

**II CONGRESO DE ACHE**  
**PUENTES Y ESTRUCTURAS EDIFICACIÓN**

**Realizaciones**  
**Puentes**



**Foto aérea (estado avance febrero 2002)**

**Nuevo Puente arco Infante D. Henrique sobre el río Duero en Oporto, de 280,00 m de luz**

**Francisco Millanes Mato**  
**Antonio Adão da Fonseca**  
**Luis Matute Rubio**  
**Renato Bastos**

**IDEAM, S.A.**

## 1. INTRODUCCION.

El nuevo puente Infante D. Henrique sobre el río Duero en Oporto debe establecer una nueva conexión vial entre la Alameda das Fontainhas en el caso histórico de Oporto, en una zona de características urbanas muy consolidadas y próxima a la zona declarada Patrimonio Histórico de la Humanidad, con la vecina ciudad de Gaia, en la margen izquierda del río, con características urbanas poco estructuradas, a las que sin duda el nuevo puente proporcionará un fuerte impulso de ordenación y prosperidad.

En nuevo vial de enlace se plantea elevado, a una cota alta en el entorno de los 70.0 metros, sobre el río Duero y el ribereño paseo de Eiffel que discurre a lo largo de la margen derecha del río, entre los notables puentes metálicos de Seyrig y de María Pía, de su maestro Gustavo Eiffel, así como el más reciente de S. João, del conocido ingeniero portugués Prof. Cardoso (foto portada).

El entorno donde se ubica el puente presenta unas laderas graníticas muy escarpadas, más agrestes en el lado Gaia y con terrazas escarpadas en el lado Oporto. El cauce del río Duero en dicha zona tiene una anchura aproximada algo superior a los 160.0 m, que es la luz entre arranques del puente de María Pía.

El nuevo puente Infante D. Henrique, en solución con arco laminar muy rebajado de hormigón, de 280,00 m de luz, resultó ganador del Concurso Internacional de Proyecto y Construcción convocado por el Metro de Oporto.

<b>PUENTE DE OPORTO</b>	
Propiedad:	Metro de Area Metropolitana do Porto S.A.
Proyecto y Apoyo Técnico a Obra:	IDEAM S.A. & AFA Consultores Engenharia Lda. José Antonio Fernández Ordoñez Francisco Millanes Mato António Adão da Fonseca Luis Matute Rubio Arturo Castellano Lorenzo Fernández Ordóñez (Arquitecto) Renato Bastos Pedro Morujão
Tipo de concurso:	Internacional de Proyecto y Obra (1998)
Empresas Constructoras Adjudicatarias:	EDIFER & NECSO Consorcio
Jefe de Obra:	Ignacio Poviña

## 2. LA SOLUCIÓN PROYECTADA

La práctica imposibilidad de ubicar pilas en el cauce del Duero, junto con la complicada topografía de la zona, ha dado lugar a la construcción en Oporto de una serie de puentes de gran luz, como los antes citados y el puente de Arrábida, más aguas abajo, que con 270.00 m. fue récord del mundo de puentes arco en 1963, todos ellos obras singulares y muy notables en el ámbito de la historia de los puentes.

El concurso de proyecto y obra premiaba los aspectos de concepción y diseño sobre los estrictamente económicos, en la búsqueda de una solución con nivel tecnológico acorde a la época y cuyo diseño tuviera cualidades estéticas cuidadas y se integrara adecuadamente en un entorno urbano muy definido y con gran personalidad.

Con estas premisas, la solución proyectada se concibió desde la búsqueda del máximo respeto a:

- la historia de la ingeniería, huyendo de cualquier intento de concurrencia con los restantes puentes así como de la retórica de la ornamentación. Se buscaba un discurso técnico riguroso y avanzado basado en la sencillez y pureza geométrica y estructural;
- la ciudad , huyendo de cualquier pretensión de simbolismo que introdujese elementos extraños de fuerte impacto sobre un entorno de gran calidad;
- el río, y los puentes vecinos de Eiffel y Seidig, con arcos muy peraltados que arrancaban de las márgenes del río y cuya clave se ubicaba a una cota similar a la del nuevo puente.

No quisimos alterar por tanto la visión de ambos puentes desde la cota baja a la que discurre el paseo G. Eiffel (fig. 1 y 2), lo que nos obligaba a plantear soluciones más rebajadas que arrancaran de una cota más alta, en las laderas graníticas de ambas márgenes, y nos acercaba a la solución de 270.0 m. del puente arco de Arrábida.



**Fig. 1: Vista desde el paseo de Eiffel**



**Fig. 2: Vista avance en voladizo desde el puente de Zeidig (marzo 2002)**

La elevada cota del puente y su integración urbana desaconsejaba en nuestra opinión, cualquier alternativa de tipo atirantado. Las soluciones de tramo recto, continuo o en pórtico, resultaban asimismo inadecuadas dada la luz a salvar y la ausencia de pilas en el río y en las márgenes. Se recurrió por tanto a una solución tipo arco (fig. 3.) que se adaptaba perfectamente a las condiciones de cimentación de las laderas y que, por otra parte, es una tipología clásica de los puentes de Oporto.



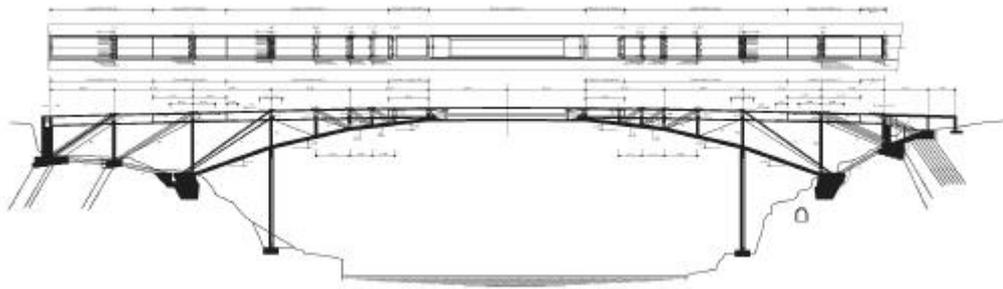
**Fig. 3: Fotomontaje alzado puente**

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.**

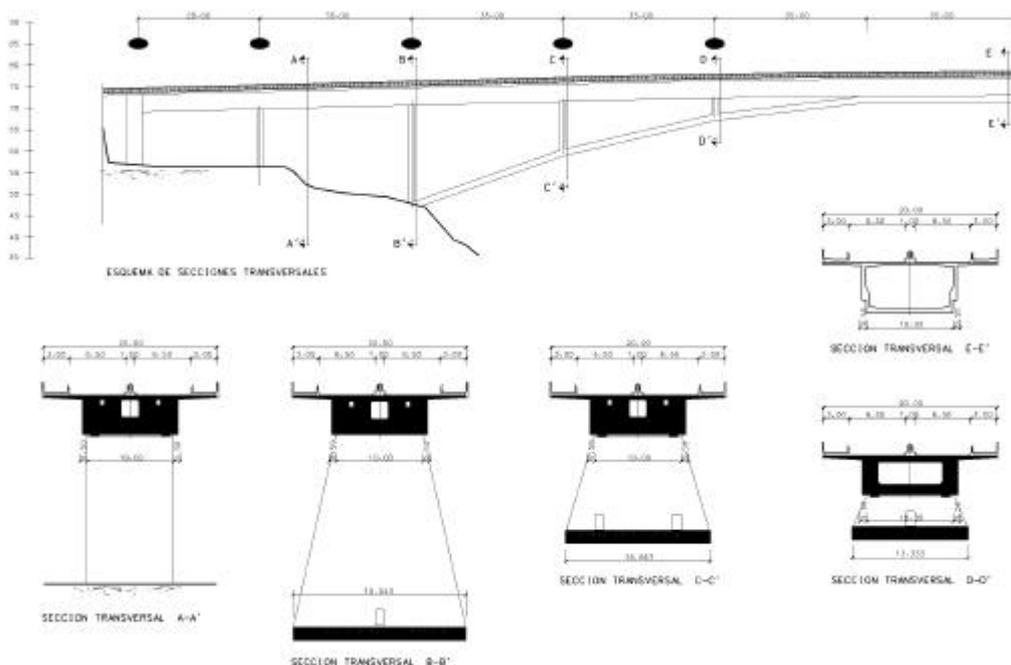
La búsqueda de la máxima diafanidad y mínima alteración visual de los puentes vecinos nos condujo a forzar la cota de arranque del arco en las laderas, con lo que se obtuvo una luz importante, de 280,0 m. la séptima del mundo en el momento del proyecto, (fig.

4), y un gran rebajamiento, de  $L/11.20$ , para una flecha en clave del orden de 25,0 m, **muy superior al resto de arcos de gran luz actuales.**

Este fuerte rebajamiento, se halla claramente fuera del ámbito aconsejable en puentes arco, que oscila entre  $1/6$  y  $1/10$ . Como es bien conocido, por encima de estos límites se incrementan de manera espectacular los esfuerzos axiales del arco, así como las flexiones bajo el efecto de las sobrecargas móviles, los posibles asentamientos diferenciales y los efectos térmicos y reológicos, que puedan llegar a producir descensos de flecha importantes y la aparición de efectos hiperestáticos por deformaciones de 2º orden no despreciables.



**Fig. 4: Alzado fase constructiva**



**Fig. 5: Secciones**

La solución estructural proyectada, como consecuencia de lo anterior, no es una solución arco clásica, sino una estructura híbrida dintel rígido-arco laminar en la que la flexibilidad del arco se apoya en la gran rigidez del dintel, de 4.50 m de canto ( $\cong L/62.2$ ) (fig. 5). La pequeña rigidez a flexión del arco laminar evita que las flexiones generadas por los efectos anteriores sean recogidas por el arco, siendo directamente absorbidas por la gran rigidez del dintel con pequeñas deformaciones que eliminan prácticamente los efectos de 2º orden antes citados.

El nuevo puente sobre el río Duero en Oporto tiene una longitud total de 371.0 m entre estribos y está constituido por un dintel continuo de canto constante en sección cajón de 11.0 m de ancho y sendos voladizos laterales de 4.50 m de luz, para materializar una plataforma total de 20.0 m de anchura. La longitud total está modulada en tramos de 35.0 m sobre los que flexa el dintel rígido apoyándose en las pilas de acceso y en las pilastras de vinculación tablero-arco.

El arco laminar, de canto constante de 1.50 m ( $\cong L/186.7$ ), presenta un perfil longitudinal poligonal con ligeros quiebros en el entronque con las pilastras proyectadas cada 35.0 m. En los 70.0 m centrales, el arco se vincula excéntricamente a la sección del tablero, sin solución de continuidad, con lo que se obtiene una sección total de 6.00 m de canto, aunque el paramento exterior del tablero presenta un ligero quiebro que mantiene la continuidad formal de los respectivos prismas de dintel y arco en todo el tramo central del puente.

El arco, de canto constante, hace frente al incremento de esfuerzos axiales hacia los arranques a base de un aumento del ancho, área, de la sección, cuya planta sigue un contorno poligonal desde los 10.0 m de ancho en el tramo central hasta alcanzar los 20.0 m en los arranques del arco.

Desde el punto de vista formal, la sencillez geométrica buscada se refleja en la presencia de paramentos siempre planos que sólo se quiebran en las intersecciones con el contorno poligonal del arco en la vertical de las pilastras moduladas cada 35.0 m.

Los dos primeros tramos del arco, de gran anchura, se aligeran interiormente con objeto de reducir un peso que penalizaría de forma no despreciable al pretensado del dintel y a la flexión del peso propio del arco durante el avance en voladizo luego descrito.

Las cuantías de materiales del tablero pretensado son las siguientes:

- hormigón:  $0,80 \text{ m}^3/\text{m}^2$  (C50/60)
- acero pasivo:  $200 \text{ kp}/\text{m}^3$  ( $160 \text{ kp}/\text{m}^2$ )
- acero activo:  $56 \text{ kp}/\text{m}^2$ , proyectado recto en las tablas de las almas lo que permite reducir estrictamente el espesor de las almas, por otra parte sobrados frente a esfuerzos cortantes.

El arco, en C60/70 lleva una cuantía de acero pasivo algo elevada  $250 \text{ kp}/\text{m}^3$ , como consecuencia de la elevada esbeltez mecánica ( $\lambda = 81.0$ ), frente a los efectos de pandeo bajo fuertes niveles de compresión.

Por su importancia estructural conviene destacar el diseño proyectado para el nudo de conexión entre arco, dintel y tramo central, que debe garantizar una correcta transmisión de esfuerzos axiales y flectores de gran magnitud entre las diferentes tablas y alas del cajón hueco y el arco macizo que incide excéntricamente en él.

Al mismo tiempo, debía proyectarse un diseño sencillo de ejecutar que no alterase básicamente el sistema de encofrados y avance previsto para el montaje por voladizos sucesivos utilizado para el conjunto del dintel. La simplicidad y eficacia del sistema en célula triangular proyectado pensamos que cumple dichos objetivos, con una respuesta estructural muy eficaz que se comentará más adelante.

#### **4. ANALISIS DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL PUENTE.**

La respuesta de la estructura corresponde sensiblemente al esquema estructural de arco laminar (dintel continuo rígido antes descrito).

- ausencia de flexiones importantes en el arco, salvo las inevitables de compatibilidad en el arranque empotrado, consecuencia de la pequeña rigidez del arco, de manera que los efectos de pérdida de forma por acciones térmicas y reológicas son rápidamente contrarrestados por la rigidez del dintel que impide que dicha pérdida de forma llegue a alcanzar valores importantes. Por tanto, las oscilaciones de esfuerzos axiales en el arco son relativamente moderadas.
- comportamiento básico del tablero como dintel continuo sobre muelles elásticos cada 35.0 m, lo que genera un importante flector negativo en la sección ubicada sobre el arranque del arco.
- El tablero colabora muy sensiblemente con el arco en la resistencia a las cargas del vano: hasta un 15% para las acciones permanentes y sobrecargas sobre vano completo, porcentaje que aumenta muy sensiblemente en las hipótesis de sobrecargas móviles no simétricas, evitando la aparición de las habituales flexiones elevadas en riñones bajo este tipo de sollicitación cuyo antifunicular se separa de la forma del arco.
- En la unión arco/dintel, la excentricidad entre la directriz del arco y la del cajón del tramo central de 70.0 m. impone una flexión negativa localizada muy elevada, que elimina prácticamente las flexiones positivas en dicho tramo central, manteniéndose en compresión compuesta bajo las envolventes pésimas de sobrecargas, y permitiendo eliminar completamente el pretensado en dicho tramo. Por el contrario, la compatibilidad en la zona de dintel adyacente aumenta sensiblemente las flexiones positivas en el mismo.

Desde el punto de vista del análisis estructural, destacaremos seguidamente de forma resumida aquellos aspectos de mayor interés:

- a) Análisis evolutivo diferido preciso para un control adecuado de las redistribuciones de esfuerzos de carácter reológico. Se realizó con el programa DIFEV, del autor de este artículo, contrastado en el control y proyecto de otras estructuras singulares. El análisis discretizó la secuencia del montaje en 58 fases de cálculo y sus resultados fueron corroborados por cálculos alternativos realizados con programas evolutivos portugueses. Se realizaron diversos cálculos para conocer y garantizar una adecuada

respuesta en servicio de la estructura para un cierto rango previsible de oscilación de los parámetros de fluencia y retracción, basados en ensayos realizados al efecto.

- b) Análisis local del mecanismo de transmisión de esfuerzos en el nudo de conexión arco/dintel. El diseño y dimensionamiento de dicho nudo se abordó inicialmente con un esquema de bielas y tirantes aplicado a las distintas posibles combinaciones de esfuerzos transmitidos a través de dicho nudo.

Posteriormente dicho dimensionamiento fue contrastado en un modelo preciso de elementos finitos (ANSYS) tridimensionales que básicamente confirmó los resultados del esquema de bielas y tirantes utilizado.

Otro aspecto controlado mediante dicho modelo tridimensional ha sido el de rigidez relativa del nudo frente a la combinaciones de esfuerzos a transmitir, cuyos resultados fueron comparados con los del sistema de barras utilizado para el cálculo general de esfuerzos en la estructura, donde un nudo finito transmitía bruscamente el axil excéntrico del arco al dintel. Se verificó posteriormente que los efectos de la menor rigidez del modelo de elementos finitos, que materializaba una lógica transmisión más suave, no afectaba sensiblemente a los esfuerzos generales de la estructura y quedaba del lado de la seguridad de la zona local de discontinuidad.

- c) Análisis no lineal general, geométrico y mecánico, de la estructura en ELU, que resultaba imprescindible dado el fuerte rebajamiento del arco y su elevada esbeltez mecánica.

Se realizó según el método general no lineal previsto en los Eurocódigos, EHE y Código Modelo del 90, contemplando mediante un cálculo paso a paso bajo cargas crecientes los efectos de no linealidad geométrica y mecánica del conjunto arco-tablero, incluyendo la interacción con los efectos diferidos de fluencia y retracción, previamente estimados linealmente con el programa DIFEV. Se introdujeron los efectos de una imperfección geométrica inicial de 8,75 cm. ( $\cong L_{pandeo}/300$ ), afín a la forma de pandeo del arco, a superponer a los efectos diferidos de la flexión de peso propio del arco ( $\cong 4.5$  cm. a  $T_{\infty}$ ). El análisis paso a paso bajo cargas crecientes mostró que los efectos de la fluencia reducían de forma significativa la carga de inestabilidad (rotura) del arco, que se producía en el centro del segundo tramo. Por otra parte, se confirmó que la rigidez del dintel aseguraba en ELU la práctica inmovilidad de los puntos de paso del arco bajo las pilastras, por lo que el estudio de la estabilidad del mismo podía abordarse con suficiente precisión sobre un modelo simplificado de 3 tramos de 35.0 m. empotrados en sus extremos. Dicho modelo se

analizó con el programa PYRUS, permitiendo un exhaustivo análisis de sensibilidad frente a variaciones de diferentes parámetros: coeficientes de fluencia y retracción, imperfecciones equivalentes, resistencia del hormigón del arco y esquema de ferralla de las secciones críticas, que se optimizó para igualar la carga de rotura por inestabilidad de los diferentes tramos y mejorar así claramente el coeficiente de seguridad a pandeo del conjunto del arco.

La deformada final en el momento del colapso del arco daba una deformada final de 18.8 cm., aproximadamente 1,42 veces la deformada de primer orden de cargas permanentes diferidas más imperfecciones. Es decir, los fenómenos de carácter no lineal resultaban relativamente moderados, produciéndose el colapso por un mecanismo básicamente de rotura por agotamiento de la resistencia a compresión del hormigón.

Durante el proceso constructivo se montó el arco con una contraflecha de ejecución contraria a la forma de pandeo calculada, estimándose sus valores finales tras un estudio paramétricos de diferentes alternativas, lo que permitió aumentar sensiblemente el coeficiente de seguridad real frente al pandeo del arco.

## **5. PROCESO CONSTRUCTIVO**

Constituye sin duda el aspecto más delicado del proyecto del nuevo puente de Oporto, no sólo por la gran magnitud de los voladizos a salvar, 140.0 m, sino por la especial tipología de la estructura. La mínima rigidez del arco laminar desaconseja plantear los sistemas constructivos habituales en puentes arco más convencionales. Es, al contrario, la gran rigidez del tablero la que debe hacer frente a los esfuerzos de flexión propios del avance en voladizo. Se trata, por tanto, de plantear el montaje desde una óptica más acorde con los puentes de tramo recto en voladizos sucesivos, aunque, dado que el dintel tampoco alcanza la rigidez propia de dichas tipologías, es preciso acudir a sistema de ayuda durante el avance.

La primera decisión fue plantear un apoyo provisional sobre una pila de hormigón armado ubicada en la vertical de la primera pilastra del arco, a 35.00 m de los arranques.

Ello permitía reducir la longitud del vuelo a salvar a 105.0 m, frente a los 140.0 m. iniciales. Los momentos de vuelco o desequilibrio que se obtienen en la situación de máximo voladizo se reducen de 5000000 KN.m a 2853000 KN.m, con el consiguiente ahorro en los sistema de anclaje y contrapeso en laderas. La pila provisional alcanza una reacción máxima de 85000 KN, y su eliminación está prevista mediante cuelgue desde el tablero y corte sucesivo de dovelas inferiores, técnica ya usada en el reciente puente de Lima portugués. La voladura resulta imposible dada la presencia de circulación vial junto a la pila.

En la fase de concurso se estudió una solución clásica de atirantamiento sobre la pila provisional como ayuda a la estructura durante la fase de avance en voladizo. La solución que finalmente se va a emplear es alternativa a ella, mediante triangulaciones con diagonales pretensadas y supresión de los sistemas de atirantamiento. Se eligió tras un análisis comparativo de los aspectos técnicos, constructivos y económicos de ambas soluciones, tradicionales en puentes arco. La solución adoptada nos parece en este caso la más adecuada por varias razones:

- su mayor rigidez la hace poco sensible a los efectos térmicos y facilita el control geométrico del avance;
- si bien resultan más difíciles de controlar en obra las tolerancias de índole geométrica, las técnicas de corrección de encofrado propias del avance en voladizo tradicional son perfectamente aplicables a este caso;
- se suprime el elevado coste de los elementos provisionales adicionales propios de la solución atirantada. La estructura definitiva, arco como cabeza de compresión, tablero pretensado como cordón de tracción, y las pilastras como montantes en compresión, no se hallan prácticamente sobredimensionados por su trabajo como viga en celosía volada. Sólo aparecen sobrecostes en las diagonales pretensadas;
- la tecnología de dichas diagonales es la del pretensado convencional, trabajando a 0.60 fpu, más económico que el de los anclajes y cables atirantados trabajando a 0.45 fpu;
- desde el punto de vista técnico resultaba muy aconsejable la puesta en carga progresiva de las laderas por el esfuerzo de compresión transmitido por el arco durante el avance en voladizo. Toda la estructura se va poniendo asimismo en carga de forma progresiva. Por el contrario el sistema de atirantamiento supone una

entrada de carga brusca, tanto en la estructura como en la cimentación , menos aconsejable en nuestra opinión.

En ambas soluciones, y dada la gran esbeltez del arco, resulta necesario colgar dicho arco del tablero con barras tipo Dywidag, para no someterlo a la flexiones derivadas de su peso propio, hasta que la puesta en carga del mismo, una vez eliminadas las diagonales provisionales, aporte los esfuerzos de compresión necesarios para hacer frente a dichas acciones. Esto resulta además favorable para la resistencia a pandeo del arco, ya que las deformaciones de flexión en el arco, tanto instantáneas como diferidas, se reducen al actuar las cargas de peso propio sobre un hormigón de mayor edad. Se prevé también aplicar un sistema de contraflechas en el arco no afín a la forma de pandeo predominante, para garantizar una seguridad adicional frente a la carga última de pandeo del mismo.

En la misma línea, el carro de avance del arco va siempre colgado o soportado desde la estructura principal, para eliminar todo tipo de sollicitación de flexión, con sus deformaciones asociadas, durante el proceso de avance.

El contrapeso del enorme momento de vuelco que se produce durante el máximo avance en voladizo se realiza a través de anclajes provisionales pretensados en la ladera granítica. Con objeto de reducir al máximo la enorme magnitud de esta fuerzas de anclaje que, lógicamente, se van poniendo en carga progresivamente a medida que avanza el voladizo, se ha intentado movilizar el máximo efecto favorable del contrapeso proporcionado por el peso propio del estribo, pilas y dintel de las zonas de acceso. Esta movilización queda limitada por el coeficiente de rozamiento suelo-zapata de la resultante de las fuerzas verticales de peso propio y las inclinada de los anclajes al terreno. Su optimización nos llevó a plantear una sencilla y económica riostra adosada al terreno y que, extendiéndose entre el estribo y la zapata de arranque, permitía crear una célula triangular que moviliza gran parte del contrapeso disponible.

Una vez cerrada la clave se procede al destesado de las diagonales pretensadas, eliminación de los anclajes de sustentación del arco desde el tablero y desapeo de la pila provisional, lo que permite alcanzar una ley de esfuerzos en arco y dintel no muy

alejada de la teórica de montaje cimbrado sin fases, por lo que no ha sido necesario prever ninguna actuación de gatos en clave.

En las figuras 6 a 9 se presentan algunas fotografías del avance en voladizo de la estructura cuyo cierre está previsto para final de la primavera de 2002 y su terminación para otoño de 2002.



**Fig. 6: Unión arco-dintel**



**Fig. 7: Doblecarro y triangulación en celosía**



**Fig. 8: Pila provisional**



**Fig. 9: Doblecarro**