

El Hormigón de Alta Resistencia en la Ingeniería Civil

[High Strength Concrete in Civil Engineering]

Jesús Gómez Hermoso

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos/Dr. Civil Engineer

FCC Construcción, S.A.

RESUMEN

En el presente artículo se muestran las aplicaciones de hormigón de alta resistencia en la ingeniería civil española, fundamentalmente durante los últimos diez años. Se exponen, brevemente, las ventajas y dificultades que supone su empleo, así como la situación de la normativa y las tendencias en otros países. Se realiza una descripción de los proyectos y obras en los que se ha utilizado este material, y se adjunta un cuadro con dosificaciones que permite obtener algunas conclusiones sobre las cuantías de los diversos componentes. Finalmente, se hacen algunas consideraciones sobre la fabricación, transporte, puesta en obra y curado.

ABSTRACT

The present article demonstrates the application of high strength concrete in Spanish civil engineering, and particularly over the last ten years. There is a brief description of the advantages and disadvantages of using this type of concrete, as well as code recommendations for the same and the trends in other countries. The article includes a description of projects and works which have employed this material and there is a table indicating proportioning which allows us to come to several conclusions regarding the quantities of the different components. The article concludes with various considerations regarding manufacture, transport, placing and curing.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de hormigón de alta resistencia (en adelante HAR) todos interpretamos que nos referimos a un material con unas características mecánicas superiores a las convencionales. Cuando el referido es un hormigón de altas prestaciones, éstas ya pueden tener un origen variado y no necesariamente ligado a las altas resistencias a compresión. Sin embargo, y aunque a lo largo del presente artículo utilizaremos

1. INTRODUCTION

When speaking of high strength concrete (henceforth referred to as HSC) we all consider that we are referring to a material with higher mechanical characteristics than normal. When we refer to a high performance concrete, these characteristics may well vary and are not necessarily associated with high compressive strength. However, while we shall employ the first name throughout this article, we may see

la primera denominación, comprobaremos que, en muchas circunstancias y aplicaciones, es la segunda quien constituye su auténtica razón de ser.

Como HAR definiremos, siguiendo el Anejo 11 de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE aquel cuya resistencia característica a compresión, en probeta cilíndrica de 15x30 cm, a 28 días, supera los 50 N/mm². Más adelante, podremos comprobar que esta definición no es gratuita en algunos de los aspectos en que pudiera parecerlo. El tipo de probeta y el número de días a los que se comprueba la resistencia es una variable que tiene distintos tratamientos en diferentes normativas e, incluso, en una misma obra.

Por otra parte, el límite inferior de resistencia a compresión resulta algo relativo y ha ido evolucionando con el paso del tiempo y, sobre todo, con el avance de la técnica. En la bibliografía española de los primeros años 90, el límite se establecía en los 45 MPa, mientras a nivel internacional esta definición ha ido muy ligada a los valores alcanzados en diversas realizaciones. Así, en los años 50 se consideraban como tales los hormigones que alcanzaban los 34 MPa, en los 60 los comprendidos entre 41 y 52 MPa (pilares de Lake Point Tower en Chicago); en los 70 se alcanzan los 62 MPa en el Water Tower Place, y en los 80 los 115 MPa en el Pacific First Center. Como puede observarse, todas se encuentran en el campo de la edificación, ya que el incremento de resistencia característica está ligado habitualmente a la necesidad de incrementar la misma en los pilares de los edificios altos.

En el mundo de la obra civil aspectos como la durabilidad o la fluencia alcanzan, en numerosas ocasiones, un interés superior al de la resistencia a compresión. Así, en las plataformas petrolíferas desarrolladas por Noruega para el Mar del Norte, la durabilidad, junto a la citada resistencia, era factor fundamental. En las centrales nucleares aspectos relativos a la compacidad, y con ésta a la propia resistencia, han sido determinantes en su aplicación. Los elementos prefabricados, ya sean para puentes, dovelas de túneles, traviesas de ferrocarril, postes, losas o tuberías, presentan campos de aplicación en los que además de las condiciones de servicio de la estructura, representan un apartado importante las consideraciones de producción en factoría de los propios elementos.

Si bien la búsqueda de resistencias a compresión superiores no se ha detenido, alcanzando los 170 MPa con áridos de jaspe y diabasa, los 250 MPa con bauxita calcinada, y los 450 a 500 MPa con bauxita y cementos portland y aluminoso, los valores de uso más frecuente se encuentran entre los 50 y los 80 MPa.

Por otra parte, deben mencionarse otros componentes del hormigón que han determinado la evolución de estas resistencias: los primeros aditivos reductores de agua empleados en Japón en 1950, los superfluidificantes cuyo desarrollo comenzó en este país y en Alemania en los años 70, y el humo de sílice, que inició su aplicación en Canadá y en los países nórdicos europeos también en dicha década.

that under many circumstances and applications, it is the second reference that establishes its true raison d'être.

By HSC, in accordance with Annexe 11 of the Spanish Structural Concrete Code (EHE), we are referring to a concrete whose characteristic compressive strength, of a 15 x 30 cm cylindrical specimen at 28 days, exceeds 50 N/mm². Later in this article we shall verify that this definition is not as arbitrary as it may appear. The type of specimen and the number of days over which its strength is verified is a variable which is considered in various manners in different codes and, even, in the same work.

However, the lower limit of compressive strength appears to be somewhat relative and has evolved with time and, particularly, with technical progress. In the Spanish bibliography at the start of the nineties, the limit was established at 45 Mpa, while at an international level this definition was very much related to the values reached in different executions. In the fifties these concretes were considered to be those that could reach 35 MPa, while in the 60's this had advanced to between 41 and 52 MPa (columns of the Lake Point Tower in Chicago); in the 70's 62 MPa was reached at the Water Tower Place and in the 80's values of 115 MPa were obtained in the Pacific First Center. It can then be seen that all these values were obtained in the building process, as the increase in characteristic strength is habitually associated with the need to increase this strength in the columns of high buildings.

In the world of civil engineering aspects such as durability and creep are frequently of greater interest than the compressive strength. This was indeed the case in the North Sea oil platforms built by Norway, where durability together with the said compressive strength, was a fundamental factor. In nuclear power plants compactness and the associated strength were the essential factors in the application of this concrete. Prefabricated elements, whether for bridges, tunnel linings, railway sleepers, columns, slabs or pipes, reveal a field of application where the factory production of these elements takes on an importance parallel to the service conditions of the structure.

While the search for higher compressive strengths goes on, and where values of 170 MPa have been obtained with jasper and diabase aggregates, 250 MPa with bauxite ash, and 450 to 500 MPa with bauxite and portland and aluminous cements, the more frequently used values lie between 50 and 80 MPa.

It should also be indicated that other concrete components have influenced the development of these strengths: the first water reducer additives being employed in Japan in 1950, superplasticizers were developed in this country and Germany in the 70's, and silica fume was first employed in Canada and in Nordic countries in the same decade.

2. VENTAJAS E INCOVENIENTES

Las características especiales que presenta el HAR frente al hormigón convencional (en adelante HC) casi siempre suponen una ventaja, en algunos casos especialmente aplicables a la obra civil y, de forma más concreta, a los puentes. Sin embargo, en otras oportunidades suponen aspectos negativos que deben considerarse en el proyecto y en la ejecución.

Entre las ventajas de los HAR se pueden citar las siguientes:

- ▼ El incremento de la resistencia a compresión mejora el comportamiento frente a esfuerzo de flexocompresión en elementos como tableros, pilas, pilonos de puentes atirantados y arcos. Este hecho permite una reducción de las secciones que, en ocasiones, lleva a la necesidad de un pretensado exterior en secciones cajón.
- ▼ Reducción de peso, con la consiguiente de acciones en la cimentación y del empleo de materiales en ésta.
- ▼ Reducción de las deformaciones debido al mayor módulo de elasticidad y al mejor comportamiento por efectos de la fluencia.
- ▼ Mejor comportamiento a tracción, lo que implica una mayor colaboración con la armadura de pretensado y una reducción de ésta.
- ▼ Reducción de las pérdidas diferidas del pretensado.
- ▼ Reducción del ancho de fisuras.
- ▼ Mayor compacidad y baja permeabilidad, lo que supone una mayor durabilidad, propiedad que hace recomendable su uso en plataformas marinas y en cualquier elemento especialmente expuesto a agresivas acciones medioambientales.
- ▼ Reducción de ruidos y vibraciones en puentes ferroviarios urbanos respecto a soluciones metálicas.
- ▼ Respecto a la ejecución de las obras debe destacarse un abaratamiento de los elementos auxiliares, o bien la posibilidad de un incremento de la luz, en los puentes empujados.
- ▼ Mejor y más fácil transporte y montaje de elementos prefabricados.

Aunque estas ventajas resultan notablemente más positivas que negativos los inconvenientes, se debe ser consciente de la existencia de éstos. Algunos de los más significativos que pueden citarse son los siguientes:

- ▼ Necesidad de muy buenos materiales componentes del hormigón; en especial áridos. Respecto al humo de sílice, si el cemento y los áridos son de la calidad apropiada y la dosificación se encuentra muy bien estudiada, hasta valores de resistencia a compresión de 60 ó 70 MPa no es necesario su uso.
- ▼ Presenta una mayor fragilidad, lo que ha de tenerse en cuenta para el dimensionamiento de las secciones con la ductilidad adecuada.

2. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

The particular characteristics of high strength concrete over conventional concrete are almost always seen as advantages which are particularly applicable to civil work and especially to bridges. However, this type of concrete does have some disadvantages which should be considered in both design and execution.

Among the advantages of HSC are:

- ▼ *The increased compressive strength improves behaviour against compression and bending in elements such as decks, columns, cable stay bridge towers and arches. This allows a reduction in sections which, sometimes, leads to the requirement of external prestressing in box sections.*
- ▼ *Weight reduction, with the ensuing effect on foundations and the materials employed in the same.*
- ▼ *Reduced deformation due to the greater modulus of elasticity and better performance under creep.*
- ▼ *Improved tensile behaviour which implies a greater collaboration with the prestressed reinforcement and a reduction in the same.*
- ▼ *Reduction of differed losses of prestressing.*
- ▼ *Reduction in crack widths.*
- ▼ *Greater compactness and low permeability which leads to greater durability, a property which makes it very recommendable in oil platforms and in any other structure exposed to aggressive external elements.*
- ▼ *Noise and vibration reduction in urban railway bridges as opposed to steel bridges.*
- ▼ *In terms of execution there is a reduction in the cost of ancillary elements, or the possibility of increased spans in launched bridges.*
- ▼ *Better and simpler transport and assembly of prefabricated sections.*

While these advantages are very positive, it is also necessary to be aware of the disadvantages that this type of concrete entails. Some of the more negative aspects are indicated below:

- ▼ *The need to employ very good concrete component materials; particularly with regards to the aggregates. With regards to silica fume, if the cement and aggregates are of suitable quality and the mix proportioning has been well studied, then it is not necessary to use the same up to compressive strengths of 60 to 70 MPa.*
- ▼ *It is more brittle and this has to be taken into account in order to proportion the sections with sufficient ductility.*

- ▼ Las dimensiones mínimas de las secciones por condiciones de servicio no permiten en todas las ocasiones aprovechar la mayor resistencia a compresión del material.
- ▼ La baja relación agua/cemento hace necesario el empleo de superfluidificantes y superplastificantes, debiendo tenerse en cuenta que, para un mismo valor de descenso del cono de Abrams, su trabajabilidad es peor que la de un HC.
- ▼ Ha de llevarse a cabo un seguimiento y control de obra algo más intenso.

El aprovechamiento de las ventajas que presenta este material, junto con la atención a los inconvenientes que puede presentar para algunas aplicaciones, permitirá un óptimo empleo del mismo.

3. NORMATIVA

En este campo técnico, como sucede en otros, la normativa, tanto nacional como internacional, va por detrás de las realizaciones de proyectos y obras. En España, la actual "Instrucción de Hormigón Estructural EHE" ha sido la primera en reconocer de forma expresa, en su Anejo 11, hormigones con resistencia característica de proyecto entre 50 y 100 MPa. Hasta su reciente publicación únicamente la anterior "Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón pretensado EP-93" recogía hormigones con resistencias entre 50 y 60 MPa.

En el ámbito internacional, el Model Code 90 (MC-90) recoge valores de la mencionada resistencia hasta 80 MPa, y un addendum de 1995 lo amplía hasta 100 MPa (probeta cilíndrica).

En las normativas nacionales existen varios ámbitos de países que adoptan un hormigón con resistencia característica superior a los 50 MPa. Estos son los países nórdicos europeos (Suecia, Finlandia y Noruega), Norteamérica (U.S.A. y Canadá), países centroeuropeos (Alemania y Holanda) y Japón, encontrándose el límite superior de la mencionada resistencia entre los 80 y los 115 MPa, y la probeta para el ensayo entre las cilíndricas de 150/300 mm o 100/200 mm y las cúbicas de 100, 150 y 200 mm de arista.

4. TENDENCIAS INTERNACIONALES

Entre las investigaciones, proyectos y realizaciones llevadas a cabo en otros países es justo comenzar este breve repaso de tendencias en Japón, ya que fue allí donde, en la reconstrucción posterior a la II Guerra Mundial, comenzaron a emplearse superplastificantes que, con el tiempo, se han convertido en uno de los productos imprescindibles para la aplicación de este tipo de hormigones. La elevada cuantía de armadura, requerida por los condicionantes antisísmicos, exigía el empleo de un hormigón muy fluido.

En este país, que cuenta entre sus realizaciones el "CNT Super Bridge", con una resistencia característica de proyecto

▼ *The minimum dimensions of the sections under load conditions do not always allow the exploitation of the greater compressive strength of the material.*

▼ *The low water/cement ratio makes it necessary to employ superplasticizers and it should be considered that for the same slump value in the Abrams cone, its workability is worse than that of conventional concrete.*

▼ *The need to carry out more intense monitoring and control of work.*

In order to obtain optimum use of the material it is necessary to weigh up the advantages and to be aware of the disadvantages that may arise in certain applications.

3. CODES

In this technical field, as in many others, both national and international regulations fall behind current design and execution. In Spain, Annexe 11 of the "Structural Concrete Code" (EHE) has been the first to expressly recognise concretes with a characteristic design strength between 50 and 100 MPa. Until the recent publication of this code, only the previous "Building Code Requirements for prestressed concrete" allowed for concretes with strengths of between 50 and 60 MPa.

Internationally, the Model Code 90 (MC-90) establishes characteristic design strengths of up to 80 MPa, and an addendum issued in 1995 extended these to 100 MPa (test cylinder).

In the national standards of various countries the characteristic strength of the concrete is established at over 50 MPa. This is the case of the Nordic countries (Sweden, Finland and Norway), United States and Canada, Central European countries (Germany and Holland) and Japan, and where the upper limit of the said strength is specified at between 80 and 115 MPa, and the test cylinder of 150/300 mm or 100/200 mm and the test cubes of 100, 150 and 200 mm side.

4. INTERNATIONAL TENDENCIES

Of all the research, design and work carried out in other countries, it is only fair to begin this brief summary with a look at the tendencies in Japan, as it was in this country and during the reconstruction after the Second World War, that superplasticizers first began to be used, these since becoming an essential component in the making of this type of concrete. The large amount of reinforcement needed to satisfy anti-seismic requirements, meant that a very fluid concrete had to be employed.

In this country, which boasts among its achievements the "CNT Super Bridge" with a characteristic design strength of

de 100 MPa, la tendencia por lo que a dosificaciones se refiere se encuentra evolucionando desde altas cuantías de cemento hacia una reducción de las mismas, empleando relaciones agua/cemento entre 0,23 y 0,35 para hormigones de 60 MPa y entre 0,25 y 0,30 para los de 80 MPa.

En Estados Unidos de América una de las razones fundamentales del empleo de este tipo de hormigones es su alta compactidad y, por tanto, su elevada impermeabilidad y durabilidad, propiedad que permite una mayor protección de las armaduras frente a las sales de deshielo. Junto al humo de sílice, que colabora de manera importante en dicha característica, es habitual el empleo de aire ocluido para mejorar el comportamiento frente a los fenómenos de hielo-deshielo. En la obra civil las resistencias de estos hormigones empleadas con mayor frecuencia se encuentran entre 50 y 60 MPa, siendo 0,33 un valor habitual para la relación agua/(cemento + humo de sílice).

En Francia se ha producido un claro apoyo político a este material, potenciándose su empleo desde la Administración. Con hormigones entre 60 y 75 MPa, se ha llevado una línea de uso de superplastificantes pero, siempre que fuera posible, suprimiendo el humo de sílice y cuidando especialmente la granulometría y calidad de los áridos. Con contenidos de cemento no muy elevados (400 a 450 kg/m³), se consideran relaciones agua/cemento entre 0,30 y 0,35.

El desarrollo del HAR en Noruega se encuentra ligado a las plataformas petrolíferas del Mar del Norte. Para las mismas se pretendía un material no sólo resistente sino, sobre todo, de gran durabilidad, y apto para hormigonar elementos estructurales con unas cuantías de acero de 800 a 1000 kp/m². La resistencia de los hormigones empleados habitualmente se encuentra entre los 55 y los 70 MPa, existiendo alguna realización con 80 MPa. La dosificación de humo de sílice se encuentra habitualmente entre un 5 y un 10% del peso del cemento, siendo elevada la fluidez del material (cono de Abrams sobre 20 cm).

5. REALIZACIONES ESPAÑOLAS

El punto más importante de este artículo es, sin duda, la presentación de un resumen de las realizaciones españolas con HAR en el ámbito de la obra civil, ya que en el campo de la edificación su empleo ha sido más reducido. Sin embargo, es justo mencionar el edificio Natura Playa, construido en Benidorm entre los años 1995 y 1996. El hormigón empleado en los pilares de este primer edificio construido con HAR tiene una resistencia característica de 70 MPa.

Las realizaciones más numerosas lo han sido en el proyecto y ejecución de puentes y pasarelas con hormigón "in situ" y en elementos prefabricados, ya sean para el mismo tipo de estructuras, ya sean para revestimiento de túneles, traviesas de ferrocarril o tuberías.

100 MPa, the tendency regarding mix proportioning has evolved from very high amounts of cements down to much smaller proportions, using water-cement ratios between 0.23 and 0.35 for 60 MPa concretes and between 0.25 and 0.30 for those of 80 MPa.

In the United States one of the main reasons for using this type of concrete is its high degree of compactness and, therefore, its greater impermeability and durability, these being properties which provide greater protection to the reinforcement from thaw salts. In addition to silica fume, which greatly contributes to the said characteristic, it is common to use occluded air to improve behaviour against freezing and thaw. In civil works the strengths of these now more commonly used concretes ranges between 50 and 60 MPa, with a characteristic water to cement and silica fume ratio of 0.33.

In France there has been a clear Administrative policy to support the use of this material. With concretes between 60 and 75 MPa, the line taken has been to employ admixtures but to avoid the use of silica fume where possible and to ensure strict control of the size and quality of aggregates. With not very high cement content (400 to 450 kg/m³), the water/cement ratios considered range between 0.30 and 0.35.

The development of high strength concrete in Norway has been closely associated with the North Sea oil platforms. These platforms require a material which is both durable and strong and suitable for concreting structural elements containing steel quantities of between 800 and 1000 kp/m². The characteristic strength of the concretes employed is commonly between 55 and 70 MPa, though values of 80 MPa have been obtained on occasions. The mix proportioning of silica fume is normally between 5 and 10% of the cement weight, leading to a high fluidity of material (Abrams cone over 20 cm).

5. SPANISH WORK

The most important part of this article is, undoubtedly, the presentation of Spanish work with high strength concrete in the field of civil engineering, as this type of concrete has not been so widely employed in building work in this country. However, it is only fair to mention the Natura Playa building, built in Benidorm between 1995 and 1996. The concrete employed in the columns of this, the first building to be built in HSC in Spain, have a characteristic strength of 70 MPa.

The most common use of high strength concrete has been in the construction of bridges and footbridges with in-situ concrete and in the prefabricated elements employed in these structures and in tunnel linings, railway sleepers or pipes.

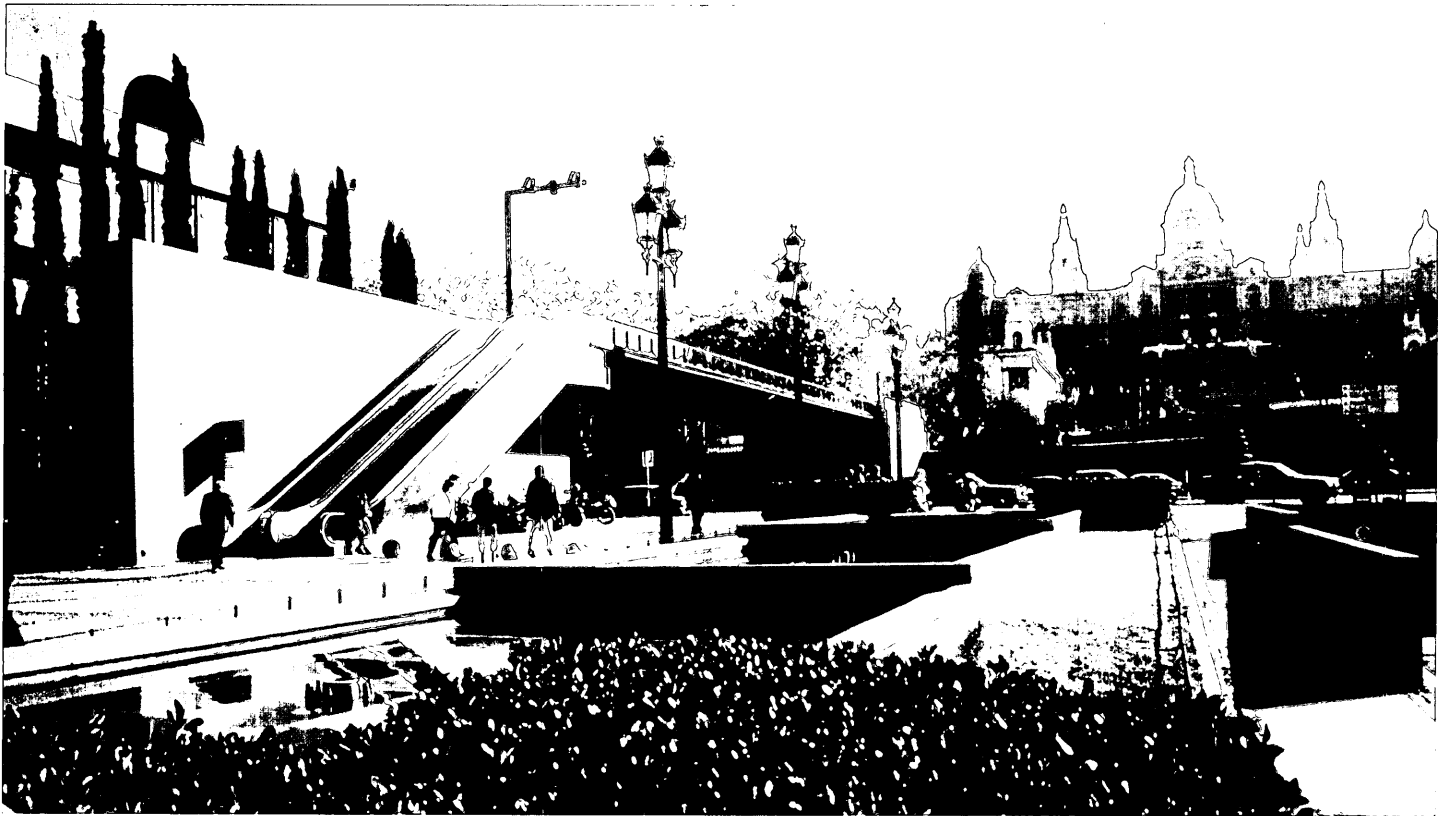


Foto 1. Pasarelas de Montjuïc/Montjuïc Footbridge.

5.1. Pasarelas de Montjuïc

Estas dos pasarelas iguales y simétricas, que fueron construidas en 1992, se encuentran situadas en el acceso desde la Plaza de España al Anillo Olímpico de Montjuïc, sobre la calle Rius i Taulet, en la ciudad de Barcelona (foto 1).

Con una luz de 31,80 m, su sección transversal responde, básicamente, a una T invertida. Consta de dos plataformas de 4,00 y 2,50 m de ancho a ambos lados de un nervio central de 0,80 m de ancho y 1,42 m de canto. La primera de las plataformas tiene un canto variable escalonado entre 0,42 m y 0,14 m, mientras el de la segunda es constante e igual a 0,42 m.

Su esquema estructural responde a una viga empotrada en un extremo en un muro de 0,80 m de ancho y 20 m de longitud, de los que 4 se encuentran solapados con la propia pasarela, y apoyada en el opuesto.

La cimentación, que es profunda, se encuentra desarrollada sobre módulos de pantalla de sección rectangular de 0,65x2,50 m.

El tablero de la pasarela se ha ejecutado con hormigón de resistencia característica de proyecto de 80 MPa. La razón para ello es doble: por una parte la necesidad de una alta capacidad de la cabeza de compresión del nervio en la sección más solicitada frente a esfuerzos de flexión positiva en las secciones intermedias de su luz; por otra la trabajabilidad ne-

5.1. Montjuïc Footbridges

These two identical and symmetrical footbridges were built in 1992 and are located at the approach from the Plaza de España to the Montjuïc Olympic Ring, over the Rius i Taulet street in the city of Barcelona (photo 1).

With a span of 31,80 m, the cross-section is basically an inverted "T". There are two platforms of 4.00 and 2.50 m wide both sides of a central rib 0.80 m wide by 1.42 m deep. The first of the platforms has a variable stepped depth of between 0.42 and 0.14 m, while the second has a constant and uniform depth of 0.42 m.

The structural layout is in the form of a 20 m long and 0.80m wide beam embedded in a wall, 4 m of which overlapping the footbridge itself, and supported on the opposite side.

The foundations are deep and are set on rectangular mat modules of 0.65 x 2.50m.

The deck of the walkway has been made in concrete with a characteristic design strength of 80 MPa. The reason for this is twofold: first the need for the high capacity of the compression fibre of the rib in the area most subject to positive bending stress in the intermediate sections of the span; and, secondly, to give the necessary workability of a structural element containing a large quantity of

cesaria para la puesta en obra en un elemento estructural con una cuantía de acero elevada. Para cubrir esta segunda necesidad se empleó un superfluidificante en una cuantía de un 0,3 a un 1,5 %.

El control de calidad de la ejecución se llevó a cabo mediante un criterio combinado de control de producción con control de recepción. Los ensayos de rotura a compresión del hormigón se llevaron a cabo en probetas cilíndricas y cúbicas, obteniendo un resultado relativo entre ambas comprendido entre 0,85 y 0,89.

5.2. Pasarelas del Puerto de Málaga

Estas dos pasarelas, construidas en 1992 en el Puerto de Málaga, sustituyeron a otras existentes que se encontraban muy deterioradas, sobre todo, por la acción agresiva del ambiente marino.

El tablero de cada una de las nuevas pasarelas, con una luz de 30,40 m, está constituido por 8 vigas doble T con un canto de 1,28 m de canto y una separación entre ejes de 1,26 m. Sobre ellas se encuentra una losa de compresión de 20 cm de canto.

El hormigón empleado en las vigas prefabricadas tiene una resistencia característica de proyecto de 60 MPa. Las razones fundamentales del empleo de un HAR son el incremento de la durabilidad bajo un ambiente marino húmedo y salino, y la obtención de una alta resistencia inicial para poder realizar la transferencia del pretensado en muy breve plazo.

La fabricación de las vigas se llevó a cabo en grupos de tres en una bancada vibrante sobre apoyos elásticos de 110 m de longitud. El curado se realizó en dos fases: la primera con vapor a 50° C durante 12 horas (previa a la transferencia del pretensado) y la segunda durante una semana mediante riego con agua por aspersión. El corte de los cables se produjo a las 18 h, cuando el hormigón había alcanzado una resistencia a compresión de 40 MPa.

En los estudios que se realizaron sobre una viga adicional que se fabricó con fines de investigación, se pudo comprobar que el incremento con el tiempo del módulo de elasticidad en estos hormigones es inferior al previsto para los hormigones convencionales siguiendo los criterios de la Instrucción EP-93.

5.3. Puente sobre el río Guadalete

Situado en El Puerto de Santa María (Cádiz), este puente fue construido en 1995. Su longitud total de 210 m se encuentra dividida en 8 vanos de 26,25 m de luz. La sección transversal de cada uno de los dos tableros está constituida por dos vigas prefabricadas de 1,738 m de canto, situadas a 1,55 m del borde de la losa superior, de 25 cm de canto (foto 2).

Las vigas prefabricadas, pretensadas inferior y superiormente, están ejecutadas con un HAR con una resistencia característica de proyecto de 80 MPa. Las razones que llevaron

reinforcement. In order to cover this second requirement a superplasticizer was employed in a quantity of 0.3 to 1.5%.

The quality control of the work was carried out using a combined criteria of production and delivery control. The compression strength was tested on both cylinder and cube specimens and the relative test strength of both ranged between 0.85 and 0.89.

5.2. Malaga Port Walkways

These two walkways were built in 1992 at the Port of Malaga to replace the existing ones which were in very poor condition particularly as a result of the aggressive action of the marine environment.

The decks of each of the new walkways, with a span of 30.40 m, are set on 8 double "T" beams of 1.28 m depth and spaced 1.26 m between axes. A 20 cm thick compression slab being set upon the said beams.

The concrete employed in the prefabricated beams has a characteristic design strength of 60 MPa. The main reasons for the use of a high strength concrete were the increased durability under a humid and saline marine environment and the need for high initial strength to enabled the prestress transfer in a very short period of time.

The beams were fabricated in groups of three on a 110 m long vibrating bed set on elastic supports. The curing was carried out in two phases: the first being steam cured at 50°C over 12 hours (prior to prestress transfer) and the second for one week by way of sprinkling. The cables were cut at 18 hours when the concrete had reached a compressive strength of 40 MPa.

In the studies made on an additional beam which had been fabricated for investigation purposes, it was found that the increase in the modulus of elasticity with time in these concretes is lower than that established for conventional concretes according to the criteria of the EP-93 Code.

5.3 Bridge over the River Guadalete

This bridge was built in 1995 in El Puerto de Santa María (Cadiz). Its total length of 210 m is divided into eight 26.25 m spans. The cross section of each of the two decks is formed by two 1.738 m deep prefabricated beams set 1.55 m from the edge of the upper slab which is 25 cm deep (photo 2).

The prefabricated beams, which are prestressed in the upper and lower fibres, were built in high strength concrete with a characteristic design strength of 80 MPa. There were three basic reasons for this choice of material: to reduce the dead load of the structure and, therefore,

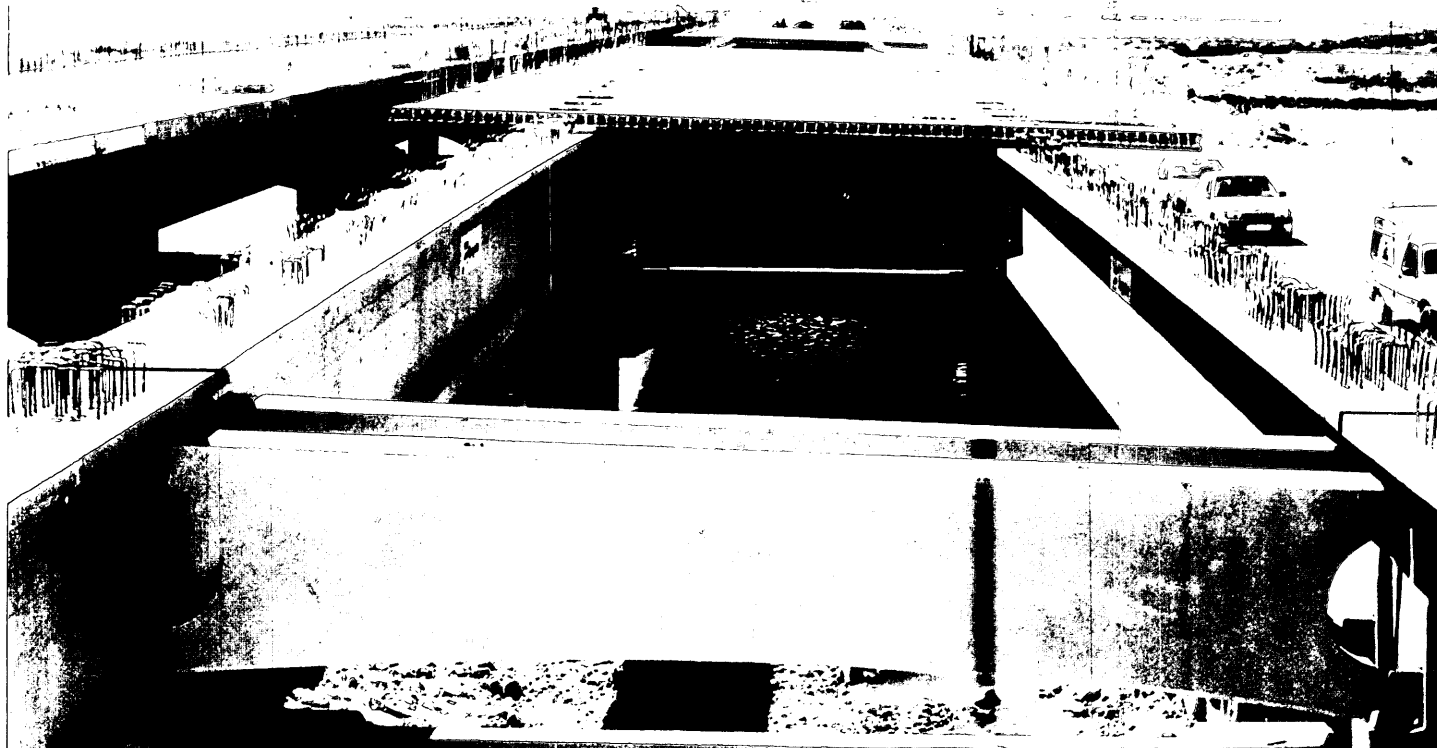


Foto 2. Puente sobre el río Guadalete/Bridge over the river Guadalete.

al empleo de este material fueron, fundamentalmente, tres: reducir el peso propio de la estructura y, por tanto, la cimentación (en la alternativa elegida finalmente dos pilotes de 19,10 m de profundidad por pila o estribo); reducir el tiempo de transferencia de pretensado, haciéndolo a las 36 h con una resistencia a compresión del hormigón de 60 MPa; y, finalmente, incrementar la compacidad y durabilidad del hormigón, que se encuentra en servicio en un ambiente marino húmedo y salino, con la cara inferior de las vigas a unos 3 m del nivel del agua.

El puente se encuentra prefabricado casi en su totalidad: pilotes, dinteles, vigas y losas. Únicamente se realizaron con hormigón "in situ" los estribos y las uniones de pilote con dintel, de vigas con losas y la junta entre éstas. Las vigas se prefabricaron en la misma bancada que las de las pasarelas del Puerto de Málaga, siguiéndose un proceso de curado similar.

Durante la fabricación de las vigas se llevó a cabo un especial estudio de las deformaciones, el módulo de elasticidad y las temperaturas que se alcanzaban en la masa de hormigón, que llegó a ser de 58° C.

5.4. Puente sobre el río Miño

Esta estructura, en ejecución durante el año 1995, se encuentra en el tramo Ceao-Baamonde (Lugo) de los accesos a Galicia a través de la CN-VI.

the foundations (in the finally selected option this consisted of two 19.10 m deep piles for each pier or buttress), to reduce the time of prestress transfer, doing so after 36 hours with a concrete compressive strength of 60 MPa; and finally, to increase the compactness and durability of the concrete, which is set in a humid and saline marine environment with the lower face of the beams set some 3 m above the water level.

The bridge is almost totally prefabricated: piles, cross beams, beams and slabs. The only in-situ concrete is found in the abutments and the connections between piles and cross beams, the beams with the slabs and the joint between the same. The beams were fabricated on the same bed as that used in the Port of Malaga walkways, and following a similar curing process.

During the fabrication of the beams a special study was carried out of the deformations, the modulus of elasticity and the temperatures of the concrete mass, which reached 58°C.

5.4 Bridge over the River Miño

This structure was built in 1995 and is set on the Ceao-Baamonde (Lugo) section of the approach road to Galicia from the CN-VI motorway.

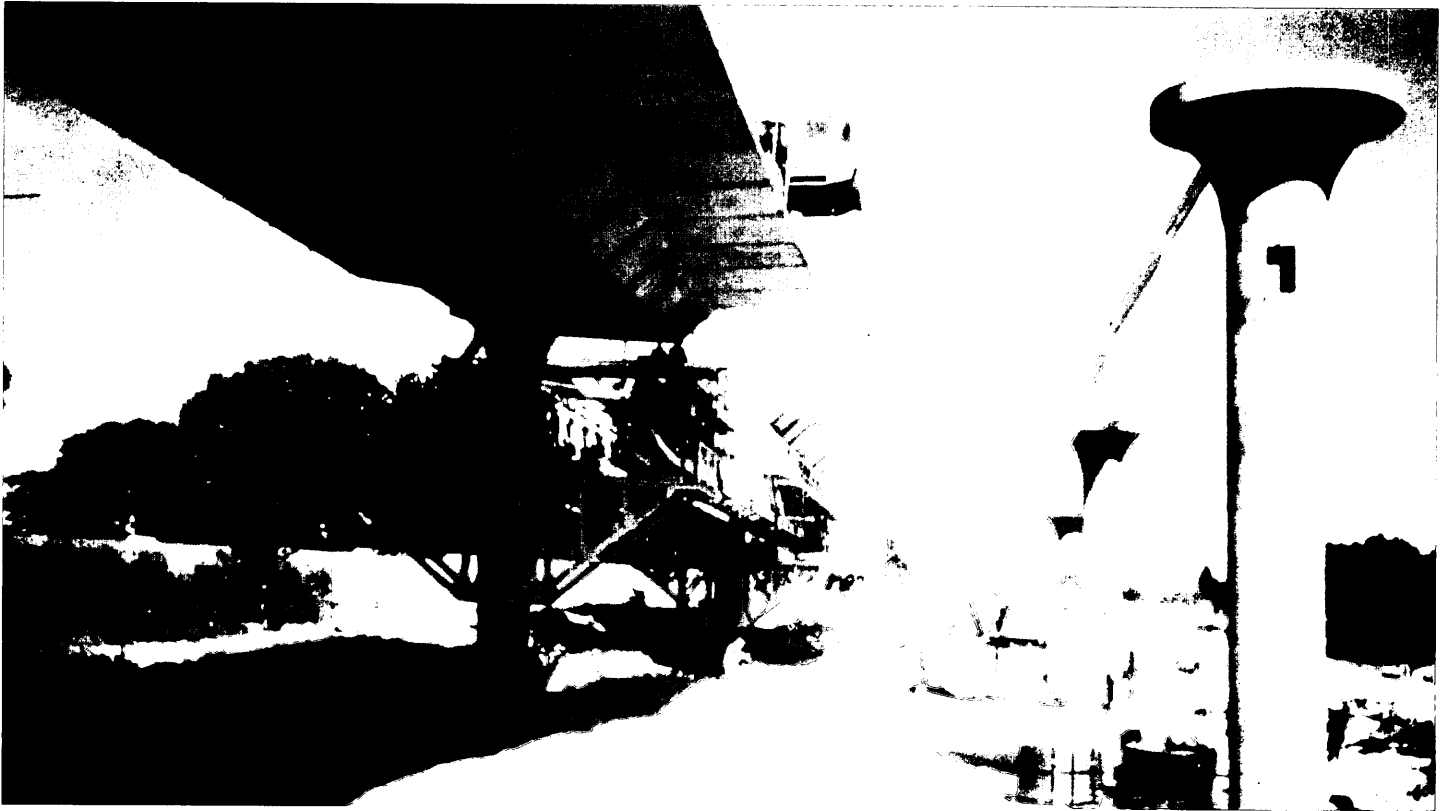


Foto 3. Puente sobre el río Miño/Bridge over the river Miño.

Está compuesta por nueve vanos de 32 m, con un ancho de 13,20 m, siendo la construcción con dovelas prefabricadas colocadas mediante cimbra autolanzable.

Las pilas, con un diámetro de 1,20 m, una altura de hasta 12,00 m y con la parte superior "en copa" (foto 3), se construyeron con un hormigón de resistencia característica de proyecto de 65 MPa.

Las razones que impulsaron al empleo de este hormigón han sido la ejecución de un solo pilar por apoyo (por economía y estética), y la reducción de la cimentación, sobre todo, en las proximidades al río.

Aunque en otras ocasiones se incorpora al hormigón todo el superfluidificante en la planta, en este caso se realizó en dos fases: la primera en la citada planta; la segunda, cuando fue preciso, a pie de obra y en una cuantía de hasta 4 l/m³.

5.5. Viaducto en el Eje Transversal de Cataluña

Construida en 1996, esta estructura se encuentra en el valle de la riera de Rajadell, en el tramo Calaf-Rajadell del eje transversal de Cataluña. Consta de tres vanos de 40, 51 y 40 m.

La sección del tablero en "pi" tiene un ancho de 12,70 m, un canto total de 2,40 m y un espesor de las almas variable entre 0,30 y 0,60 m. La evolución hasta alcanzar esta sección tiene su origen en la voluntad de llevar a cabo una experiencia

The bridge is composed of nine 32m spans and is 13.20 m wide, the construction consisting of prefabricated segments which were placed by launched formwork.

The 1.20 m diameter piers of up to 12.00 m high with a "conical" column capitals (photo 3) were built in concrete with a characteristic design strength of 65 MPa.

The reasons which led to the selection of this type of concrete were the use of one single support column (for reasons of economy and aesthetics) and the reduction in the foundations, particularly in those close to the river.

While on other occasions all the admixture was incorporated in the concrete at the mixing plant, in this case it was carried out in two phases: the first at the plant and the second in-situ, where necessary, and with quantities of up to 4 l/m³.

5.5 Viaduct on the Cross-Catalonia Route

This viaduct was built in 1996 and is set in the Rajadell valley on the Calaf-Rajadell section of the Cross-Catalonia Route. The viaduct consist of three spans of 40, 51 and 40 m.

The "Pi" or "top hat" shaped deck section is 12.70m wide and has a total depth of 2.40m and a varying web depth of between 0.30 and 0.60m. The final design for this section

con pretensado exterior y, partiendo de una sección en cajón tradicional, se concluyó en el diseño final citado.

La ausencia de losa inferior tiene sus ventajas para el hormigonado y ejecución general del tablero. Sin embargo, obliga a incrementar la resistencia a compresión del hormigón dispuesto en las almas y, por extensión, en la losa superior.

Entre las ventajas que presenta la sección en "pi" elegida se puede citar el menor volumen de hormigón y, por tanto, menor peso de la estructura, la más fácil ejecución, que se llevó a cabo con carros de encofrado en módulos de 12 m sobre una cimbra corrida bajo todo el puente y, precisamente por el pretensado exterior, un más fácil hormigonado de las almas del tablero.

El hormigón empleado en el tablero y en las pilas, tiene una resistencia característica de proyecto de 60 MPa. El empleo de un HAR fue elegido para cumplir dos objetivos: disponer de la alta resistencia a compresión del hormigón que requería la

sección diseñada, así como de un material con una alta trabajabilidad para su mejor puesta en obra a través de la alta concentración de armaduras existente.

Los 14 tendones de 27 cordones de 0,6" que constituían el pretensado del tablero se anclan en unas traviesas construidas en los extremos del mismo, tras discurrir de forma poligonal a través de unos desviadores intermedios de 0,45 m de espesor y 1,65 m de canto (foto 4). Las mencionadas traviesas, que debían transmitir unas 7600 Tn de fuerza inicial de pretensado a los 5,18 m² de la sección del tablero, tienen su misma altura (2,40 m), un ancho de 6,00 m y un fondo (dimensión paralela al eje longitudinal del viaducto) de 3,00 m.

El elevado volumen de hormigón, así como el alto contenido de cemento (450 kg/m³ de I 55-A), suponía la generación de un alto calor de hidratación durante el fraguado y, por tanto, la previsión de una cierta fisuración por retracción, sobre todo en las primeras edades. Para evitar los problemas deriva-



Foto 4. Viaducto en el Eje Transversal de Cataluña/
Viaduct on the Cross-Catalonia Route.

arose from the desire to use external prestressing but with a traditional box section.

The lack of a lower slab is advantageous in terms of concreting and in the general execution of the deck. However, this requires an increased compressive strength of the concrete in the webs, and subsequently in the upper slab.

The advantages of the "Pi" or "top-hat" section lie in the reduced volume of concreting and, therefore, the lighter weight of the structure, the ease of execution, which was carried out using slip forms in 12 m modules set on sliding centering below the entire bridge and, precisely, because of the external prestressing, the added ease of concreting the deck webs.

The concrete employed in the deck and piers had a characteristic design strength of 60 MPa. High strength concrete was selected in order to meet two objectives: to provide

the concrete of the designed section with the necessary high compressive strength and to provide high workability for ease of placing given the large concentration of reinforcement.

The 14 tendons formed of 27 strands which made up the pretensioning of the deck were anchored at stand couplers set at the ends of the same, and set in a polygonal form by way of intermediate deviators 0.45 m thick by 1.65 m high (photo 4). The said couplers, which had to transmit some 7600 Tn of initial prestress force to the 5.18 m² of deck section, were of the same height (2.40m), and a width of 6.00m and a depth (dimension parallel to the longitudinal axis of the viaduct) of 3.00m.

The high volume of concrete, as well as the high cement content (450 kg/m³ of I 55-A), meant that there would be a high hydrating temperature during setting and, therefore, it was necessary to allow for certain shrinkage cracking,

dos de este fenómeno se procedió a practicar un aislamiento del encofrado con poliuretano proyectado y a disponer de una refrigeración interior de la traviesa. El control instrumentalizado de las temperaturas en el interior de la masa del hormigón de este elemento estructural arrojó un valor máximo de 77° C a las 50 horas de hormigonado.

5.6. Pasarela sobre el río Segre

La estructura que constituye la pasarela y una plaza en el margen izquierdo del río Segre, fue construida en 1996 sobre la calle Cavallers, uniendo el centro urbano de Lleida con el barrio Cap Pont (foto 5).

La pasarela propiamente dicha es una viga continua con cuatro vanos de 24,80, 2x56,40 y 24,80 m y un canto variable de 1,90 m (esbeltez 1/25) en los apoyos centrales y 1,25 m (1/40) en el centro de los vanos interiores y en los apoyos extremos sobre los estribos. La sección en cajón, aligerado en tres de los mencionados vanos, tiene un ancho de 2,00 m y una losa superior de 7,00 m.

El HAR empleado tiene una resistencia característica de proyecto de 60 MPa, siendo requerida su aplicación por las exigencias resistentes de la sección estructural elegida.

El hormigonado se realizó en dos fases: en la primera se ejecutaron la plaza, los accesos al río y, desde el margen izquierdo del mismo, el vano extremo de 24,80 m, el interior de 56,40 m y 11,20 m del contiguo; en total unos 800 m³. En la segunda se hormigonó el resto del vano interior pendiente y el

particularly during the initial stages. In order to avoid shrinkage stresses the forms were insulated with sprayed polyurethane and internal refrigeration was placed. The temperature control in the interior of the concrete mass of this structural element showed maximum temperatures of 77°C 50 hours after placing the concrete.

5.6 Footbridge over the River Segre

The structure consists of a footbridge and square on the left bank of the River Segre and was built in 1996 over the Calle Cavallers in order to connect the town centre of Lleida with the district of Cap Pont (photo 5).

The footbridge itself is formed of a continuous beam with four spans of 24.80, 2 x 56.40 and 24.80 m and a variable depth of 1.90 m (slenderness 1/25) at the central supports and 1.25 m (1/40) at the centre of the internal spans and at the external supports on the abutments. The section which is boxed and reduced in three of the said spans, is 2.00m wide and has an upper slab of 7.00m.

The high strength concrete has a characteristic design strength of 60 MPa, and was employed as a result of the strength requirements of the designed structural section.

The concrete was placed in two stages: in the first stage the square, river accesses and, from the left bank of the river, the end span of 24.80m, the interior span of 56.40 m and 11.20m of the adjacent central span, this forming a total of 800m³. In the second stage, the

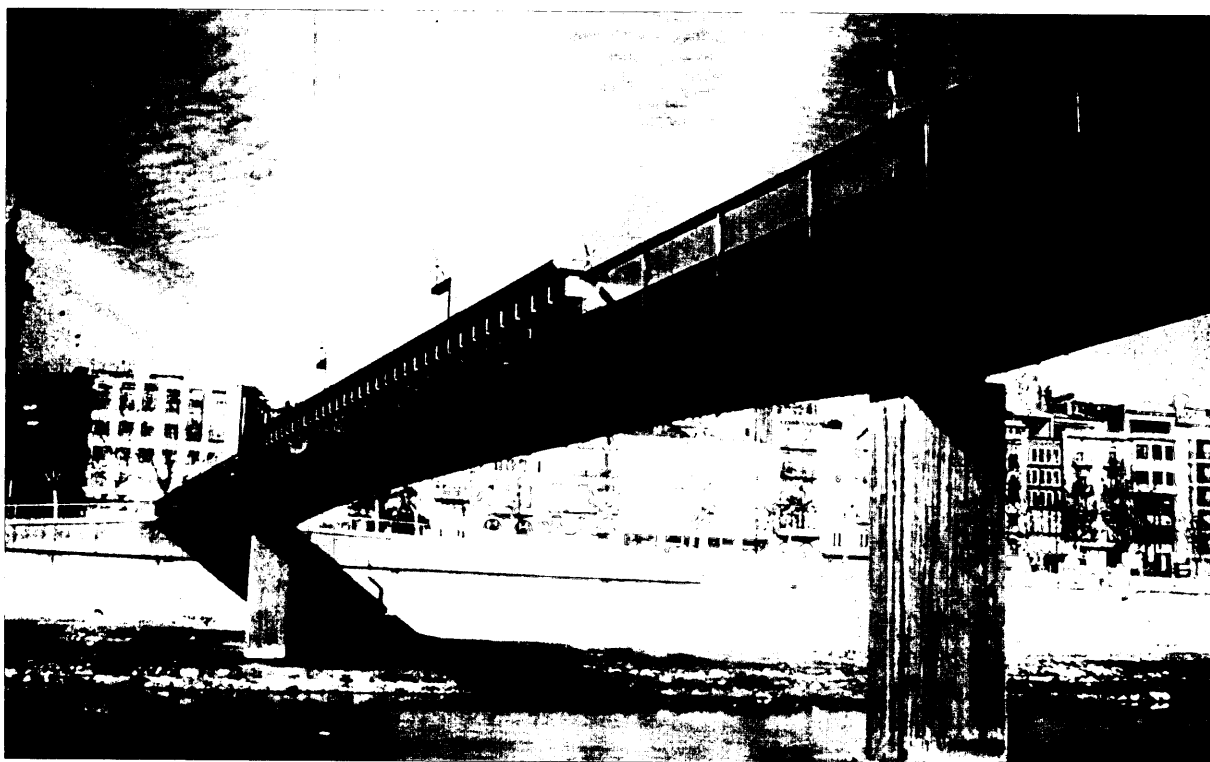


Foto 5. Pasarela sobre el río Segre / Footbridge over the river Segre.

vano extremo de 24,80 m del margen derecho del río; esto supuso unos 250 m³.

El elevado volumen de hormigón a poner en obra en la primera fase, hizo recomendable utilizar dos plantas para reducir al mínimo los riesgos de interrupción del hormigonado. Una de ellas disponía de amasadora, mientras la segunda no, siendo preciso realizar dicha función en el propio camión hormigonera. A pesar de esta diferencia, el coeficiente de variación de la resistencia del hormigón fue del mismo orden: 3,4% y 6,5%, respectivamente.

La aportación del superfluidificante se llevó a cabo en dos fases: la primera en la planta, llegando el hormigón a obra con un cono de Abrams entre 0 y 6 cm; la segunda en la propia obra, tras la cual se batía enérgicamente la cuba durante unos cuatro minutos y se vertía con un cono de 20 cm.

El curado, en su fase más importante tras el hormigonado, se realizó cubriendo las superficies con un geotextil que era regado durante cinco días.

La dosificación del hormigón presentaba pequeñas diferencias entre las dos fases de ejecución, siendo la principal el cambio de cemento: en la primera tipo I-45; en la segunda CEM I-52,5.

5.7. Puente de Archena

Este puente atirantado se encuentra sobre el río Segura en la carretera variante de Archena, Murcia. Tiene un pilono y dos planos paralelos de tirantes, con un tablero de una longitud total de 101 m, de los que 62 m pertenecen al vano principal, y un ancho de 12,20 m. Éste se encuentra formado por dos nervios longitudinales en los bordes (0,86 m de canto), una losa superior de 0,30 a 0,37 m de espesor variable y nervios transversales en las secciones de anclaje de los cables y de apoyo en estribo y pilas.

La altura del pilono es de 37,50 m, con dos fustes octogonales (ancho constante de 1,20 m y canto variable entre 1,80 y



Foto 6. Puente de Archena/Archena Bridge.

remainder of the internal span was placed together with the external 24.80m span from the right bank of the river, this forming a total of 250m³ of concrete.

The high volume of concrete placed during the first stage meant that two fabrication plants were employed to reduce the risk of any interruption to the concreting process. Only one of these plants was provided with a mixer so the other plant had to receive ready mixed concrete from a concrete mixer lorry. In spite of this difference, the ratio of variation in the concrete strength was only 3.4% and 6.5% respectively.

The superplasticizer was added in two stages: the first at the fabrication plant, the concrete arriving on site with a slump test of between 0 and 6mm; the second stage being carried out on site and being vigorously stirred in the mixing trough for 4 minutes before being poured with a cone of 20cm.

The curing in the most important stages after the concreting, was carried out by covering the surfaces with a textile which was then

sprinkled over five days.

The concrete mix proportioning showed very little difference between the two construction stages, the main difference being the change of cement, which in the first stage was type 1-45 and in the second, CEM 1-52.5.

2.7. Archena Bridge

This cable stayed bridge is set over the river Segura on the Archena road in Murcia. It has one cable tower and two parallel planes of cables, with a deck of 101 m total length, 62m of which pertaining to the main span, and a width of 12.20m. The bridge is formed by two longitudinal edge ribs (0.86m deep), an upper slab of between 0.30 and 0.37m varying thickness and transverse beams at the anchoring sections of the cables and at the support on the abutment and piers.

1,45 m). Tiene dos vigas riostras, una bajo el tablero y otra a 31 m de altura. Los tirantes los constituyen grupos de 10 a 34 cordones monoprottegidos de 0,6". La citada protección, triple, está formada por el galvanizado de los alambres, cera petrolífera entre estos y una vaina individual de polietileno de alta densidad de color blanco para cada cordón. Además, cada tirante dispone de un tubo antivandálico de acero.

El anclaje de cada tirante al tablero se realiza a través de una pieza prefabricada ovoidal montada exteriormente al mismo. Debido a la esbeltez de los fustes del pilono (foto 6), los anclajes de los tirantes no cabían cruzados en caras opuestas ni a través de sillars en sentido longitudinal (métodos más tradicionales), debiéndose diseñar una pieza metálica específica en forma de "U" para esta estructura.

El hormigón empleado en el pilono tenía una resistencia característica de proyecto de 60 MPa. Su dosificación, básicamente, partía de la de un hormigón tipo H-300 (EH-91) al que se añadía un 10% de humo de sílice y en el que se mejoró el contenido de "finos".

El cono de Abrams de valor 18 cm a pie de obra se conseguía mediante la aportación de superfluidificante en dos etapas: la primera en planta y la segunda en obra, amasando unos diez minutos entre esta última y el vertido del material en el encofrado.

5.8. Puente sobre el río Mente

Esta estructura, construida en 1998, se encuentra en el tramo Río Mente-Fumaces de la Autovía Rías Bajas. Con una longitud total de 480 m, se encuentra dividida en ocho vanos de 2x30, 60, 3x90, 60 y 30 m, con un ancho del tablero de 26,70 m.

Las pilas principales, con una altura máxima de 81 m, tienen una sección octogonal inscrita en un rectángulo de 6,40 x 6,00 m y un espesor de 0,40 m. Embutidas en las pilas, a 12 m bajo la coronación y como base de apoyo de cuatro puntales, se sitúan dos chapas de acero inoxidable cilíndricas.

Los vanos principales de 90 m de luz se alcanzan mediante elementos prefabricados de 30 m de longitud apoyados en puntales que, a su vez, transmiten la carga a los pilares a modo de "jabalcón" (foto 7). Los citados puntales, prefabricados, tienen una sección hueca de cuadrilátero irregular variable desde 1,20 x 1,20 m en la articulación con la pila hasta 2,75 x 0,50 m en la unión con el tablero, con un peso de unas 100 Tn.

El dintel se encuentra formado por tres tipos de elementos: dos vigas artesas prefabricadas pretensadas mediante cable adherente, con una longitud de 30 m, una anchura máxima de 4,50 m y una altura de almas variable entre 1,62 y 1,88 m, siendo el peso de cada pieza de unas 150 Tn; tres prelosas prefabricadas armadas por sección; y una losa "in situ" con un espesor variable de 12 a 20 cm.

La unión del puntal a la pila se realiza mediante una rótula cilíndrica con dos chapas de acero inoxidable, mientras la del

The tower is 37.50m high with two octagonal shafts (constant width of 1.20 m and varying depth of between 1.80 and 1.45m). It has two bracing beams, one below the deck and another at a height of 31m. The cables were formed by groups of 10 to 34 individually protected strands. The said protection being triple and formed by the galvanising of the wires, petrol wax between the same and an individual white high density polyurethane sheath for each strand. Each cable was also provided with a sleeve to prevent possible vandalism.

The anchorage of each cable to the deck is made via a prefabricated ovoid element set at the end of the same. Due to the slenderness of the tower shafts (photo 6), the cable anchors could not be crossed on opposite faces of the shaft and it was not possible to employ longitudinal cradles (the more traditional methods) and, therefore, a special steel "U" shaped anchor piece had to be specifically designed for the structure.

The concrete in the tower had a characteristic design strength of 60 MPA. Its mix was essentially that of H-300 (Code EH-91) concrete with 10% silica fume and with improved quality fine aggregate.

The Abrams cone slump of 18 cm on site was achieved by adding superplasticizers in two stages: the first at the plant and the second on site, in this latter case the admixture being mixed for ten minutes prior to placing the concrete in the formwork.

5.8. Bridge over the River Mente.

This structure was built in 1998 and is set on the river Mentes-Fumaces section of the Rias Bajas Motorway. The bridge has a total length of 480m and is divided into eight spans of 2 x 30m, 60m, 3 x 90m, 60m and 30m, with a deck width of 26.70m.

The main piers have a maximum height of 81m and are of octagonal section inscribed in a 6.40 x 6.00m rectangle, and are 0.40m thick. Two stainless steel cylindrical plates are embedded in the piers 12 m from the capping to serve as supports for four struts.

The main 90m spans are formed of 30m long prefabricated sections supported on struts which, in turn, transfer the loads to the columns (photo 7). The said struts are prefabricated and have an irregular hollow quadrilateral section varying from 1.20 x 1.20 m at the joint with the pier to 2.75 x 0.50m at the connection with the deck, with a weight of 100 Tn.

The soffit is formed by three elements: two 30 m long prefabricated open box girders prestressed with adherent cable and with a maximum width of 4.50 m and variable web height of between 1.62 and 1.88m and a weight of 150 Tn; three precast reinforced slabs per section; and an in-situ slab with a variable depth of between 12 and 20 cm.

The connection between strut and the pier was made by a cylindrical bracket with two stainless steel plates, while the

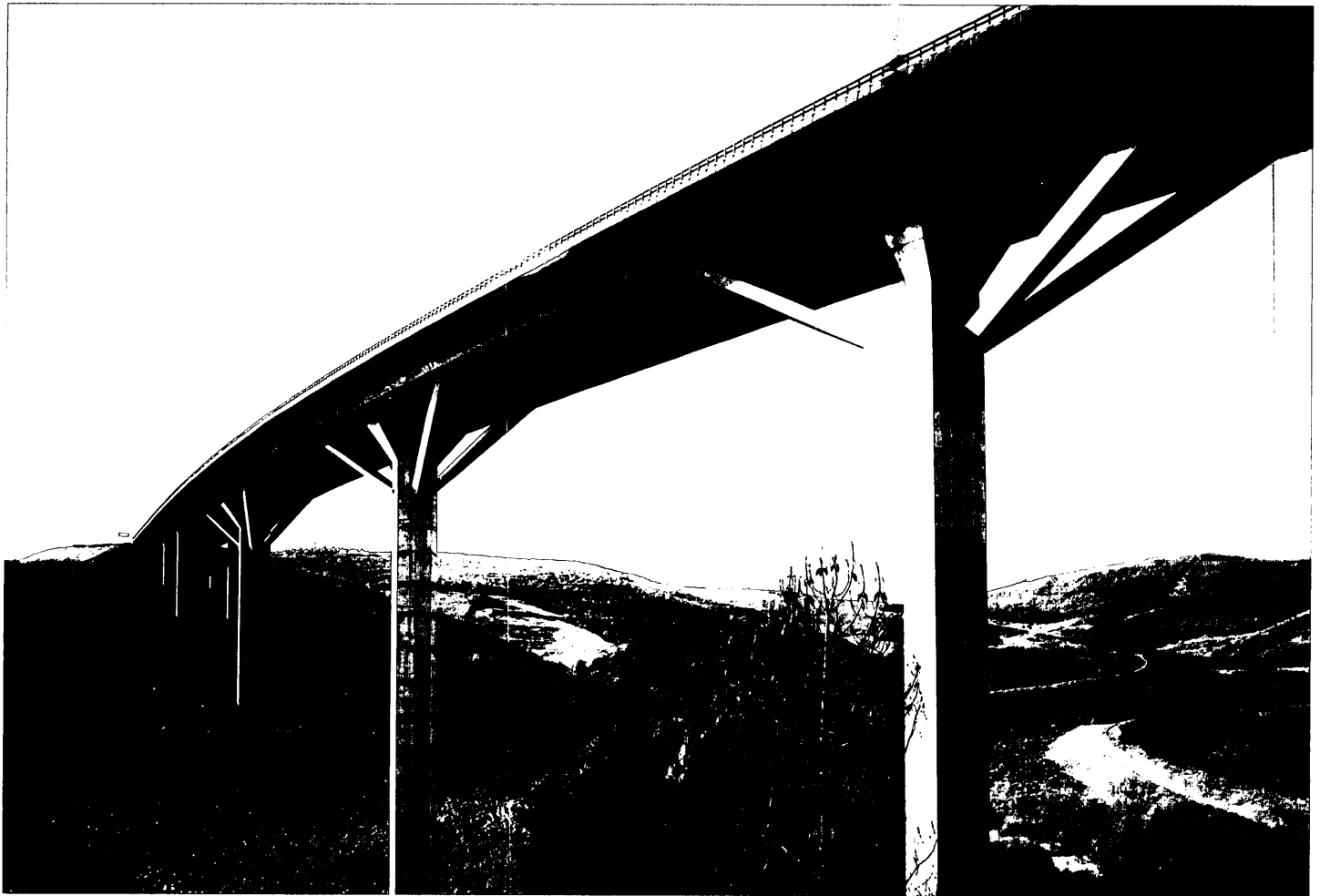


Foto 7. Puente sobre el río Mente/Bridge over the river Mente.

mencionado elemento a la viga se lleva a cabo a través de una articulación tipo "Freyssinet".

Al hormigón empleado en esta última unión se le exige una resistencia característica de proyecto de 70 MPa, siendo el de vigas y puntales prefabricados de 60 MPa. La razón del empleo de este último es reducir el peso de los elementos para facilitar su transporte, movimiento en la obra y montaje con las grúas.

5.9. Puente sobre el río Pisuerga

Construido en 1998, se encuentra en la Ronda Sur de la ciudad de Valladolid (foto 8). Es un puente atirantado asimétrico con un pilono doble y dos planos paralelos de tirantes separados 25,30 m. Longitudinalmente es una viga continua de dos vanos de 120 y 36 m.

La principal singularidad formal y estructural del puente radica en el sistema "mástil-vela" empleado en el pilono. Formando un elemento triangular se encuentran el mástil que recibe los esfuerzos de compresión, la vela que cumple la fun-

connection between strut and beam was made by a "Freyssinet" joint.

The concrete employed in this latter connection required a characteristic design strength of 70 MPa, while that in the prefabricated beams and struts was 60 MPa. The reason for the use of this latter concrete was to reduce the weight of the elements for ease of transport, movement on site and crane assembly.

5.9. Bridge over the River Pisuerga

The bridge was built in 1998 and is set on the southern ring road of the city of Valladolid (photo 8). It is an asymmetric cable stay bridge with double tower and two parallel lines of cables set 25.30 m apart. The bridge consists of two spans of 120 and 36m.

The main formal and structural feature of the bridge lies in the "spar-sail" system employed in the tower. This forms a triangular shape in which the "spar" receives the compressive stress and the "sail" absorbs the tensile

ción de absorber las tracciones que en otros sistemas efectúan los tirantes traseros, y la viga de borde. La "vela", elemento de hormigón pretensado que une la cabeza del pilono con el contrapeso posterior, aporta una rigidez al sistema que reduce en un 80% las deformaciones que tendría el tablero bajo las sobrecargas de uso con una solución de tirantes de retención.

El tablero se encuentra constituido por los siguientes elementos:

- ▼ Dos nervios de borde formados por dovelas hormigonadas "in situ" con sección cajón de 5,60 m de ancho, unos 3,00 de canto ligeramente variable y 9,00 m de longitud.
- ▼ Cerchas metálicas transversales apoyadas en los nervios anteriores y separadas 9 m.
- ▼ Cinco largueros metálicos equidistantes y perpendiculares a las cerchas.
- ▼ Travesaño metálico equidistante 4,50 m de las cerchas metálicas.
- ▼ Placas prefabricadas de hormigón sobre los elementos metálicos anteriores.

Tras el montaje de los componentes del tablero se hormigona una losa superior de hormigón "in situ" que, a través de los conectores, constituye con ellos una sección mixta acero-hormigón.

stresses in the same manner as the rear cables and the edge beam in other cable stay bridges. The "sail", built in prestressed concrete, connects the head of the tower with the rear counterweight, and stiffens the system in such a manner as to reduce 80% of the deformations that the deck would have incurred under standard live loads with a retaining cable solution.

The deck is formed of the following elements:

- ▼ *Two edge ribs formed by sections placed in-situ and with a box section 5.60m wide, a slightly variable depth of 3.00m and 9.00m long.*
- ▼ *Steel transverse trusses supported on the said ribs and spaced every 9m.*
- ▼ *Five steel longitudinal beams set equidistant and perpendicular to the trusses.*
- ▼ *Steel transom set 4.50m equidistant to the trusses*
- ▼ *Prefabricated concrete plates set on the aforementioned steel elements.*

After the assembly of the deck components the upper concrete slab was placed in-situ, this together with the connectors forming a composite steel-concrete section.

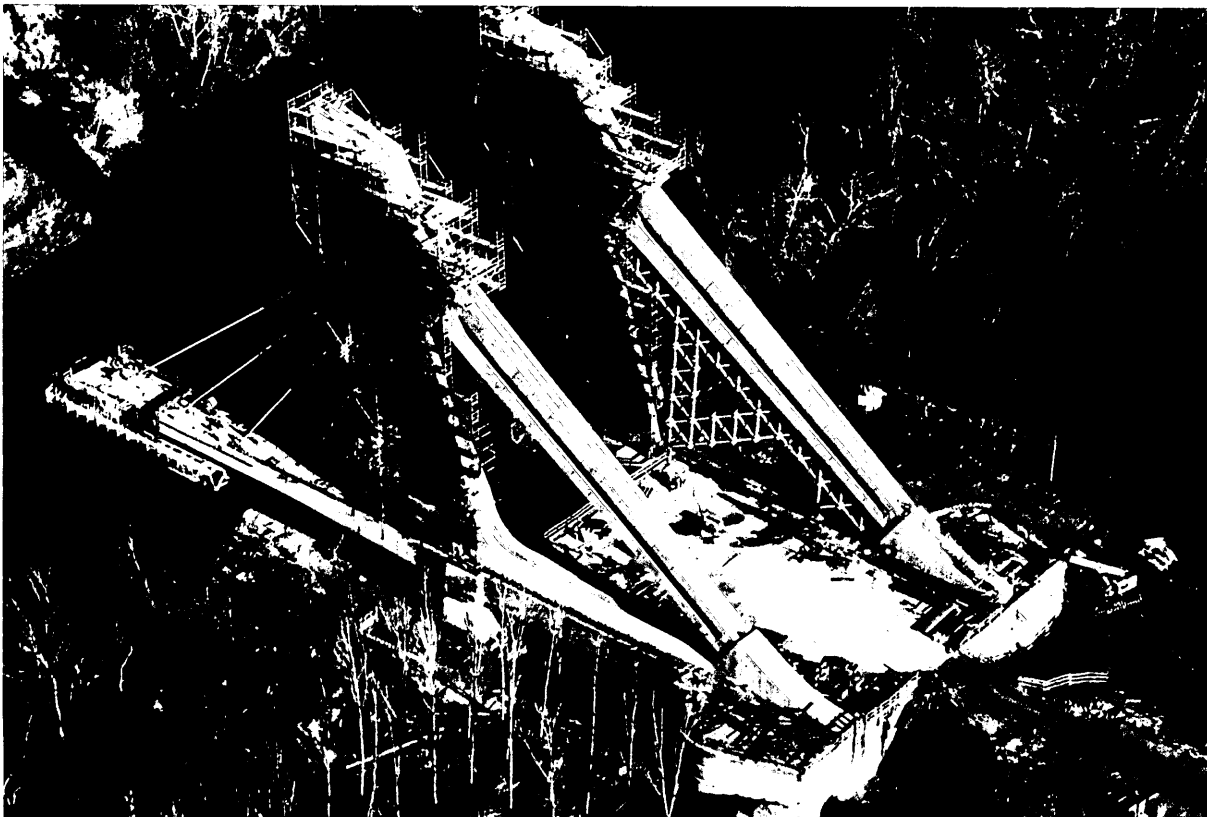


Foto 8. Puente sobre el río Pisuerga/ Bridge over the river Pisuerga.

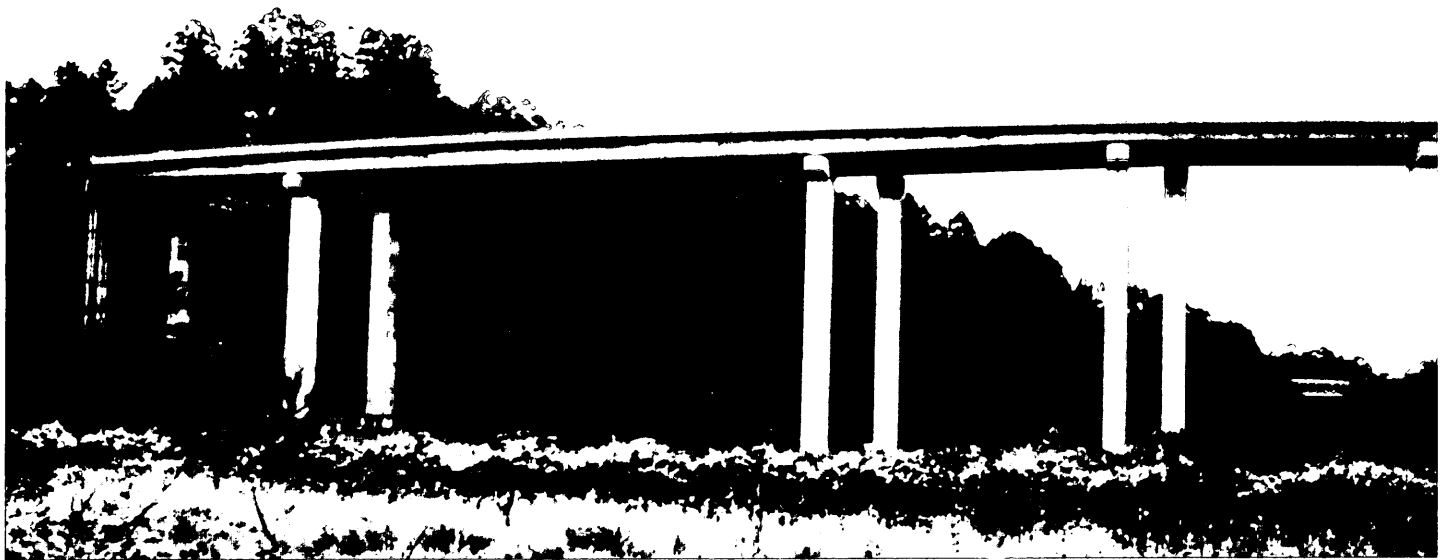


Foto 9. Viaducto sobre el río Lambre/Viaduct over the river Lambre.

El HAR empleado en el mástil, la vela y la cabeza que constituye la intersección de ambos tiene una resistencia característica de proyecto de 60 MPa, siendo los aspectos relacionados con la durabilidad los determinantes de su uso. En su dosificación no se empleó humo de sílice para evitar el oscurecimiento del hormigón. La baja cuantía de cemento empleado (405 kg/m³) pretendía reducir al mínimo la probabilidad de aparición de fisuras superficiales causadas por la retracción.

5.10. Viaducto sobre el río Lambre

Situado en la Autopista del Atlántico, fue construido en 1997 (foto 9). Consta de un vano de 25 m, doce de 40 m y uno de 80 m. Este vano principal, junto con los dos adyacentes de 40 m, constituye una viga continua, siendo el resto de los vanos isostáticos con continuidad de la losa superior y juntas dispuestas cada tres vanos.

La sección transversal se organiza en dos calzadas de 11,10 m, formándose cada una de ellas con dos cajones de 2,10 m de ancho y 1,90 m de canto, unidos por una losa de 0,25 m de espesor. El tramo continuo tiene un canto variable hasta los 3,00 m en los vanos de 40 m de longitud y constante de dicho valor en el principal de 80 m.

El hormigón empleado en los cajones prefabricados del mencionado tramo continuo tenía una resistencia característica de proyecto de 55 MPa. El objetivo perseguido con ello era la reducción de peso de los elementos para adecuarlo al carro de lanzamiento utilizado en el proceso constructivo. El vano central de 80 m se dividió en tres partes para el montaje, apoyándose en dos pilas provisionales durante la ejecución.

The high strength concrete employed in the compression and tension members of the "spar" and "sail" and the intersection between the two, had a characteristic design strength of 60 MPa, and the said concrete was principally used for reasons of durability. The mix did not include silica fume in order to prevent any possible darkening of the concrete. A low quantity of cement was employed (405 kg/m³) to reduce surface shrinkage cracks to a minimum.

5.10. Viaduct over the River Lambre

This viaduct is set on the Atlantic Motorway and was built in 1997 (Photo 9). It has one 25m span, twelve 40m spans and one of 80m. This main span, together with the two adjacent 40m spans consist of a continuous beam while the remaining spans are all isostatic with continuity of the upper slab and with joints every three spans.

The cross section is arranged in two 11.10m roadways each of which being formed by two box sections 2.10m wide by 1.90m deep and connected to a 0.25m thick slab. The continuous section has a variable depth of up to 3.00m in the 40m spans and is of constant depth in the main 80m span.

The concrete employed in the prefabricated box sections of the continuous section has a characteristic design strength of 55 MPa. This type of concrete was used in order to reduce the weight of the sections to suit the launching method employed in the construction. The central 80m span was divided into three parts for the assembly, and was supported on two provisional piers during construction.

5.11. Puente sobre el río Albaida

El objetivo de la actuación sobre este puente ha sido ensanchar la plataforma de circulación, ampliando el tablero desde 6,00 hasta 9,60 m. La estructura original estaba constituida por cuatro vanos de 32 m de luz con forma de arco con una relación flecha/luz de 1/10, y unos tímpanos aligerados con montantes que conectan el propio arco inferior con el tablero.

La sección transversal se encontraba formada por dos arcos cuyas caras interiores se encuentran separadas 2,10 m, fundiéndose en la clave de 0,60 m de espesor con el tablero. Los montantes verticales, situados cada 2,00 m, tienen 0,25 m de espesor.

Los elementos de la nueva estructura son:

- ▼ arco prefabricado de 2,00 m de ancho y 0,55 m de espesor montado entre los dos originales
- ▼ montantes de 2,00 m de ancho y 0,22 m de espesor
- ▼ ménsulas prefabricadas colocadas sobre cada montante
- ▼ placas prefabricadas apoyadas sobre las ménsulas
- ▼ losa superior del tablero hormigonada "in situ"

La unión de cada montante al arco en su extremo inferior y a las ménsulas en el superior se realiza mediante barras post-tensadas.

Cada arco se prefabrica en dos partes, hormigonándose en obra en primer lugar la junta de pila y finalmente, después de poner en carga el arco, la junta de clave. En la ejecución de los arcos se emplea un hormigón cuya resistencia característica de proyecto es de 55 MPa, buscando obtener un elemento estructural esbelto.

Tras la ejecución de la rehabilitación toda la carga permanente y sobrecarga del tablero se transmite a las pilas únicamente a través de los nuevos elementos estructurales.

5.12. Puente Internacional sobre el río Miño en Arbo

Esta estructura tiene una longitud total de 252 m, dividida en siete vanos de 2x34, 40, 2x38 y 2x34 m y con un ancho de 12 m (foto 10).

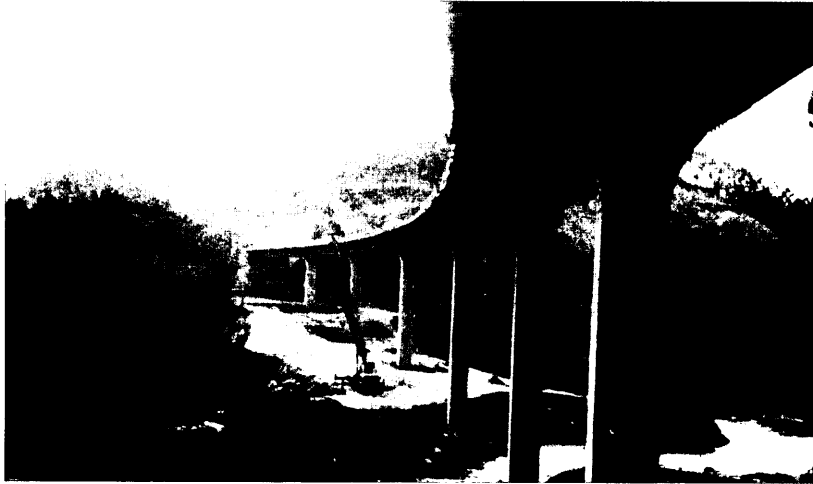


Foto 10. Puente de Arbo/Arbo Bridge,

5.11. Bridge over the River Albaida

This work was carried out to widen the traffic lanes on the existing bridge, and to broaden the deck from 6.00m to 9.60m. The original structure was formed by four 32m arch spans with a rise-span ratio of 1/10 and with spandrels and stanchions connecting the

lower arch to the deck.

The cross section was formed by two arches with a 2.10m spacing between the lower faces of the same, and which met at a 0.60m thick arch stone abutting the deck. The vertical stanchions were spaced every 2.00m and were 0.25m thick.

The elements of the new structure are:

- ▼ prefabricated arch 2.00m wide by 0.55m thick set between the two original arches
- ▼ stanchions 2.00m wide by 0.22m thick
- ▼ prefabricated cantilevers placed on each stanchion
- ▼ prefabricated plates supported on the cantilevers
- ▼ upper slab of the deck placed in-situ

The joint between the bottom end of each stanchion of the arch and the cantilevers on the upper face was made with posttensioned bars.

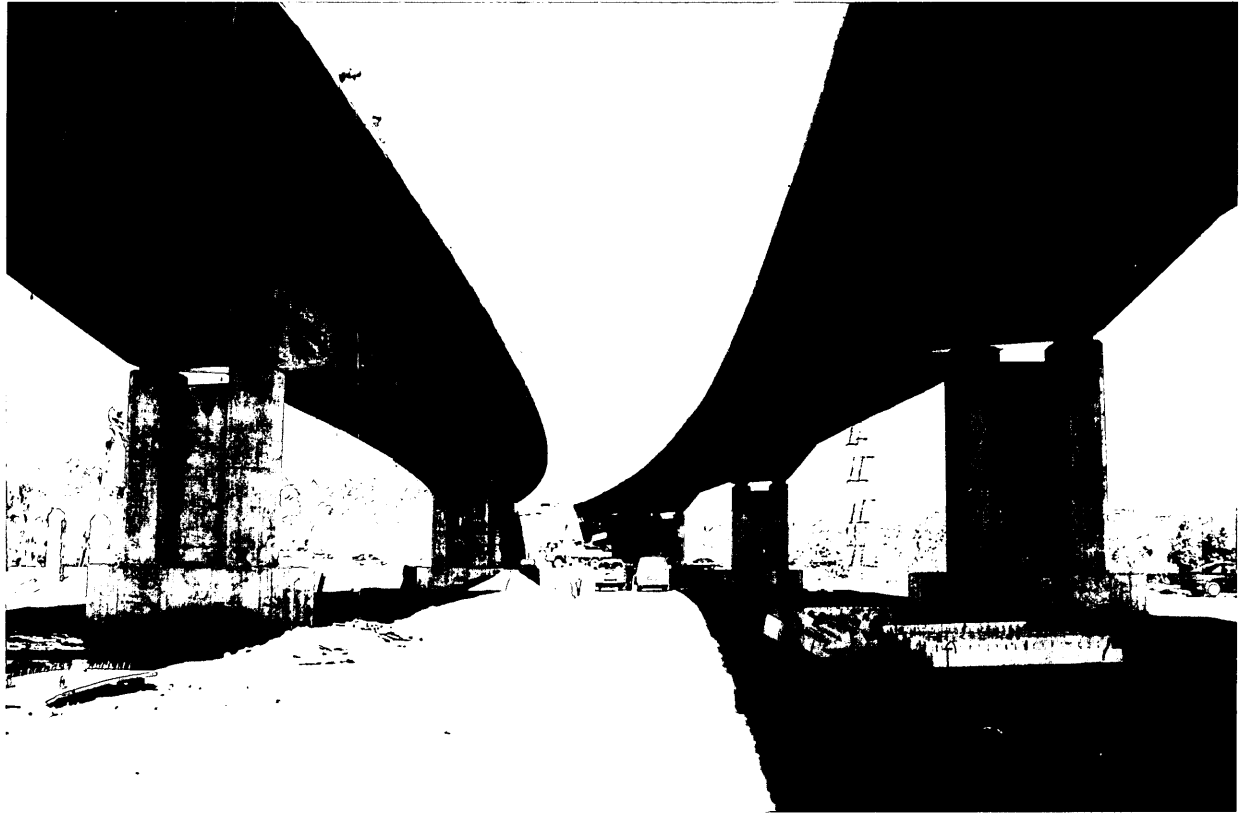
Each arch was prefabricated in two parts, starting with the concreting of the pier joint and finally, after loading the arch, with the concreting of the arch key. The concrete used in the arches had a characteristic design strength of 55MPa and was employed in order to obtain a more slender structural element.

After the restructuring work all the dead and live loads were transmitted to the piers solely by the new structural elements.

5.12. International Bridge over the River Miño in Arbo.

This structure has a total length of 252m and is divided into seven spans of 2 x 34m, 40m, 2 x 38 and 2 x 34m and is 12m wide.

Foto 11.
Viaducto de
Fuengirola/
Fuengirola
Viaduct.



La sección transversal está compuesta por un cajón unicelular prefabricado de 4,00 m de ancho y 1,80 m de canto, coronado por una losa de canto variable entre 0,35 m sobre el citado cajón y 0,18 m en el extremo del voladizo. La resistencia característica de proyecto del cajón prefabricado es de 55 MPa, lo que permite reducir el espesor de las almas, el peso propio del elemento estructural y los medios auxiliares de puesta en obra.

La tipología estructural de tablero continuo monoviga de canto constante contemplada en este proyecto, así como las características de los materiales empleados, se han utilizado también en los viaductos sobre los ríos Velerín y Guadalmina y en el de Cala del Moral, todos ellos en la Autopista de la Costa del Sol. La continuidad sobre el apoyo se materializa rellenando una junta de 6 cm con un mortero de alta resistencia y baja retracción, realizando un postesado con barras y hormigonando "in situ" para completar la viga riostra.

5.13. Viaducto de Fuengirola

Situado en la Autopista de la Costa del Sol y construido en 1998, esta estructura, con una longitud total de 522 m, se encuentra dividida en nueve vanos de 51, 7x60 y 51 m, contando con dos tableros de 12,55 m cada uno (foto 11).

Para alcanzar luces iguales o superiores a los 60 m con viga única se ha planteado una sección cajón de canto variable. Las ocho vigas cuyo centro se apoya sobre una pila tienen

The cross-section is composed of a prefabricated one-cell box section 4.00m wide by 1.80m deep and crowned by a slab with a depth varying between 0.35m on the said box structure and 0.18m at the end of the cantilever. The characteristic design strength of the prefabricated box was 55 MPa which meant a reduction in the size of the webs, the dead weight of the structural element and that of the ancillary elements employed in the construction.

This structural type of continuous beam has been employed with the same material characteristics in the viaducts over the rivers Velerin and Guadalmina and in the Cala de Mora, all of which being set on the Costa del Sol Motorway. The continuity over the support is made by filling a 6cm joint with high strength mortar with low shrinkage and then posttensioning bars and placing in-situ concrete to complete the bracing beam.

5.13. Fuengirola Viaduct

This viaduct, built in 1998, is set on the Costa del Sol Motorway and has a total length of 522m which is divided into nine spans of 51m, 7 x 60m and 51m, with two 12.55m decks.

In order to obtain spans of 60m or over with one sole beam, a box section of varying depth has been employed. The eight beams which are supported in their centres by a

una longitud de 26,50 m y un canto entre 3,10 m sobre pila y 1,55 m en vano. Las nueve vigas de vanos tienen una longitud de 34,00 m, encontrándose éstas y las anteriores coronadas por una losa superior hormigonada "in situ" de canto variable transversalmente entre 0,40 m sobre el cajón y 0,18 m en el extremo del voladizo.

El proceso constructivo comienza con el montaje de las vigas prefabricadas sobre las pilas, con sus extremos apoyados en apeos provisionales; posteriormente se montan las vigas de canto constante en su posición también sobre apeos provisionales, realizando hormigonados parciales de la losa superior; se realiza el postesado de la losa en pila y la unión de vigas mediante el mismo sistema; finalmente, se retiran los apeos, se hormigona la losa restante y se completa el proceso con un postesado exterior. El hormigón de las vigas prefabricadas tiene una resistencia característica de proyecto de 55 MPa.

La misma solución estructural y materiales se emplearon en el viaducto sobre el río Guadaiza, también en la Autopista de la Costa del Sol y con luces máximas de 60 m.

5.14. Dovelas del túnel Guadiaro-Majaceite

En el trasvase entre los ríos Guadiaro y Majaceite, realizado para incrementar el suministro de agua a la zona de Cádiz, se ejecutó un túnel bajo la Sierra de Libar, situada en esta provincia y en la de Málaga.

El túnel, con una longitud total de 12,50 km se excavó con una máquina tuneladora de doble escudo y diámetro de 4,88 m. La sección transversal se reviste con cuatro dovelas prefabricadas de hormigón armado por sección, con diámetro interior de 4,20 m, y 1,30 m de longitud y 0,25 m de espesor cada elemento prefabricado.

Las juntas entre elementos eran planas en caras rectas entre anillos, y circulares cóncavo-convexas en las caras inclinadas del hexágono entre dovelas de un mismo anillo.

Se atravesaron zonas de suelos y rocas con distintas características y espesores y, por tanto, empujes, por lo que se utilizaron en la prefabricación hormigones del tipo H-400 y H-500 (EH-91) y distintas cuantías. En una zona determinada, con 200 m de arcillas expansivas, fue necesario, para mantener el espesor de las dovelas y el rendimiento de la máquina tuneladora, ejecutar las dovelas con hormigón de una resistencia característica de proyecto de 80 MPa, siendo su dosificación la misma que se empleó en las vigas del puente sobre el río Guadalete descrito anteriormente.

El curado se llevó a cabo con vapor a 50° C durante cuatro horas, desencofrando a las seis horas y continuando el mismo durante siete días con riego por aspersión en el acopio.

5.15. Tuberías

Durante los años 1995 y 1996 se ejecutaron algunas obras hidráulicas de abastecimiento de agua en las provincias de

pier, each have a length of 26.50m and a varying depth of 3.10m over the pier and 1.55m in the span. The nine span beams have a length of 34.00m, both these and the previous beams being crowned by a upper concrete slab placed in-situ and with a varying depth of between 0.40m over the box section and 0.18m at the end of the cantilever.

The construction process began with the assembling of the prefabricated beams over the piers, and with their ends supported on provisional shoring: the beams of uniform thickness were then placed in position on provisional shoring and the upper slab was partially concreted: finally the shoring was removed and the rest of the slab was placed and the process was completed by external posttensioning. The concrete in the prefabricated beams had a characteristic design strength of 55 MPa.

This structural solution and the materials used have also been employed in the viaduct over the river Guadaiza which is also on the Costa del Sol Motorway and which has maximum spans of 60m.

5.14. Linings to the Guadiaro-Majaceite Tunnel

At the meeting of the Guadiaro and Majaceite rivers a tunnel has been built below the Sierra de Libar on the border between the provinces of Malaga and Cadiz in order to increase the water supply to this latter.

The tunnel has a total length of 12.50 km and was excavated with a 4.44 m diameter double-shield tunnel boring machine. The tunnel section was lined with four prefabricated reinforced concrete linings each 1.30m long and 0.25m thick and with an internal diameter of 4.20m.

The joints between each lining were flat on the straight faces between rings and circular, convex-concave, on the sloping faces of the hexagon between linings of a same ring.

The tunnel passes through soils and rock of different characteristics and thicknesses and, therefore, of different loading and, as such, prefabricated concretes of type H-400 and H-500 (EH-91 Code) were employed in different quantities. In one particular area, with 200m of expanded clays, it was necessary to build the linings in concrete with a characteristic design strength of 80 MPa in order to maintain the thickness of the linings and the advance of the tunnelling. The mix proportioning employed in these latter linings being the same as that used in the beams on the bridge over the River Guadalete as previously described.

The concrete was steam cured at 50° C and the formwork was struck after six hours and the concrete was then sprinkled for six days.

5.15 Pipes

In 1995 and 1996 several water engineering works were carried out in order to supply water to the provinces of Alicante

Alicante y Cádiz en las que se empleó HAR en la prefabricación de los tubos.

El objetivo, según los casos, era doble: incrementar la resistencia estructural del núcleo en el momento del zunchado de los mismos y mejorar su durabilidad al ponerse en obra en terrenos químicamente agresivos.

En el primer caso, sin que fuera necesario el empleo de humo de sílice, la resistencia característica de proyecto se encontraba entre 50 y 60 MPa. En el segundo, la dosificación de la mencionada adición respecto al cemento fue de un 5%.

5.16. Traviesas de ferrocarril

Los materiales empleados en la fabricación de traviesas de ferrocarril, cuyas funciones principales son realizar el reparto de la carga y el arriostamiento transversal de los carriles, han sido, sucesivamente, la madera, el hierro, el hormigón armado (considerando la combinación de ambos elementos como un único material) y el hormigón pretensado. La introducción de este último es lo que ha hecho recomendable el empleo de HAR.

Desde la década de los años 70 se están fabricando y montando diversos modelos de traviesas con hormigón cuya resistencia mínima a compresión exigida a los 28 días es de 60 a 63 MPa, encontrándose su contenido de cemento en el intervalo de 380 a 425 kg/m³ y siendo el tamaño máximo del árido 20 mm.

El curado de estos elementos prefabricados en bancada larga se realiza con vapor, con un grado de madurez entre 500 y 600° C x h.

Otra solución aplicada es la de vía en placa prefabricada, suprimiendo con ello el balasto. Estas placas, con acero pretensado longitudinalmente y postesado transversalmente, se dosifican, se fabrican y se curan de forma similar a las traviesas.

6. DOSIFICACIÓN

Uno de los aspectos que se prestan a un mayor análisis en las estructuras proyectadas y ejecutadas con HAR, por la poca extensión de su empleo, es la dosificación, los componentes y sus cuantías utilizados en su fabricación.

En la tabla 1 se recogen la dosificación y una serie de valores relativos entre los diversos componentes del hormigón, así como algunos resultados obtenidos del control efectuado, de ocho pasarelas, puentes y viaductos ejecutados entre los años 1992 y 1998.

Como se puede apreciar, la resistencia característica se centra en valores de 60 y 80 MPa, tanto en hormigones para la ejecución "in situ" de elementos estructurales, como en los utilizados en elementos prefabricados.

Las cuantías de cemento se encuentran entre 415 y 450 kg/m³ en los hormigones H60 y entre un 10 y un 20% más pa-

and Cadiz, in which high strength concrete was employed in the prefabricated pipes.

The reason behind this choice of concrete was, in the first case, to provide increased structural strength of the core at the time of hooping the same and, in the second, to increase durability due to the fact that the pipes were to be laid in soils containing aggressive chemicals.

In the first case the characteristic design strength of the concrete was between 50 and 60 MPa, without any silica fume being employed. In the second case silica fume was employed and was mixed in a proportion of 5% to cement.

5.16. Railway sleepers

Materials employed in the fabrication of railway sleepers, and which have the main function of distributing load and offering cross bracing to the lines, have progressed from wood to iron, then from reinforced concrete (considering the combination of both elements as one sole material) to prestressed concrete. The introduction of this latter form makes it recommendable to employ high strength concrete.

Ever since the 70's different types of prefabricated sleepers have been laid containing concretes with a minimum compressive strength at 28 days of between 60 and 63 MPa, the cement content of which ranging from 380 to 425 kg/m³ and employing aggregates with a maximum sieve size of 20mm.

These prefabricated elements are steam cured on long beds, with an ageing of between 500 and 600°C x h.

Another solution employed is that of the prefabricated plate line, which avoids the need for bottoming. These plates with longitudinal steel pretensioning and transversal posttensioning are mix proportioned, fabricated and cured in the same manner as sleepers.

6. MIX PROPORTIONING

One of the aspects which requires greater analysis in structures designed and built in high strength concrete is that of the proportioning, mix components and quantities of materials employed in the same.

Table 1 shows the mix proportioning and relative values of different concrete components, and includes some of the results obtained from the control carried out on eight footbridges, bridges and viaducts built between 1992 and 1998.

It may be seen that the characteristic strength ranges between 60 and 80 MPa both for concretes employed in-situ as well as prefabricated elements.

The cement quantities range from 415 and 450 kg/m³ in H60 concretes and between 10 and 20% more for H80 concrete. The value of 550 kg/m³ employed in the Montjuic footbridge is perhaps a little excessive when compared to

TABLA 1. DOSIFICACIÓN/TABLE 1. MIX PROPORTIONING

PROYECTO	Eje Transversal Cataluña	Pasarela río Segre	Puente de Archena	Pasarela Puerto Málaga	Viaducto río Mente	Puente río Miño	Pasarela Montjüic	Puente río Guaadalete
f_{ck} (MPa)	60	60	60	60	60	65	80	80
cemento (kg/m ³)	450	460	450	415	420	450	550	452
árido (kg/m ³)	959 (5-12)	1057 (5-12)		545 (12-15)				634 (2-12)
árido (")	196 (3-10)	352 (0-5)	985 (6-12)	545 (4-12)	1080 (6-12)	880 (6-12)	980 (5-12)	333 (0-6)
árido (")	797 (0-5)	360 (0-5)	850 (0-5)	864 (0-5)	800 (0-5)	850 (0-4)	690 (0-5)	889 (0-5)
humo de sílice (kg/m ³)	22,5	36	36	41	0	25	110	23
agua (l/m ³)	138	165	155	149	147	180	165	147
superfluidificante (l/m ³)	10,8	7,75	9,0	10,0	11,3	11,25	5,25	14,0
reductor de agua (")	3,6	5						
relación a/c	0,31	0,36	0,34	0,36	0,35	0,40	0,30	0,33
humo de sílice (%)	5,0	7,8	8,0	9,9	0	5,6	20,0	5,1
relación a/(c+h.s.)	0,29	0,33	0,32	0,33	0,35	0,38	0,25	0,31
superfluidificante (%)	2,4	1,7	2,0	2,4	2,7	2,5	1,0	3,1
cono de Abrams (cm)	19 a 22	15 a 25	18	10 a 14		20	19 a 29	12 a 16
f_{cest} (MPa)			61	70		84	80	86
f_{cm} (")	78 a 92	72	68	76		94	87	90
ejecución de hormigón	i.s.	i.s.	i.s.	p	p	i.s.	i.s.	p
año ejecución	1996	1996	1998	1992	1998	1995	1992	1995

ra los tipo H80. El valor de 550 kg/m³ en la Pasarela de Montjüic quizá resulte muy elevado comparado con los empleados en dosificaciones posteriores. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta, valorando lo que ello supone, que fue la primera obra "in situ" ejecutada con un hormigón de tan elevada resistencia, así como la necesidad de garantizarla reduciendo al mínimo el riesgo de pérdidas, y alcanzar una elevada resistencia a corto plazo para poder efectuar el postesado correspondiente, liberando las cimbras y facilitando el paso de vehículos bajo las mismas. El tipo de cemento empleado con mayor frecuencia ha sido el I-55A, utilizando también el I-52,5 y el I-52,5R.

La relación agua/cemento, en general, se encuentra entre 0,30 y 0,35, valores sensiblemente inferiores a los considerados en HC.

Los áridos han tenido un origen variado siendo, tanto el árido grueso (hasta 12 mm) como el fino, de origen calizo, silíceo o, incluso, basáltico. En el empleo de uno u otro ha influi-

that employed in subsequent mixes. However, it has to be considered that this was the first work to be carried out in-situ with a concrete of such high strength, and that this strength had to be guaranteed to reduce any possible strength losses as far as possible and to obtain the said strength in a short period of time in order to carry out the corresponding posttensioning and to be able to remove the shoring to allow the passage of traffic below the bridge. The most commonly employed cement is that if I-55A, though I-52.5 and I-52.5R are also employed.

The water-cement ratio normally range between 0.30 and 0.35, these being values which are noticeably lower than that considered for conventional concrete.

The aggregates come from varying sources, with both coarse aggregate (up to 12mm) and fine aggregate of lime, siliceous or even basaltic origin. The use of one aggregate or another normally depends on the geographical location of

do más la situación geográfica de la obra y, por tanto, la proximidad al material, que la resistencia del mismo.

La necesidad de humo de sílice para obtener un HAR es tal, realmente, para valores de la resistencia característica superiores a 70 MPa. Valores inferiores se pueden conseguir sin dicha adición, siempre que se utilicen unos áridos de muy buena calidad, así como una granulometría y una dosificación muy cuidadas. Sin embargo, el empleo de aquél permite garantizar una resistencia mínima, con una dispersión menor en sus valores y una mayor compacidad y durabilidad del elemento estructural.

Las cuantías respecto al cemento se encuentran entre el 5 y el 10%, habiéndose empleado un 20% en el caso de Montjuïc por las razones comentadas en párrafos anteriores, que explican también el bajo contenido de superfluidificante. Este aditivo se ha aportado, en general, en una cuantía comprendida entre el 2 y el 3%.

El valor del cono de Abrams medido en obra es muy variable, incluso para una misma estructura, siendo elevado en todos los casos y situándose entre 15 y 25 cm.

Los resultados presentados de las resistencias medias y estimadas se han obtenido por rotura de probetas cilíndricas de 150x300 mm. En algunas obras se han empleado también series de probetas cúbicas de 100 mm de arista. La ventaja de éstas, fundamentalmente, es la de requerir una prensa con menor capacidad. Los resultados arrojan un valor relativo próximo a 0,90 entre las primeras y las segundas.

7. FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

Respecto a la fabricación, transporte, puesta en obra y curado, pueden hacerse algunos comentarios adicionales a los ya efectuados, así como subrayar otros que tienen una especial trascendencia.

En la fabricación ha de prestarse una especial atención al contenido de agua, controlando la humedad de los áridos y teniendo en cuenta la aportación del superfluidificante o del humo de sílice si ésta se hace a granel desde su almacenamiento en silos.

Los métodos tradicionales de dosificación para HC no permiten obtener la mezcla óptima, por lo que es necesario el empleo de nuevos procedimientos, siendo altamente arriesgada la extrapolación de las experiencias de unas obras a otras sin una campaña previa de ensayos.

El tiempo de amasado de los componentes es superior al de los HC, siendo también más lento el proceso de llenado del camión hormigonera, recomendando asimismo que no se complete su máxima capacidad. De la experiencia conocida se desprende como valor razonable 2/3 de la misma.

La aportación del superfluidificante puede realizarse totalmente en la planta de hormigón, pero es frecuente, y en ocasiones recomendable, hacerlo en dos partes: la inicial en la ci-

the work and, therefore, the availability of the material, rather than the strength characteristics of the same.

Silica fume is only really needed if the characteristic design strength of the concrete has to be over 70 MPa. Lower values may be obtained without adding silica fume, provided that the aggregates employed are of good quality and that both their sizing and proportioning is carefully controlled. However, the use of silica fume does guarantee a minimum strength with a lower fluctuation of values and provides greater compactness and durability of the structural element.

The cement quantities range between 5 and 10%, though quantities of up to 20% have been employed as in the case of the Montjuïc footbridge for the reasons indicated in the preceding paragraph and which also explain the low content of superplasticizers. The latter admixture generally be added in a proportion of between 2 and 3%.

The cone slump measured on site varies, even within the same structure, and is very high in all cases, ranging between 15 and 25cm.

The results presented for the average and estimated strengths have been obtained on 150 x 300 cylinder specimen tests and in some cases on 100mm cube specimens. The advantage of these latter tests being that they require a smaller capacity press. The results show a relative value of around 0.9 between the first and second type of tests.

7. FABRICATION AND PLACING

The following comments may be made with regards to fabrication, transport, placing and curing, in addition to those that have already been made, and when underlining some of the more important aspects.

In the fabrication of this type of concrete special attention must be paid to the water content, ensuring the control of the moisture content of aggregates, and care should be taken when adding the superplasticizer or the silica fume if this be provided in bulk from storage in silos.

The traditional methods of mix proportioning for conventional concretes do not provide optimum mixes and, therefore, it is necessary to use new procedures. It being very risky to attempt to extrapolate results from one work to another without previous testing.

The mixing time of the components is greater than that for traditional concrete and the filling process of the concrete mixer lorry is also slower. It is, therefore, recommended that the mixer should not be filled to capacity and should, according to current opinion, only be filled two-thirds full.

The superplasticizer may be totally added in the concrete mixing plant, but it is more common and often

tada planta y otra final a pie de obra. De este forma se controla mejor la plasticidad del material de forma inmediatamente anterior al vertido "in situ".

El transporte a obra del hormigón se realiza con los medios convencionales (cuba o volquete), empleándose también para la puesta en obra métodos usuales (cubilote o bomba). En este último caso ha de tenerse en cuenta que el transporte se realiza aplicando una mayor presión, siendo más probable la rotura de codos o elementos de trazado sinuoso.

La compactación, debido a la mayor cohesión interna de la masa fresca, ha de ser más enérgica, lo que se consigue, en el caso de aplicación de vibradores internos, adaptando la frecuencia y la amplitud de vibración, así como realizando penetraciones más próximas entre sí.

Debe tenerse en cuenta la acción que sobre los encofrados y las cimbras puede tener el más elevado calor de hidratación del HAR.

El curado se efectúa con vapor en el caso de elementos prefabricados y con agua por riego, normalmente, cuando se trata de vertido "in situ" del material.

8. CONCLUSIONES

El estudio expuesto en este documento de proyectos y obras llevados a cabo con HAR en España en la última década, nos permite tener una visión de conjunto y alcanzar las siguientes conclusiones que, al menos como datos de referencia, nos sirvan para próximas realizaciones:

- ▼ Las aplicaciones en el campo de la obra civil se extienden, principalmente, a pasarelas y puentes (pilas convencionales, pilonos de puentes atirantados y tableros), dove-las de túneles, tuberías y traviesas de ferrocarril.
- ▼ Los elementos estructurales en los que se ha empleado este material son prefabricados u hormigonados "in situ", sin que su aplicación se incline más hacia alguno de estos tipos.
- ▼ Las principales razones de su utilización son:
 - ◆ Exigencias estructurales (cálculo de secciones de dimensiones muy estrictas frente a esfuerzos de flexocompresión y cortante, principalmente).
 - ◆ Reducción del peso de la estructura, tanto para disminuir los esfuerzos sobre la cimentación, y por tanto ésta, como para facilitar el transporte y montaje de elementos prefabricados.
 - ◆ Mejora de la durabilidad, por su mayor compacidad, frente a agresiones químicas del entorno, normalmente en elementos enterrados o próximos a un ambiente marino.
- ▼ La resistencia característica de proyecto se encuentra, normalmente, en valores entre 55 y 80 MPa.

more recommendable to do so in two stages: the first at the said plant and the second on site. In this way it is possible to obtain better control over the plasticity of the material immediately prior to placing in-situ.

The transport of the concrete to site is carried out by traditional means (mixer drum or dumper) and the concrete is also placed according to standard methods (flow or pump). In this latter case it is necessary to bear in mind that the transport applies greater pressure and that it is more possible that edges or curved sections may break.

Due to the greater internal cohesion of the fresh concrete, the compaction has to be more vigorous, this being obtained, in the case where internal vibration is applied, by altering the frequency and extent of vibration, and the need to make closer vibration proddings.

It is also necessary to consider the effect of the greater hydration temperature of high strength concrete on form and shuttering.

Curing is made by steam in the case of prefabricated elements and normally be sprinkled water in the case of concrete placed in-situ.

8. CONCLUSIONS

This study of projects and work carried out in high strength concrete in Spain over the last decade allows us to come to the following conclusions which may serve as guidelines for subsequent work:

- ▼ *The applications in the field of civil engineering mainly extend to footbridges and bridges (conventional piers, towers of cable-stay bridges and decks), tunnel linings, pipes and railway sleepers.*
- ▼ *The structural elements in which this material has been employed are either prefabricated or placed in-situ, without there being a clear distinction between one method or the other.*
- ▼ *The main reasons for the use of high strength concrete are:*
 - ◆ *Structural requirements (very strict calculation of section sizing mainly in terms of compression and bending and shear stress).*
 - ◆ *Reduction of structural weight, in order to decrease loads on foundations and for ease of transport and assembly of prefabricated elements.*
 - ◆ *Improved durability against chemical agents as a result of it greater compaction, particularly in areas surrounded by or close to the sea.*
- ▼ *The characteristic design strength is normally established at between 55 and 80 MPa.*
- ▼ *The mix proportioning requires different procedures from conventional concrete, the approximate proportions for the different components being indicated as follows:*

▼ Respecto a la dosificación, que requiere procedimientos distintos a los del HC, se pueden indicar los siguientes como valores aproximados de los distintos componentes:

- ◆ La cuantía de cemento se encuentra entorno a los 450 kg/m³.
- ◆ La relación agua/cemento oscila entre 0,30 y 0,35.
- ◆ El humo de sílice se adiciona en cantidades que oscilan entre el 5 y el 10% del peso de cemento.
- ◆ El superfluidificante se aporta en cuantías del 2 al 3%, haciéndose en una o dos etapas.

▼ El transporte y la puesta en obra presentan algunas variaciones respecto al HC, derivadas de su mayor cohesión interna (mayor tiempo de amasado, conveniencia de un menor llenado de la cuba del camión, necesidad de una mayor energía de compactación, ...).

▼ El control de la resistencia a compresión de HAR se realiza mediante rotura de probetas cilíndricas o cúbicas, existiendo una relación próxima a 0,90 entre los resultados obtenidos con ambas.

Las futuras aplicaciones de este material, actualmente en proyecto o proceso de ejecución, profundizan en las ventajas apuntadas en el texto e intentan superar las dificultades que se han presentado en las realizaciones anteriores.

Existe actualmente otra diferencia normativa importante: la "Instrucción de Hormigón Estructural EHE" presenta un Anejo en el que contempla valores de la resistencia característica de proyecto entre 50 y 100 MPa, tanto desde el punto de vista tecnológico como de cálculo. Si bien siempre es posible realizar nuevas aportaciones al citado Anejo, éste es un primer documento que permite a los proyectistas disponer de una importante referencia.

AGRADECIMIENTOS

El primer agradecimiento ha de ir dirigido a todos aquellos autores de ponencias en Congresos y Jornadas, así como de artículos en revistas técnicas, que nos permiten conocer sus realizaciones, tanto como proyectistas como constructores, y que han servido de base de datos fundamental en el presente documento.

También he de expresar mi personal agradecimiento a Ángel C. Aparicio, Juan José Arenas de Pablo, Manuel Burón, Pilar Carrizosa, José Emilio Herrero, Fernando Hue, José Luis Lleyda, Antonio Martínez Cutillas y Javier Rui-Wamba por la información gráfica que me han facilitado. ■

◆ *The cement content is established at around 450 kg/m³*

◆ *The water-cement ratio ranges between 0.30 and 0.35*

◆ *Silica fume is added in quantities ranging from 5 to 10% the cement weight.*

◆ *Superplasticizers are added in a proportion of between 2 and 3% and are added in two stages.*

▼ *The transport and placing on site does vary somewhat with regards to conventional concrete due to the greater internal cohesion of HSC (longer mixing times, reduced filling of concrete mixer lorries, greater compaction energy...)*

▼ *The control of the compressive strength of HSC is made by cylinder or cube tests, there being an approximate comparative ratio of 0.90 between the results obtained by these two types of test.*

Future applications of this material, whether currently in design or in the process of execution, will further underline the advantages indicated in this article and will attempt to overcome the difficulties that have appeared in previous works.

There is currently an important difference with regards to codes: the "Structural Concrete Code" has an Annexe which considers characteristic design strengths of between 50 and 100 MPa, both from a technological and calculation point of view. While it is always possible to make further changes to the said Annexe, this serves as an important reference for designers.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would first like to acknowledge all those authors of papers in Conferences and Meetings, as well as in technical journals, who have described their work both as designers and constructors, this having served as an essential source of information for the present article.

I would also like to express my personal gratitude to Angel C. Aparicio, Juan José Arenas de Pablo, Manuel Burón, Pilar Carrizosa, José Emilio Herrero, Fernando Hue, José Luis Lleyda, Antonio Martínez Cutillas and Javier Rui-Wamba for the photographic material provided. ■

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Aguado, A. y otros, "Bases de cálculo para el proyecto de estructuras de Hormigón de Alta Resistencia", Cemento-Hormigón, nº 709, Agosto 1992.
- Aguado, A. y otros, "La incidencia del hormigón de alta resistencia en la construcción de puentes", Cemento-Hormigón, nº 748, Agosto 1995.
- Aguado, A. y otros, "Enseñanzas de obras de hormigones de alta resistencia", 1º Symposium de Hormigón de Altas Prestaciones, Madrid, 1998.
- Alaejos Gutiérrez, P. y Fernández Cánovas, M., "Hormigón de alta resistencia: Dosificación y propiedades mecánicas", CEDEX, 1995.
- Aparicio, A.C. y otros, "Pasarela de peatones sobre el río Segre de hormigón de alta resistencia, en el Barrio de Cap Pont (Lleida)", 1º Symposium Nacional de Hormigón de Altas Prestaciones, Madrid, 1998.
- Aparicio, A.C. y otros, "Viaducto de hormigón de alta resistencia y pretensado exterior: puente sobre la riera de Rajadell en el eje transversal de Cataluña", Hormigón y Acero, nº 208, 2º T 1998.
- Arenas de Pablo, J.J., "El nuevo puente sobre el río Pisuerga de la Ronda Sur de Valladolid", Informes de la Construcción, nº 454, Marzo/Abril 1998.
- Beneti Calvo, N. y Valenzuela García, M., "Hormigón de alta resistencia en Galicia. H650", Hormigón, nº 24, Diciembre 1995.
- Bellod Thomas, J.L. y otros, "Utilización de hormigón de alta resistencia. Pasarelas peatonales de Montjuïc", Hormigón y Acero, nº 194, 4º T 1994.
- Burón Maestro, M., "El Hormigón de Alta Resistencia y la calidad en la prefabricación", Cemento-Hormigón, nº 709, Agosto 1992.
- Burón Maestro, M. y otros, "Elementos prefabricados para puentes con hormigón de altas prestaciones. Realizaciones", 1º Symposium Nacional de Hormigón de Altas Prestaciones, Madrid, 1998.
- Burón Maestro, M. y otros, "Tableros prefabricados con tipología de viga continua de canto constante o variable para puentes de carreteras. Realizaciones", 1º Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Sevilla, 1999.
- Calavera Ruiz, J., "Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón", INTEMAC, 1999.
- Fernández Cánovas, M., "Hormigón", Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1993.
- Fernández Troyano, L., "Tierra sobre el agua. Visión histórica universal de los puentes", Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1999.
- Fernández Troyano, L. y Manterola Armisen, J., "Puente sobre el río Mente en la Autovía de la Rías Bajas", 1º Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Sevilla, 1999.
- Gállego Estévez, J.M. y Alaejos Gutiérrez, P., "Hormigón de alta resistencia. Estado actual de conocimientos", Monografía CEDEX, 1990.
- García Sanmartín, J.Mª, "La durabilidad y el Hormigón de Alta Resistencia", Cemento-Hormigón, nº 709, Agosto 1992.
- GEHO, Boletín nº 20, "Hormigones de alta resistencia. Fabricación y puesta en obra", 1997.
- González-Isabel, G., "Hormigón de Alta Resistencia", INTEMAC, 1993.
- Helland, S., "Utilization of HPC", 4th International Symposium on Utilization of High-strength, París, 1996
- Herraiz Hidalgo de Quintana, R. y Quereda Laviña, J., "Las traviesas de hormigón para el ferrocarril", Cemento-Hormigón, nº 709, Agosto 1992.
- Herrero, J.E. y Roche, I., "Realizaciones con hormigones de altas prestaciones en elementos sometidos a un alto nivel de compresiones", 1º Symposium Nacional de Hormigón de Altas Prestaciones, Madrid, 1998.
- Hue García, F., "Realizaciones varias con elementos prefabricados de hormigón de altas prestaciones construidos en factoría por Dragados", 1º Symposium Nacional de Hormigón de Altas Prestaciones, Madrid, 1998.
- Hue García, F. y Ontañón Carrera, G., "Puente sobre el río Guadalete de tablero de vigas pretensadas prefabricadas de Hormigón de Alta Resistencia", Hormigón y Acero, nº 207, 1º T 1998.
- Marí Bernat, A., "Proyecto de estructuras de hormigón alta resistencia", 1º Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Sevilla, 1999.
- Martínez Cutillas, A. y otros, "Utilización de los hormigones de alta resistencia en el proyecto de puentes", 1º Symposium Nacional de Hormigón de Altas Prestaciones, Madrid, 1998.
- Páez Balaca, A., "Los hormigones de alta resistencia", Revista de Obras Públicas, nº 3339, Enero 1995.
- Pérez-Fadón, S. y otros, "Puente atirantado de Archena", 1º Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Sevilla, 1999.
- Rui-Wamba, J. y otros, "Proyecto y construcción de unas pasarelas de Hormigón de Alta Resistencia (H-800)", Cemento-Hormigón, nº 709, Agosto 1992.
- Vizcaíno, J. y otros, "Control de calidad en una obra de hormigón de alta resistencia", Symposium Nacional sobre Control de Calidad, Madrid, 1993.