 pasos inferiores y 4 pasos superiores.

b) Viaducto Norte (483 m)

Tablero de longitud variable en losa de hormigón armado con nervaduras, con cimbra al suelo.

c) Viaducto de la Expo (672 m)

Tablero formado por dos vigas en cajón y ejecutado con dovelas prefabricadas y ensambladas in situ por pretensado.

d) Puente Principal (824 m)

Tablero atirantado, con vigas laterales en hormigón pretensado y sobrequillas metálicas, ejecutado mediante caretila de avance.

e) Viaducto Central (6.531 m)

Tablero constituido por dos vigas cajón, prefabricadas con luz entera de ≈ 80 m con un peso de 2.200 ton cada una. Transportadas y colocadas en los apoyos por un catamarán flotante, el Rambriz, cuya base mide 80 x 80 m, equipado con dos grúas de 82 m de altura.

La continuidad de las vigas se garantiza mediante un cerramiento sobre los apoyos.

La construcción de 195.000 m² de tablero en 20 meses se consiguió mediante la aplicación al máximo de los principios del prefabricado y de medios de realización fuera de lo común.

(*) Teixeira Duarte - Ingeniería y Construcciones, S.A. - Lisboa. Portugal

- f) Viaducto Sur (3.825 m)
Tablero con nervaduras, de longitud constante ejecutado *in situ*, mediante vigas de lanzamiento con junta de hormigón armado en el cuarto vano.
- g) Acceso Sur (3.900 m)
Autopista con 2x4 carriles.
- h) Nudo de Coina
Con 4.910 m² de tablero, 3 pasos superiores y un paso inferior.

Los cimientos han representado por sí mismos una actividad aparte.

De la misma forma que para la construcción de la superestructura, también para los cimientos indirectos se utilizaron varios procesos constructivos, teniendo estos que ver con las características geotécnicas de los terrenos, las condiciones de ejecución (en el río o en tierra), la profundidad a alcanzar y el diámetro de los pilotes.

Debido a las condiciones geológicas del lugar, al dimensionamiento, que está basado en parámetros sísmicos muy

constructora en el lugar de cada uno de los pilares para determinar la posición exacta de las formaciones y de las capas geológicas donde debía establecerse la punta de los pilotes.

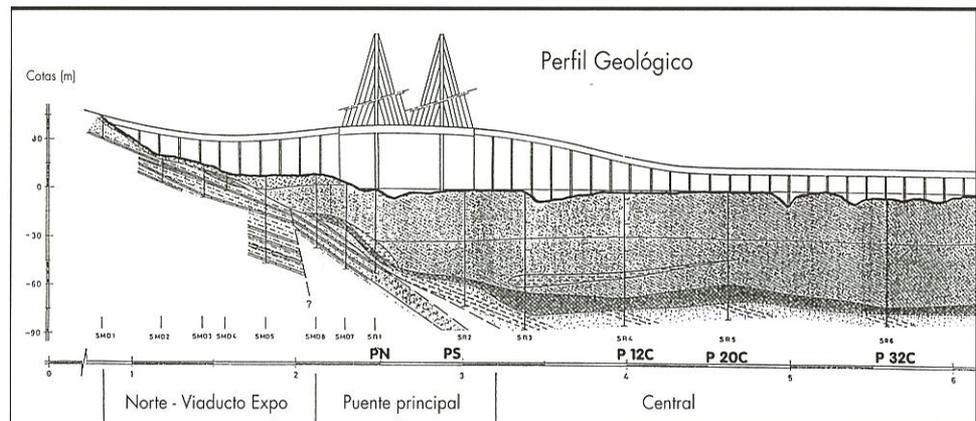
Los ensayos de campo, consistieron en "SPT" ensayos con medidor de presión autoperforador, piezoconos, "crosshole", conos sísmicos y Vans. Estos trabajos se completaron con un conjunto de pruebas de laboratorio que incluían ensayos de compresión triaxial, consolidación unidimensional, corte directo, permeabilidad, corte directo cíclico, columna resonante, triaxial cíclico, corte torsional, densidad y ensayos químicos.

Este conjunto de ensayos permitió obtener datos para los cimientos y para la evaluación del potencial de licuefacción.

La geología de los lugares a los que corresponden las diferentes obras mencionadas antes, es en resumen la siguiente.

a) Puente Principal y Viaducto Central

Por lo general se compone de dos formaciones:



Nueva travesía sobre el río Tajo en Lisboa.

conservadores —el puente puede resistir un seísmo de una intensidad 4,5 veces superior al que, en 1755, destruyó una gran parte de Lisboa— los pilares y apoyos se han asentado en cimientos muy profundos y de gran diámetro. Los diámetros de los pilotes, entre 700 mm y 2.200 mm, y las profundidades alcanzadas en especial en el lecho del río, entre los 60 m y los 95 metros, en condiciones geológicas difíciles, suscitaron problemas, algunos de los cuales no estaban previstos.

El plazo de construcción fue ambicioso, pues la nueva travesía debía estar preparada a tiempo para la exposición mundial de Lisboa, inaugurada en mayo de 1998.

Iniciada la construcción en febrero de 1995, el puente se abrió al tráfico el 29 de marzo de 1998, habiendo costado 180.000 millones de escudos (1.000 millones de dólares) de los cuales 130.000 millones (720 millones de dólares) se destinaron a la construcción.

A continuación se describen las soluciones implementadas para superar estas dificultades, los procedimientos usados en la ejecución, principalmente de los pilotes, así como una breve descripción del proyecto.

GEOLÓGIA

En la preparación del Concurso para la construcción del puente, el dueño de la obra efectuó un conjunto de sondeos que fueron posteriormente completados por la compañía

- a) Depósitos aluviales del Holoceno y del Pleistoceno;
- b) *Bed-rock* bajo los depósitos aluviales, formado por materiales Pleio-Pleistocénicos.

El máximo grosor observado de los depósitos aluviales fue de 78 m. De media el grosor a lo largo del Viaducto Central varía entre los 60 y los 70 m.

Podemos definir cinco subunidades, constituyendo las primeras cuatro unidades una estructura común de las formaciones aluviales de limos, arcilla limosa (lodos), con lentejones de arena fina y arena, arena lodosa, a veces con conchas. En la base de estos depósitos aluviales existe una capa de cascajo, con arena, y ocasionalmente *boulders*, a veces bastante concentrados haciendo que el equipo de perforación tuviese grandes dificultades para atravesar esta capa.

Los materiales del Pleio-Pleistoceno incluyen básicamente arena fina tosca levemente cimentada, a veces levemente limosa y frecuentemente con cascajo fino.

La estructura geológica de esta unidad se caracteriza por una estratificación más o menos regular, con una ligera inclinación hacia el Este de unos 3,5 grados.

b) Viaducto Norte

La zona del Viaducto Norte está formada por los materiales estratificados pertenecientes al Mioceno, siendo ésta más o menos regular con una ligera inclinación hacia el Este de unos 3 a 5 grados.

Se identificaron cuatro unidades fundamentales:

- M1 Arcillas, arcillas limosas y argilitas;
- M2 Limos arcillosos, arena fina y areniscas;
- M3 Arenas finas arcillosas, arenas finas limosas, y arenas muy finas;
- M4 Areniscas, caliza margosa muy conchifera, arenisca calcárea.

Los cimientos fueron directamente a las formaciones miocénicas, cerca de 4 a 5 metros y donde había problemas con niveles de agua, se ejecutaron pilotes de ϕ 700 y 800 mm fundadas en las areniscas y argilitas.

c) Viaducto de la Expo

Corresponde al inicio del valle de aluvión. A los depósitos de aluvión, les siguen las formaciones miocénicas mencionadas para el Viaducto Norte.

d) Viaducto Sur

El terreno en la zona del Viaducto Sur está formado por 3 grandes unidades:

1. Arenas superficiales;
2. Depósitos aluviales de la edad del Holoceno y del Pleistoceno;
3. *Bed-rock* bajo los depósitos aluviales formados por materiales Pleo-Pleistocénicos.

El máximo grosor observado en los depósitos de aluvión estuvo en torno a los 69 m, disminuyendo en dirección a la margen izquierda hasta alcanzar los 25 m.

Las características de estas dos formaciones son las mismas que las mencionadas para la geología del Viaducto Central.

CIMENTOS INDIRECTOS

La recomendación respecto a los cimientos, teniendo en cuenta que cada pilote debe tener una capacidad de entre 20.000 KN y 60.000 KN, apuntó hacia los pilotes moldeadas *in situ*, utilizando como líquido estabilizador bentonita o polímeros en los pilotes en tierra, y estacas clavadas con tubo metálico en toda su longitud, o sólo en las capas aluviales más blandas, con estabilización con bentonita en las capas inferiores, en los pilotes del río.

En los pilotes en la que la estabilización de los agujeros se hizo mediante bentonita, los niveles de agua fueron supervisados, ya que los niveles más elevados de las aguas podían afectar a la apertura de los agujeros. Fueron realizadas un total de 1916 pilotes.

En resumen, las soluciones aplicadas para los cimientos indirectos tuvieron en cuenta las características geotécnicas y las condiciones de ejecución, en el río o en tierra.

Acceso Norte, Viaducto Norte y Viaducto de la Expo

Los pilotes fueron moldeadas *in situ*, haciéndose la estabilización de los agujeros con entubamientos provisionales, bentonita o polímeros.

En el Acceso Norte y en el Viaducto Norte, con pilotes de ϕ 700 mm y ϕ 800 mm en un total de 3.400 m y 1.900 m, moldeadas *in situ*, los tubos fueron estabilizados mediante un entubamiento provisional siempre que se hizo necesario.

En el Viaducto de la Expo los pilotes, de ϕ 1.700 mm con tubo metálico definitivo en las formaciones aluviales, eran perforadas con auxilio de polímeros en las formaciones miocénicas, donde penetraban cerca de 18 m.

Las longitudes de los pilotes variaron de 20 a 43 m, alcanzando las 87 pilotes un total de 2.935 m.

Puente Principal

Las elevadas cargas con un número limitado de pilotes, condujeron a un total de 148 pilotes con diámetros de 2.200 mm, perforadas con bentonita y con tubo metálico

perdido en las capas más blandas, y armadas y hormigonadas en toda su longitud.

Las 44 pilotes de las 2 torres alcanzaron profundidades de -43 NGP en la Torre Norte y -57 NGP en la Torre Sur.

Viaducto Central

Los pilotes, de tubo metálico clavado en toda su longitud, con ϕ 1.700 mm y hormigonadas únicamente en su parte superior, lo fueron por las razones indicadas antes.

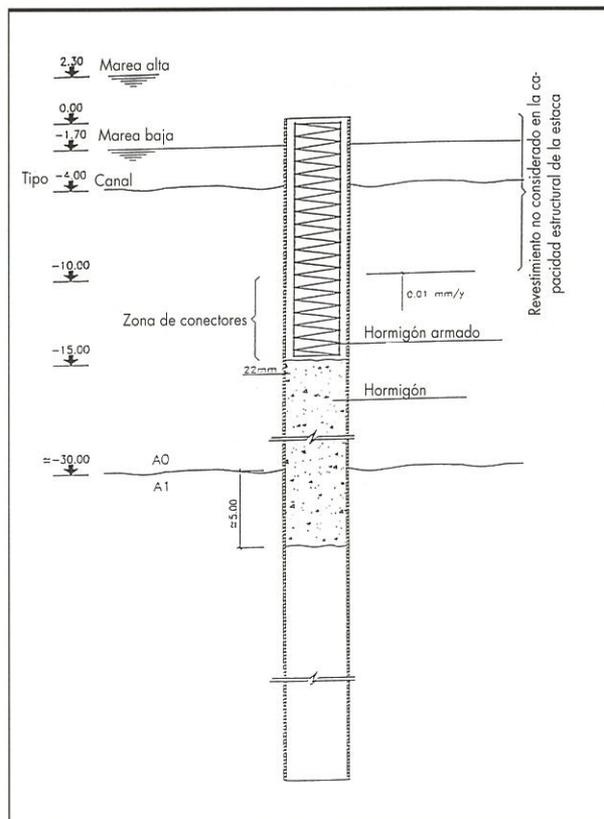
Se clavaron 584 estacas en 73 pilares, haciendo un total de 40.762,40 metros, variando su longitud entre los 64 y los 95m (pilar 59).

Los cimientos de las 64 pilotes de los 8 pilares se hicieron con capacidad para resistir el impacto de los barcos y 2.200 mm de diámetro, y la tecnología de ejecución fue la misma que la del puente principal, por razones de capacidad de carga.

Los cálculos preliminares indicaban que los pilotes debían tener la punta en la última capa de los depósitos aluviales arenosos con cascajos compactos (a3), o en el sedimento Pleio-Pleistoceno.

Los principales problemas ligados a la ejecución de los pilotes en el río, o sea, 856 pilotes fueron: los 7.900 m de longitud de la obra; las mareas con una amplitud máxima de 4,00 m; los 1,20 m de amplitud de las vigas; las corrientes en superficie que alcanzaban de 3 a 4 nudos; la batimetría, que obligó a la ejecución de un canal de 200 m de longitud que permitía el trabajo con cualquier marea; el tráfico marítimo; los astilleros y las condiciones ambientales.

La elección del tipo de pilotes, pilotes metálicas clavadas, resultó esencialmente de las condiciones técnicas y prácticas, o sea: los pilotes en tubo metálico clava-



Encajonamiento típico con relleno parcial de hormigón.

das y únicamente hormigonadas en la parte superior, además de necesitar menos medios y más industrializados, tardan 4 veces menos tiempo que los pilotes excavados y hormigonados en toda su altura.

Como ya se ha dicho, los tubos metálicos de los pilotes de 1.700 mm son clavados hasta la última capa del depósito aluvial, en el *bed-rock*, parcialmente excavados y hormigonados, hasta varias profundidades.

La cota hasta donde se coloca el hormigón viene determinada por consideraciones estructurales, es decir, allí donde el tubo metálico pueda resistir a los elevados momentos sísmicos en la base de la primera capa más blanda de la formación aluvial (a0).

En los pilotes de \varnothing 2.200 mm se utilizó un proceso constructivo diferente. Los tubos metálicos con un diámetro interior de 2.250 mm fueron introducidos con ayuda de un vibrador hasta superar las capas de arena limosa suelta, o sea, entre los -46,0 m y -52,5 m.

Con un sistema de perforación tipo, en una grúa y un balde de excavación de 2.200 mm, y con los suelos estabilizados por polímeros GEOMUD 15, los pilotes fueron llevadas hasta la última capa de los depósitos aluviales a cotas entre -67,5 y -80,00.

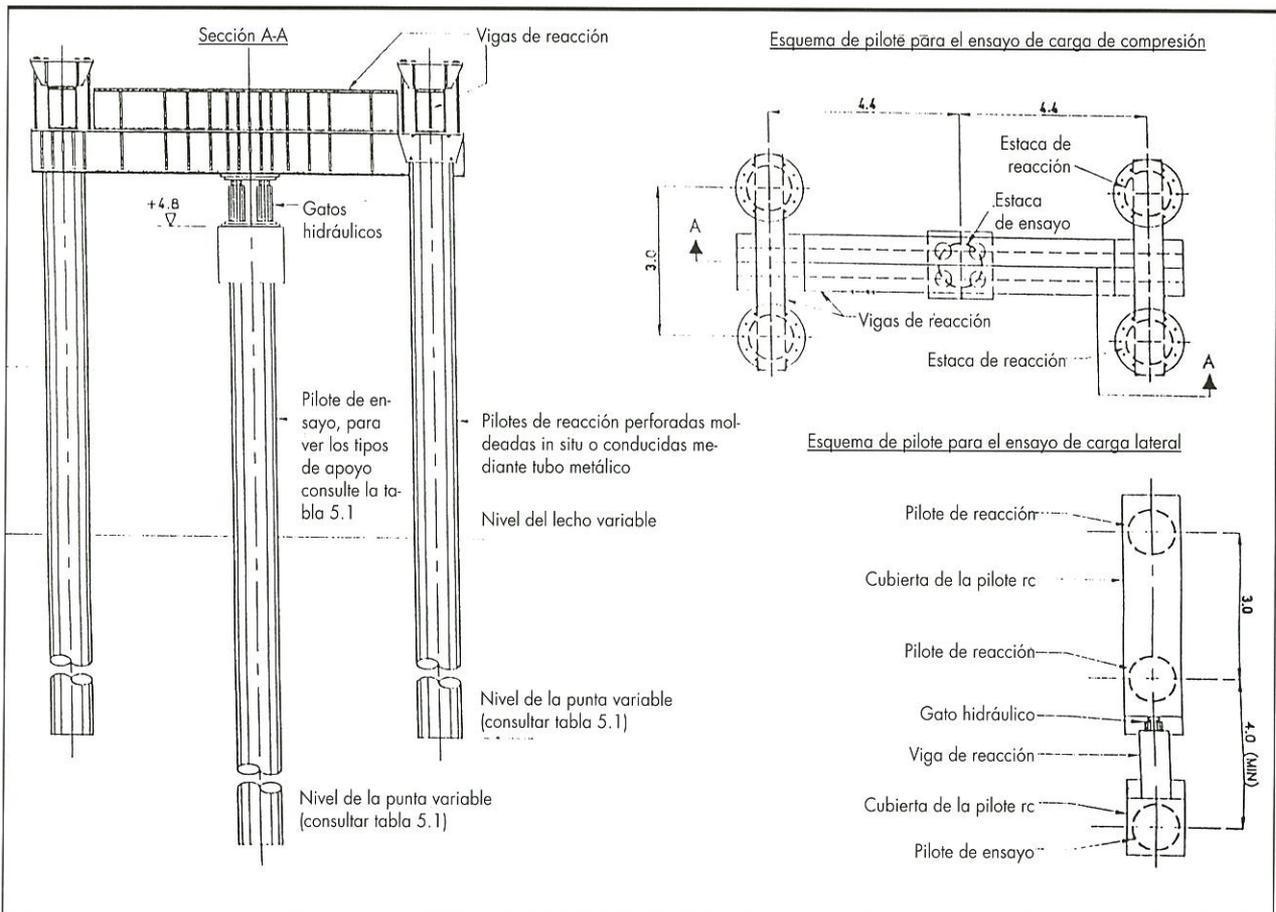
La cima del tubo metálico de todas los pilotes quedó a la cota +6.

La ejecución de estos dos tipos de pilotes obedeció a especificaciones bastante rigurosas.

Así, para los pilotes de \varnothing 1.700 mm, en las que el tubo metálico se clava hasta la punta, las actividades de ejecución de los pilotes fueron las siguientes:

- Clavado de los pilotes

1. Emplazamiento del Pontón de una dimensión de 50x22 m², equipado con una estructura de guía de los pilotes y grúa con mástil de 85 m;
2. Emplazamiento del tubo metálico en la vertical de la estructura de guiado;
3. Verificación del emplazamiento del pilar y ajuste de la verticalidad.
Téngase en cuenta que el emplazamiento de los pilotes se hizo vía satélite de forma precisa, utilizando GSP Satellite Signals. El detalle de este emplazamiento llegó hasta el punto de considerarse el radio de curvatura de la tierra integrado con el desarrollo en planta de la Travesía;
4. Como resultado del propio peso, el tubo metálico descendiendo hasta que no puede penetrar más debido a la acción de resistencia del terreno;
5. Con un vibrador de 2.300 KN de fuerza centrífuga y 1.350 r.p.m. de frecuencia, el tubo se clava hasta la máxima capacidad de aquel;
6. Estas operaciones se repiten en los cuatro pilotes de alineación;
7. Con un martillo remachador de pilotes con un Rom de 29,9 Ton y una energía de impacto de 550 KN, los tubos son clavados hasta que se obtienen los criterios del proyecto;
8. Terminada la operación de clavado del conjunto de 8 pilotes del pilar, con otro pontón de 45,00 x 11,00 m equipado con una grúa y un grab de 1.000 litros, se excavan los suelos en el interior del tubo hasta llegar a



la cota máxima de -40,00 m NGP, manteniéndose el nivel de agua en el interior;

9. Efectuada la excavación en los ocho pilotes se monta un cajón flotante apoyado en los pilotes, siendo las estacas selladas e impermeabilizadas en su conexión con el cajón y limpiándose los tubos con *air-lift*;
10. Se procede al hormigonado de el pilote con hormigón sumergido hasta una cota de cerca de -15,00 m NGP o -17,00 m NGP siendo hormigonadas las 8 pilotes en una sola operación;
11. Terminado el hormigonado de la 1ª fase, y limpia la lechada de cemento se bombea el agua, se limpia de materiales el tubo y se hormigona el pilote en otras dos fases, con la fase 2 terminando de 1,0 a 1,5 bajo la base del cajón.

Viaducto Sur

Ejecutadas 344 pilotes, 284 en tierra y 60 en el río.

Los pilotes que están en tierra, son moldeadas utilizando como líquido estabilizador bentonita, siendo 216 de \varnothing 1.800 mm y 68 de \varnothing 2.000 mm, alcanzándose una profundidad máxima de 70 m con un total de 14.600 m.

Los pilotes del río tienen \varnothing 2.000 y una profundidad de 73 m.

Acceso Sur

Los pilotes, moldeadas con estabilizador bentonita, son de \varnothing 700 mm con profundidades máximas de 35 m, habiéndose ejecutado 236 pilotes.

2. PUENTE 25 DE ABRIL - LISBOA

El puente inaugurado en 1966, estableció la primera conexión sobre el río Tajo, entre las márgenes norte y sur de Lisboa.

El puente, con cuatro carriles para el tráfico rodado, se proyectó con algunos de sus elementos estructurales preparados para soportar las exigencias de un medio Ferroviario Ligero, con un sistema híbrido de cables.

Habiendo sido proyectado pensando en un metro ligero en el tablero inferior, se decidió 30 años después, instalar un carril doble capaz de soportar vagones pesados de largo recorrido.

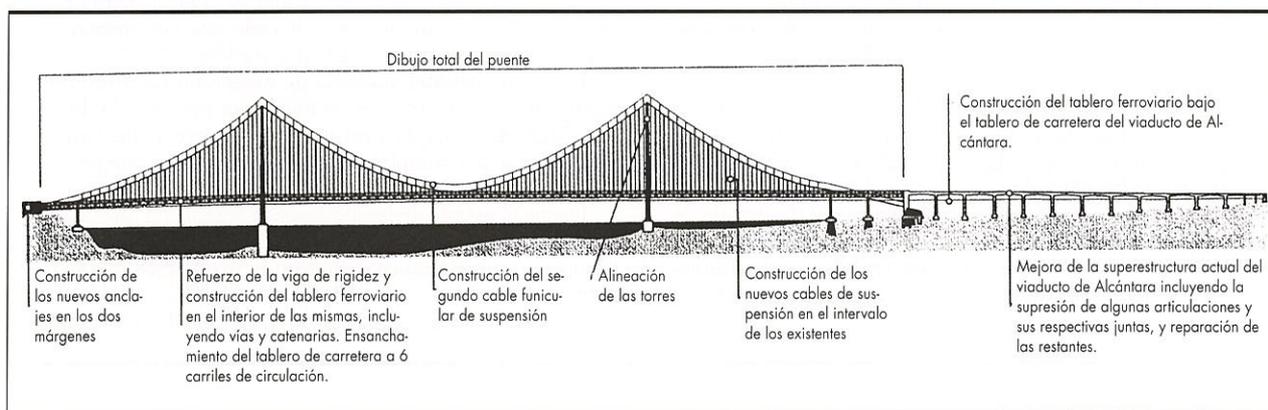
Siendo las cargas 2,5 veces mayores que las inicialmente previstas, fue necesario proceder a un refuerzo estructural del puente.

Felizmente las torres y sus respectivos cimientos tenían capacidad para soportar, sin problemas, el aumento de carga.

La compañía de proyectistas que diseñó el puente existente, idealizó una solución de refuerzo, en principio, simple, lógica y elegante.

El tablero superior de la viga de rigidez se ensancharía para dar acomodo a un nuevo carril (el sexto). El tablero inferior sería completamente sustituido, panel por panel, con una nueva estructura más resistente y naturalmente más pesada.

Las torres y los pilares de desvío serían aumentados para soportar los nuevos cables que soportan la carga extra de 160 MN (16.000 Ton) de carga.



Representación esquemática global de las obras a realizar.

ENSAYOS DE CARGA

A fin de confirmar los parámetros para los cálculos de rozamiento lateral y de la capacidad de punta de los pilotes, se realizaron dos ensayos de carga horizontal y siete ensayos de carga vertical, en los pilotes del río.

Se ensayaron dos tipos de pilotes, una pilote perforado y otro pilote clavado.

Se llegó a la conclusión de que para los pilotes perforadas los parámetros de rozamiento lateral eran superiores a los estimados y lo contrario en los pilotes clavadas.

Estos resultados llevaron a que para los pilotes más cargadas la punta fuese establecida en el estrato pleio-pleistocénico y permitió definir los criterios de clavado.

Los ensayos horizontales permitieron definir los módulos de reacción lateral de la capa a0 y la resistencia de los pilotes al choque de los barcos.

Como los amarres existentes no tenían capacidad para soportar las cargas extras de los nuevos cables, se proyectaron y construyeron nuevos macizos de amarre, uno a cada lado del existente, lo que obligó a los cables a divergir horizontalmente en los pilares de desvío, introduciendo nuevas cargas en esos pilares.

Pero estos problemas no eran nada comparados con los del montaje de los cables.

Según la American Bridge "nunca se habían colocado cables encima de un puente existente".

Otro fue el de la extensión de las torres existentes y colocación de las nuevas sillas de cables.

Otra novedad con relación a los proyectos de puentes colgantes fue el de la conexión de la estructura a los nuevos cables de suspensión después de que la estructura se hubiese deformado verticalmente debido al peso del refuerzo. Habría

sido más simple si la estructura hubiese sido reforzada una vez terminado el sistema de cables, pero esto habría añadido muchos meses al Programa de Trabajo.

La deformación ocasionada por el refuerzo trajo, al final, tantas complicaciones como su construcción. Los usuarios del puente, alertados por las informaciones periodísticas que afirmaban que la deformación preveía el colapso del puente "casi evitaban atravesarlo".

El sistema de colocación de los 4.104 m de hilos por cable, dadas las razones antes expuestas, fue diferente del habitual, en el que cada uno de los hilos se ajusta individualmente.

El sistema consistió en colocar los hilos tensados, aplicando la tensión mediante un equipo especial regulado por ordenador.

Los hilos de los dos cables pesan 3.000 Ton.

Las vigas de rigidez fueron reforzadas, siéndolo las diagonales con chapas de acero de un grosor de hasta 50 mm, requiriendo cerca de 800 agujeros cada una; y las cuerdas superiores con una o dos chapas de acero de hasta 70 mm de grosor.

La suspensión adicional hizo necesario que el refuerzo se hiciese en las zonas de influencia de los pilares. Este refuerzo se efectuó antes de la instalación del esqueleto del tablero inferior y del ensanchamiento del tablero de carretera.

El tablero inferior, así como los entramados del tablero, fueron completamente sustituidas por nuevos elementos estructurales.

Particularmente crítica aquí fue la retirada y la colocación de 200 vigas de soporte de 21 metros cada una.

Esta operación obligó a un sistema temporal de arriostramiento con la misma capacidad de los elementos a ser retirados.

La instalación de los largueros ferroviarios, de las vigas de soporte, de las riostras inferiores, de las riostras de los largueros, y de los entramados del tablero, se efectuó simétricamente dentro del puente existente, de forma que se controlase el régimen de cargas y se previniese el desarrollo de tensiones elevadas.

Esto obligó a que se tuviese que trabajar simultáneamente en seis lugares de la vía de rigidez, con seis platafor-

mas progresando hacia el norte y hacia el sur, a partir de cada torre, y desde el centro del puente.

El transporte de los elementos estructurales se resolvió mediante 4 grúas suspendidas de un camino de rodaje por debajo del tablero de carretera a lo largo de los 2.350 m de viga, que pensamos que es el mayor del mundo.

Las juntas de expansión instaladas en los extremos norte y sur del puente, si no son las mayores, son de las mayores construidas hasta hoy, estando preparadas para un movimiento de 1,5 m.

Los cables secundarios, una vez compactados, tienen un diámetro de 354 mm, cerca de la mitad de los existentes 586 mm, estando constituidos por 19 cordones con 216 hilos por cordón, sumando un total de 4.104 hilos por cable.

Una vez compactados los cables e instalados los cables de suspensión, se procedió a la transferencia de las cargas.

El proyecto se elaboró partiendo de que los cables existentes soportarían la plataforma de la carretera, incluyendo la nueva estructura de ensanchamiento del tablero, mientras que los nuevos cables soportarían las cargas del tablero ferroviario.

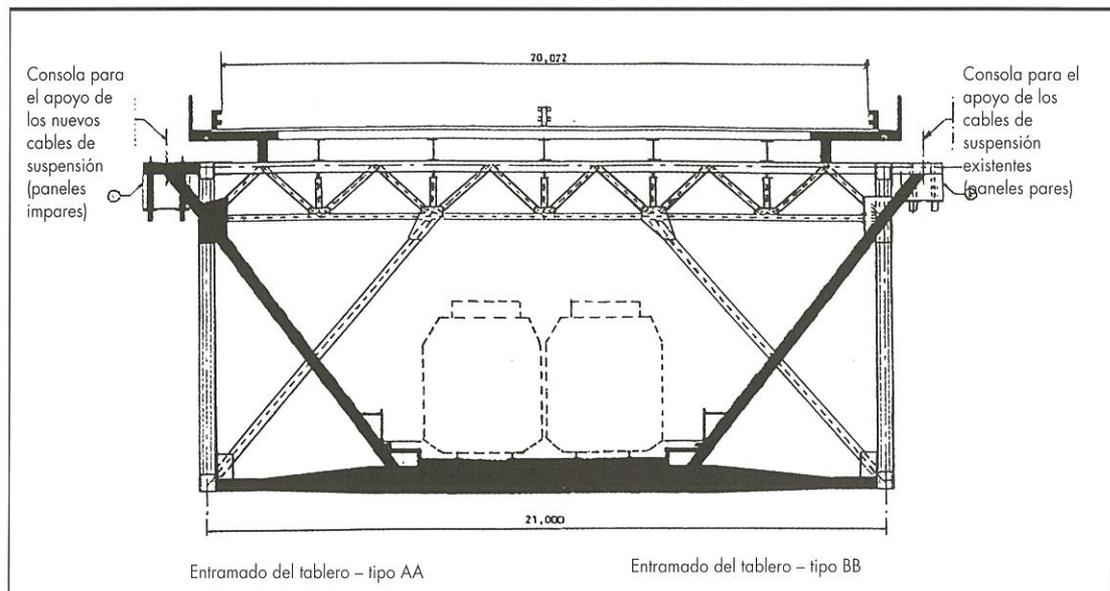
El proceso de transferencia parece simple pero fue extremadamente complejo, realizado en nueve etapas con 16 gatos simultáneamente, de forma que se pudiesen controlar las tensiones instaladas.

Las nuevas sillas de sesgar cables en la parte superior de las torres, fueron ajustadas progresivamente a su posición final al mismo tiempo que se transferían las cargas.

El puente 25 de Abril se transformó en el primer gran puente con un segundo cable colocado una vez construido, y el primero al que se le añadió una vía férrea.

La estructura del viaducto de acceso norte al puente, se caracteriza por 12 tramos de hormigón pretensado de 76,00 m y 74,20 m de luz, con rótulas en el centro de los vanos sin establecerse por completo la continuidad en lo que se refiere a las rotaciones de flexión.

Dados el estado de las juntas y la formación de fisuras en las dovelas anexas, el viaducto necesitaba obras de reforma, obras que se hicieron realidad con la instalación de la vía férrea.



La rehabilitación del tablero de carretera consistió en el:

1. Cerramiento de las juntas de los tramos 2 a 6 y 8, 9 y 11;
2. Pretensado exterior con cables anclados en bloques de hormigón;
3. Inyección de las fisuras existentes en el tablero;
4. Refuerzo por sellado de una malla de armadura en zona localizada de los banzos inferiores de los cajones del tablero;
5. Sustitución de las juntas de dilatación de los tramos 1, 7, 10 y 12;
6. Reparación general y pintura general de la estructura.

La eliminación de algunas juntas de conexión entre consolas estuvo condicionada por la rigidez de los pilares, por la instalación del tablero ferroviario y por la conexión al pilar P7.

La superestructura que soporta la vía férrea, es una estructura mixta de acero-hormigón constituida por una viga cajón de alma llena interconectada por diafragmas, en la cual se apoya un tablero de hormigón armado.

El asentamiento de la vía es en vía lastrada.

El trabajo de montaje de la viga de cajón, a 50 m de altura sobre el edificio y calles, sin acceso por la vertical, se hizo por empuje a partir de cada extremidad y hacia el medio.

Estos trabajos se ejecutaron después de la reparación y tensionamiento de la estructura de hormigón del viaducto.

En la parte superior del cajón metálico se ejecutó una losa de hormigón armado con ≈ 1 Km. de longitud.

CIMENTOS INDIRECTOS

Los nuevos macizos de amarre de los anclajes norte, se fundaron sobre un conjunto de 136 estacas de hormigón armado moldeadas *in situ*, con 1.500 mm de diámetro.

Cada macizo tiene en planta unas dimensiones máximas de 44,25 x 22,50 metros y cerca de 30,5 metros de altura, situándose la cota de paso a la cota -1.

Las acciones que condicionaron el dimensionamiento fueron el peso propio y la acción permanente de cable, las fuerzas horizontales que derivan de la acción de un sismo reglamentario de corta duración, pero de gran intensidad. Por eso, los pilotes realizados, además de transmitir las cargas verticales provenientes del macizo al sedimento rocoso, tendrían, además, que transmitir al terreno las fuerzas horizontales resultantes de la acción del cable y de la acción del sismo.

Los pilotes, por razones de cálculo, tenían que penetrar $\geq 2,00$ m en basaltos compactos poco alterados y sanos, una vez perforados los basaltos muy alterados y medianamente alterados.

Los pilotes atravesaron de 10 a 15 m de rellenos heterogéneos, con la introducción de revestimiento metálico perdido, hasta penetrar en las formaciones basálticas con la utilización de un vibrador suspendido en una grúa.

La penetración en las formaciones basálticas se efectuó de forma que se evitase el paso de los terrenos granulados hacia el tramo inferior del pilote.

Las paredes de los agujeros situados bajo el tubo metálico, aunque autoportantes, fueron estabilizados con bentonita.

En total se ejecutaron 136 pilotes de ϕ 1.500 mm con una longitud de hasta 30 m.

La perforación de las formaciones basálticas se realizó con una herramienta especial de corte con 1,50 m de diámetro.

La sonda utilizada en la perforación de roca y otras inclusiones duras, trabajaba con una tensión a compresión de 100 MN/mm² (1.000 Kg/m²), siendo los fragmentos aspirados de la superficie de corte.

Estas sondas con *roller bits* están formadas por dos componentes fundamentales, la cabeza de inyección y la sonda propiamente dicha, consistiendo en un tubo base de pared doble, una camisa de conexión a la cabeza de inyección, un anillo cortante, conductos de inyección de aire comprimido y tubos de aspiración, así como una caja colectora para los fragmentos cortados.

Los fragmentos cortados son retirados completamente mediante la inyección de aire comprimido, de forma que se reduzca al máximo el desgaste y se asegure un rendimiento de penetración optimizado.

La sonda puede recuperarse recurriendo a un *grab*, o destruirse y retirarse utilizando un tratado de roca.

3. PUENTE SOBRE EL RÍO SADO

El puente sobre el río Sado se inserta sobre el tramo norte de la A2 - Autopista del Sur. Esta obra de arte, que tiene un total de 1.754 m, está formada por un puente sobre el río Sado con 302 m (80+135+87 m) y el viaducto de accesos con 1.425 m (33 vanos a 44 m). Por las características de su dimensión, plazo de ejecución corto, condiciones geológicas difíciles y condiciones climáticas bastantes complicadas, supuso un proyecto y obra de ingeniería bastante destacable.

Hay que resaltar el cuidado especial puesto en la arquitectura de la obra, en la iluminación y en el encuadre obtenido con el objetivo de valorizar el conjunto en el entorno de la zona. Habiéndose iniciado el clavado del primer pilote el 07-01-1998, el tablero oeste se abrió al tráfico el 14-07-1998.

La carretera tiene unas características de trazado dignas de una obra de arte, con dos tableros paralelos cada uno de 18,60 m de anchura, pasando la rasante sobre el río Sado a cerca de 18 m de altura máxima.

En el puente, cada tablero está formado por una viga en cajón unicelular con una altura variable entre 3,6 m (1/2 vano) y 8 m (apoyo). Su banzo superior tiene cerca de 11 m de anchura, y lateralmente tiene dos consolas con cerca de 4,5 m cada una. La losa central del banzo superior tiene 0,36 m de grosor. Las consolas tienen un grosor variable de entre 0,20 m y 0,50 m y las almas 0,50 m de grosor, y el banzo inferior un grosor variable de 1,20 m en los apoyos y 0,25 en los vanos.

El tablero está pretensado longitudinalmente mediante cables en el banzo superior (cables de las consolas) y por cables de continuidad en las zonas centrales de los vanos. Está, además, prevista la colocación, si fuese necesario, de cables adicionales de pretensado, exteriores e interiores.

Los apoyos intermedios (P1 y P2) son de hormigón armado y están formados por pilares que dan continuidad a los pilotes de cimiento, existiendo cuatro pilotes de ϕ 2,5 m por apoyo.

Cada dos pilotes originan una lámina de hormigón que soporta el tablero.

El pilar de transición P3 es de tipo "pilar-pilote" con ϕ 2,0 m y es semejante al referido más adelante para los pilares de transición del viaducto.

El viaducto está compuesto por tres módulos independientes de 484 m de longitud cada uno.

En el viaducto cada tablero está formado por una viga en T, de hormigón armado pretensado, con dos vigas de altura constante de 3,6 m. La losa intermedia tiene 0,30 m de grosor, variando a 0,50 en las extremidades.

Las almas de las vigas tienen un grosor variable de 1,40 m en los apoyos y 0,60 en los vanos.

Los apoyos intermedios son de hormigón armado y están constituidos por "pilares-pilotes" con ϕ 1,50 m, existiendo dos por apoyo, interconectados por una viga transversal superior. Los pilares de junta y el P3 están formados por dos grupos paralelos de pilares alejados, de 3 y 4 m respectivamente.

En el lugar de la obra hay una formación de aluvión de cara de 30 metros de grosor, formada por una sucesión de aluviones lodosos y areno-lodosos, que terminan en un terreno formado por aluvión de base que hace la transición hacia las areniscas pertenecientes al Mioceno.

Un factor importante que caracterizó esta estructura y que fue fundamental para el plazo tan corto en que la misma fue ejecutada, es el de que no hay macizos de encabezamiento de los pilotes. Se trata de una estructura que hemos designado "pilar-pilote".

Los pilares están hechos de hormigón armado, de sección circular constante a lo largo del fuste. Los cimientos de los pilares son indirectos, de hormigón armado con sección transversal igual a dos pilares, considerándose pilar encima de la cota del suelo y considerándose pilote debajo de la misma, designándose así todo el conjunto como "pilar-pilote".

Los pilotes, y por lo tanto los pilares, tienen de sección transversal 2.500 mm en los pilares P1 y P2 del puente, 2.000 mm en el pilar P3 de transición del puente hacia el viaducto y 1.500 mm en todos los pilares del viaducto de acceso.

Teniendo en cuenta las condiciones del terreno, los pilotes de esta obra se hicieron de hormigón armado, moldeadas *in situ*, haciéndose la perforación a rotación con extracción de terreno soportada por entubamiento metálico perdido en los pilotes de 2.500 mm y 2.000 mm, y entubamiento metálico provisional en los pilotes de 1.500 mm.

Para garantizar un comportamiento adecuado de la estructura en fase de servicio, los pilotes se trataron con inyección de lechada de cemento en la punta.

Se verificó la capacidad de resistencia del pilote, habiéndose estimado la resistencia de la punta y el rozamiento lateral según una campaña de sondeos efectuados en cada uno de los apoyos.

El cálculo se hizo sobre la base de la resistencia de la punta, q_c del ensayo CPT, de la naturaleza del terreno y de la tecnología de ejecución del pilote.

La verificación de la seguridad de estados límite últimos, conforme al Eurocódigo 7, se realizó por comparación entre las acciones de cálculo F_{cd} , que son resultado de las acciones aisladas, convenientemente combinadas y afectadas por los factores de aumento parciales especificados, y la capacidad de resistencia de cálculo del elemento estructural, R_{cd} , que resulta, a su vez, de la aplicación de factores de minoración sobre los valores de resistencia medidos.

$$F_{cd} < R_{cd}$$

Como modelo de cálculo en el análisis estático del Viaducto de Acceso, el proyectista consideró un pórtico plano con 11 tramos. Se tuvieron en cuenta las características del suelo de los cimientos.

Para determinar la rigidez de los muelles que simulan el comportamiento del conjunto pilote-terrenos, se recurrió a un modelo en el que el pilar-pilote se discrimina en un número finito de segmentos y la resistencia del suelo a los desplazamientos laterales se reproduce a través de muelles horizontales.

Para el análisis sísmico el proyectista recurrió a un modelo pseudo tridimensional, formado por la unión de siete modelos bidimensionales longitudinales y transversales, simulando el terreno, cimientos y estructura.

A estos modelos les fue impuesta, a nivel del *bed-rock*, la acción sísmica.

Fueron realizadas dieciséis pilotes de un diámetro de 2.500 mm, con la longitud de 29,4 m y 49,6 m, ocho pilotes de ϕ 2.000 mm con una longitud de 53,0 m y 144 pilotes de ϕ 1.500 mm con longitudes que variaban entre los 17,5 m y los 54,6 m.

Las penetraciones en las formaciones miocénicas, dadas las elevadas cargas de los pilotes, fueron de 16 m para los pilotes de ϕ 2.500 mm y 7,5 m para los pilotes de ϕ 2.000 mm y de 6 a 10 m para los pilotes de ϕ 1.500.

El factor "pilote-pilar" obliga a una rigurosa implantación del centro de cada pilote, con una variación máxima de 4,5 cm.

Se realizaron un total de 6.031 m de pilotes de ϕ 1.500 mm, 424 m de pilotes de ϕ 2.000 mm y 632 m de pilotes de ϕ 2.500 mm, en un plazo de 2,5 meses.

En este plazo se incluye la inyección de los pilotes.

