

TEMAS DE ACTUALIDAD: LOS HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

Alfredo Páez Balaca
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Escuela de Ingenieros de Caminos de Santander

RESUMEN

El empleo de los hormigones de alta resistencia se extiende, cada día, a nuevos campos de aplicación. Considerándose que la relación precio/resistencia es la característica que mejor define las posibles ventajas económicas de estos super hormigones, se ponderan las dosificaciones y se valoran los componentes, a fin de dibujar la nube de puntos que representan tanto los costes de cada solución, como las resistencias alcanzadas.

ABSTRACT

The high strength concrete is being used every day in new fields. Taking into account that the price / strength ratio is the most adequate characteristic to define the possible economic advantages of these concretes, this paper ponders the proportions of materials and the price of the components, in order to draw an ensemble of points representing the cost of each solution together with the obtained strength.

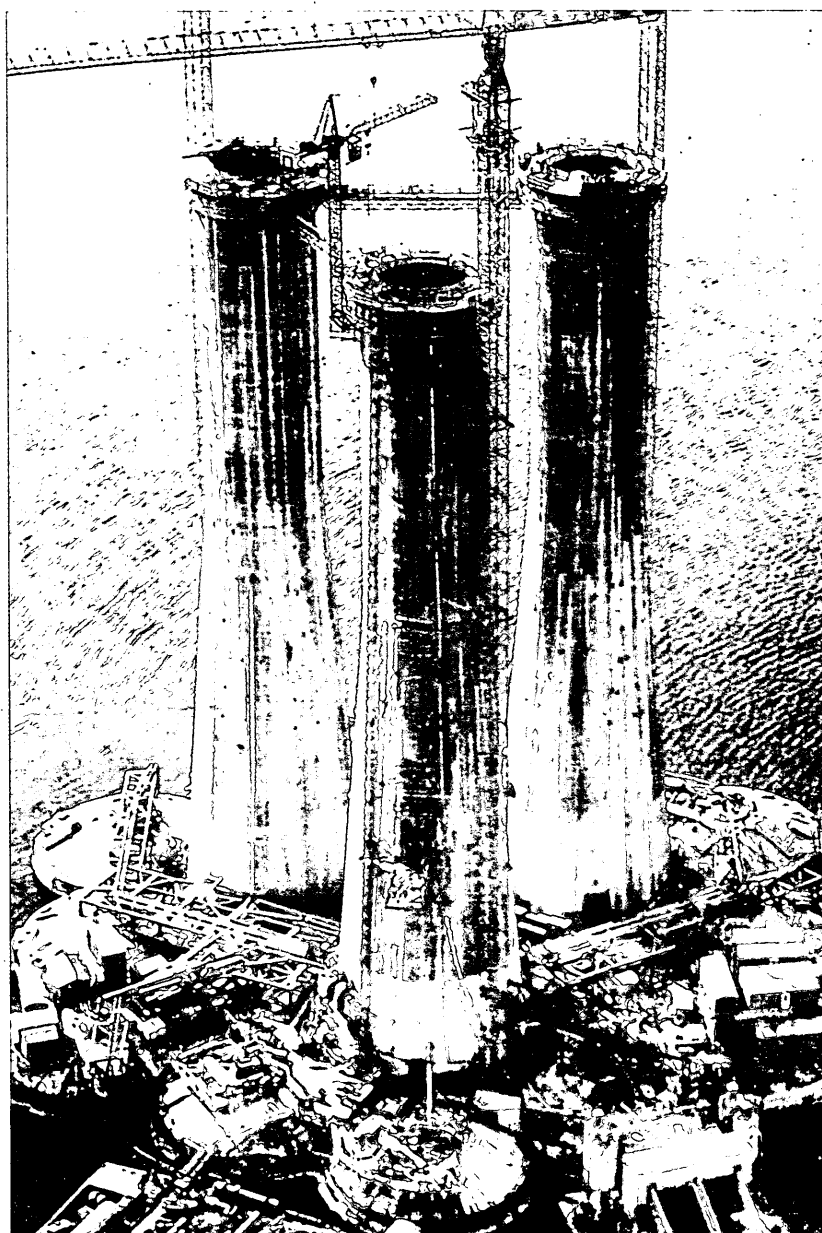
ANTECEDENTES

Hasta hace tan sólo 50 años, el hormigón ha sido una simple mezcla de cemento, agua, y áridos. Según que la cantidad de agua sea grande o pequeña, la mezcla resulta fluida o seca. Cuanto más fluida, más fácil es su manejo, y más sencilla la distribución de las masas entre los encofrados. Cuanto más seca, mayor es la resistencia que se alcanza después del fraguado, pero más probable es que queden oquedades o bolsones de aire sin rellenar, con los inconvenientes que tal defecto comporta. Tal vez esta consciente predisposición a evitar las coqueras, es la que impulsa al constructor al empleo de

unas excesivas dosificaciones de agua de amasado como inmediata solución para alcanzar la fluidez requerida.

Mientras las resistencias exigidas fueron muy bajas, no hubo mayores problemas. Ciertamente, desde principios de siglo, ya se intuía que todo exceso de agua por encima de la cantidad necesaria para hidratar el cemento, conducía a unos hormigones porosos que difícilmente podrían soportar la acción agresiva de unos ambientes particularmente hostiles (agua de mar, ciclos alternados de hielo y deshielo, etc.). Probablemente el primer intento para aumentar la fluidez de la mezcla sin aumentar la relación

Figura 1. Fase de construcción de una plataforma petrolífera en un escarpado de la costa noruega



agua/cemento, lo constituyó la utilización de aditivos aireantes, ya que las burbujas de gas creadas con estos productos, ocasionaba un efecto similar a la lubricación de la pasta. Para que la presencia de tales burbujas no afectase negativamente a la resistencia mecánica del hormigón endurecido, se limitó a un 5% la porosidad causada por la máxima dosificación de aireante.

Casi simultáneamente, aparecieron en el mercado los primeros plastificantes. A diferen-

cia con los anteriores, estos agentes, disueltos en el agua de amasado, consiguen dispersar las partículas de cemento, aumentando la avidez de hidratación de estos granos con su efecto antifloculante. El bajo coste de estos subproductos de la celulosa, motivó la rápida difusión de estos fluidificantes, difusión que, años después, se encontró frenada por la evidencia de que la presencia de azúcar, aún siendo débil, promovía significantes problemas al intervenir como agente retardador en el proceso de fraguado.

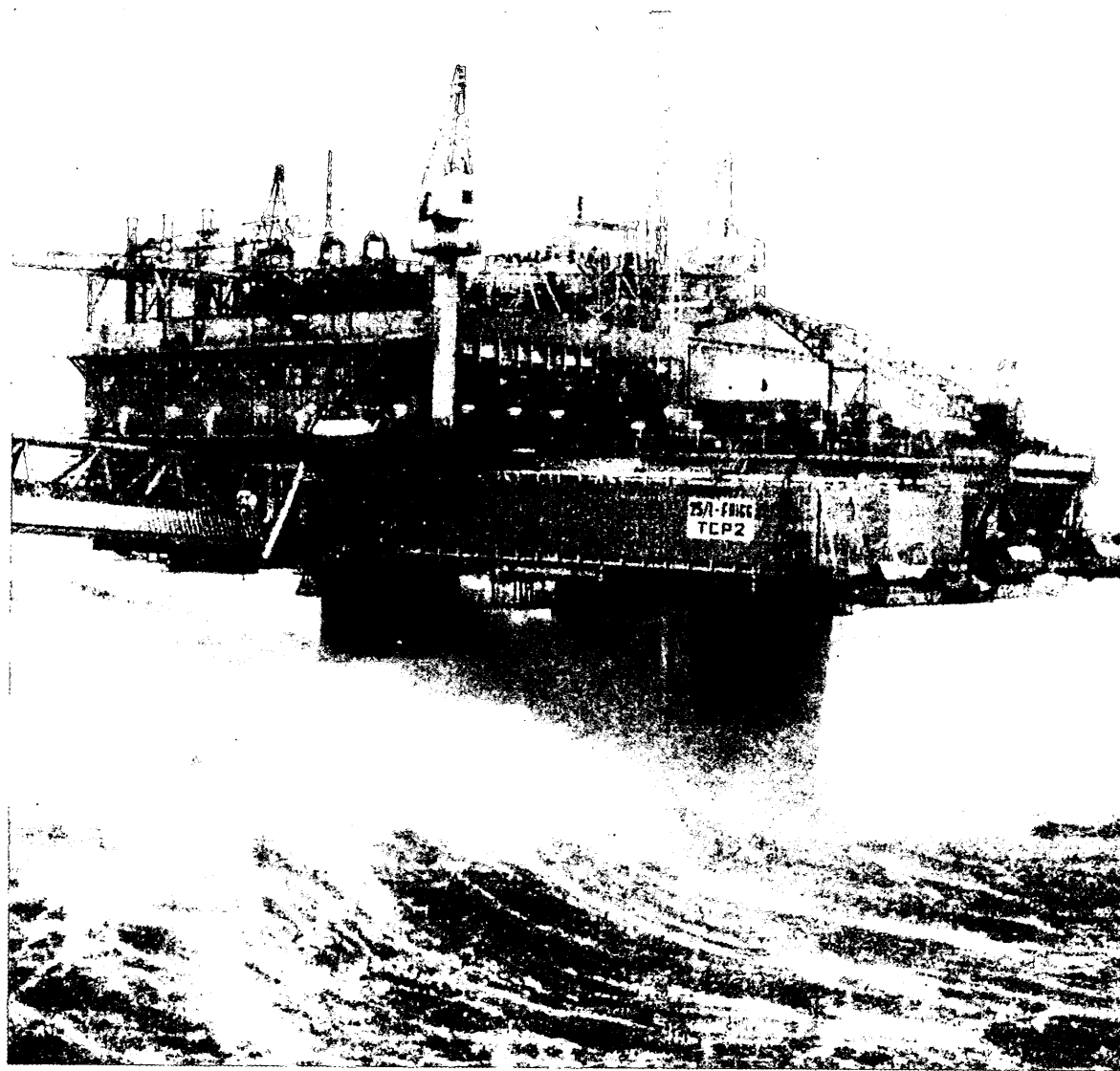
LOS SUPERPLASTIFICANTES

Pero no es hasta la década de los años 1970 cuando comienzan a utilizarse los superplastificantes, unos modernos aditivos que permiten duplicar la resistencia de los hormigones mediante unas mezclas, no ya fluidas, sino líquidas. Lo sorprendente, no sólo son los espectaculares resultados que se obtienen con su empleo, sino el hecho de que su origen se remonta a 1939, una época convulsionada por el comienzo de la Segunda Guerra Mundial. Sin duda este hecho, junto con el de la baja calidad de los hormigones de entonces, hizo que el descubrimiento pasara inadvertido durante 30 años. Precisamente fue en la reconstrucción de los edificios japoneses destruidos por los bombardeos, cuando los contratistas nipones encontraron, en estos formaldehidos y naftalenos sulfonados, la solución más práctica para hacer pasar el hormigón a través de la tupida red de armaduras impuestas por las normas sísmicas imperiales. En estas particulares condiciones, nada tuvo de extraño que estos dispersantes de naturaleza tenso-activa, se les conociera inicialmente con el sobrenombre de plastificantes japoneses.

EL HUMO DE SILICE

El silicio, metaloide de color amarillento, insoluble en el agua, y con un punto de fusión de 1.400°C, constituye la materia prima necesaria para la fabricación de los semiconductores eléc-

Figura 2.
Plataforma de la
serie Gullfaks,
en pleno Mar
del Norte.



tricos (transistores etc.) y para la elaboración de siliconas. En general, el silicio se obtiene por reducción de la sílice (cuarzo puro) mediante carburo cálcico o carbón de cok en un horno eléctrico con electrodos de grafito. Durante este proceso industrial, el humo desprendido contiene multitud de diminutas partículas de sílice, de forma sensiblemente esférica, y de diámetro comprendido entre 1 y 2 décimas de micra. Basta, por consiguiente, con filtrar ese humo, para retener un polvo de sílice, 2 veces más fino que el humo del tabaco, 40 veces más fino que las cenizas volantes, y 60 veces más fino que un cemento portland normal. A causa de esta extrema finura ($20.000 \text{ m}^2/\text{kg}$), el humo de sílice

tiene las propiedades de una puzolana muy eficaz. Los imperceptibles granos, ejercen un efecto acelerador de la hidratación del cemento, como si esas minúsculas partículas actuasen a modo de agentes impulsores en el desarrollo de focos adicionales de hidratación. Aparte de que, con estos ultrafinos, se taponan microfisuras y se cierra el paso a la infiltración de posibles sustancias agresivas, es con este polvo con el que se pretende conseguir una mejora en las características mecánicas del hormigón capaz de permitir la producción, de un modo sistemático, de mezclas susceptibles de garantizar resistencias características de 80 y 90 MPa a los 28 días

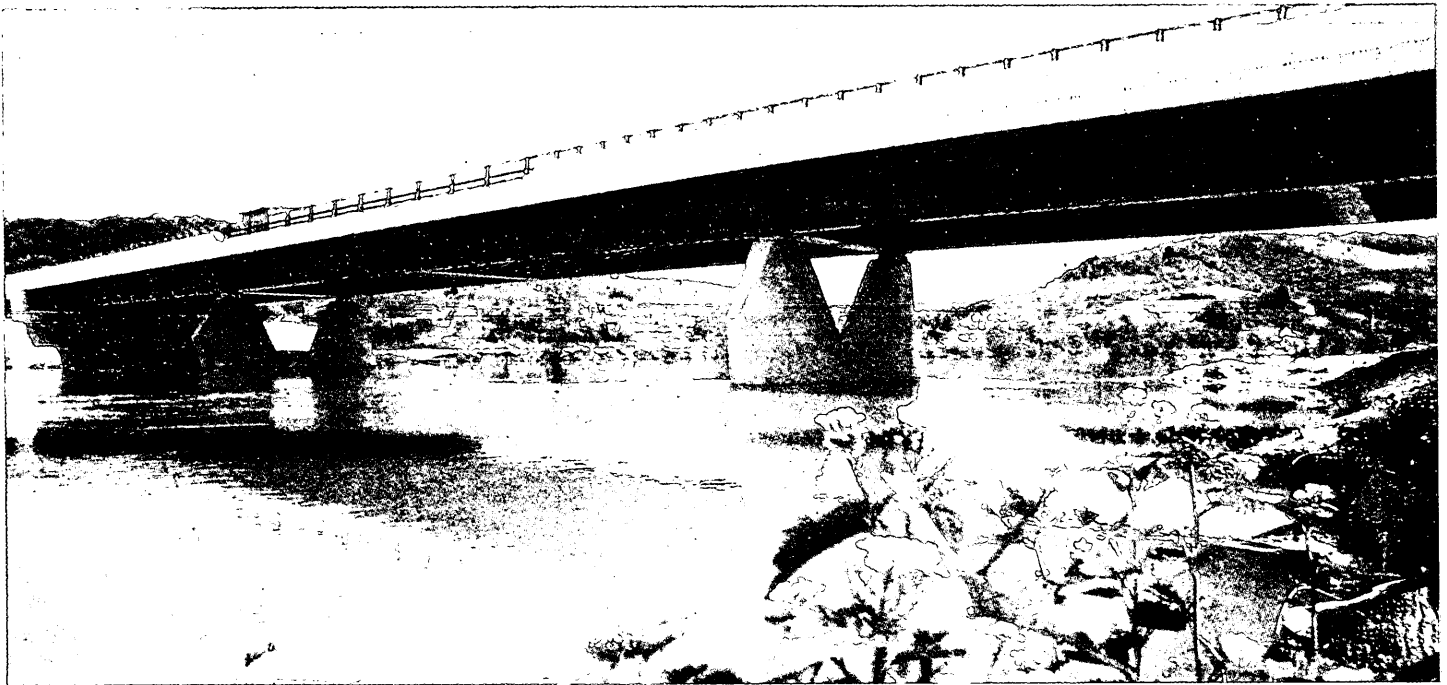


Figura 3. El puente de Joigny, primer ejemplo de una serie cuyo éxito procede de la utilización metódica de hormigones de alta resistencia.

PRECIO Y RESISTENCIA

Desde el momento actual, resulta difícil comprender algunos de los criterios aplicados a los materiales considerados como básicos en la ejecución de los elementos estructurales. Tradicionalmente se ha mantenido la tesis de que la gran ventaja del hormigón sobre las estructuras metálicas se fundamenta en el bajo coste de un material que se hace con las piedras abandonadas en el suelo, unidos por un pegamento tan barato como el cemento, cuya materia prima son unas margas arcillosas que abundan en la naturaleza. Este argumento, demasiado informal para ser consistente, puede conducirnos a la conclusión, no siempre cierta, de que lo más barato es lo más económico. Si entre diferentes calidades de acero, consideramos que la solución más económica es la que proporciona un mínimo coste a igualdad de esfuerzo resistido, podremos igualmente razonar que, problemas de inestabilidad aparte, la columna más económica es la constituida por una calidad de hormigón que, a igualdad de esfuerzo de compresión actuante, conduzca a un mínimo presupuesto. El hecho de que se considere impracticable, tanto la ejecución de piezas de hormigón

armado con espesores inferiores a los 5 cms, como columnas de sección inferior a 20x20 cm, impiden extender el precedente razonamiento a la totalidad de los casos posibles.

Del mismo modo que las particularidades relativas a las limitaciones de un espesor mínimo, afectan negativamente a los materiales de alta calidad, la reducción de peso debida a una menor sección por equivalente incremento de resistencia, actúa en sentido favorable. Un rascacielos es, en principio, un edificio que concentra en la reducida superficie de su base, unas cargas, por peso propio, extraordinariamente elevadas. Si a doble resistencia le corresponde mitad de sección, quedará reducida a la mitad la carga debida al peso propio de las columnas, reducción que, de extenderse a otros elementos estructurales, podrían motivar, no sólo una apreciable disminución en el coste de la cimentación, sino incluso un cambio en el tipo de piezas encargadas del reparto de esas cargas al terreno. También en el caso de vigas de hormigón de gran luz, una reducción en el peso puede motivar, no sólo una proporcional reducción en las secciones de armadura, sino también la factibilidad de unas soluciones que, de otro modo, serían inadecuadas.

Planteado el problema resistente en estos términos más generales, se deduce que, como en todo estudio económico-comparativo, las variables que intervienen son, más que los precios o costes unitarios, las relaciones entre ellos, unas relaciones que, por no depender de las condiciones locales o coyunturales, se transforman en unas constantes más permanentes y, a la vez, más generales. De un modo o de otro, estos planteamientos económicos nos conducen al principio de que la adopción de un precio-patrón, como puede ser el coste de un metro cúbico de hormigón de una cierta calidad, sea el procedimiento más apropiado para plantear adecuadamente estos estudios económicos.

ORIENTACIONES Y TENDENCIAS

Como resumen de cuanto antecede, resulta que el empleo de los superplastificantes constituye el sistema más práctico para la elaboración de los llamados hormigones de alta resistencia. Esta primera conclusión incluye, no obstante, multitud de variantes o matices que la enriquecen con sus peculiares planteamientos.

Tal vez sea el humo de sílice el aditivo que modernamente ha conseguido unos resultados más espectaculares. Sea por la circunstancia de que Noruega sea el país pionero en la producción de sílice, sea por el hecho de que los constructores noruegos están empeñados en empresas tan importantes como la ejecución de las plataformas petrolíferas del Mar del Norte (figuras 1 y 2), el caso es que es en este país escandinavo donde se ha iniciado y promovido la utilización del humo de sílice, un subproducto de la producción del silicio, como eficaz aditivo para mejorar la durabilidad del hormigón en ambientes particularmente agresivos. El hecho de que, tanto en Suecia como especialmente en Noruega, sea frecuente la utilización de áridos ligeros, conduce a la singular de elaborarse hormigones ligeros de alta durabilidad y cuya resistencia varía, según los casos, desde 55 hasta 70 MPa (ref.5). Dado que en estas plataformas sea frecuente el empleo de cuantías de armadu-

ras tan fuertes como 800 y, excepcionalmente, 1000 kg de acero por metro cúbico de hormigón, justifica la necesidad de consistencias tan líquidas como para ser capaces de presentar unos asientos mínimos de 200 mm medidos en el Cono de Abrams. Por otra parte, la necesidad de bombear estas mezclas en las patas tubulares de 180 m de altura (plataforma Gullfaks C), ha obligado a reducir el contenido de humo de sílice a la proporción del 1% al 3% del peso del cemento. Tanto para los hormigones ligeros como para los convencionales, la arena empleada (generalmente de río o de glaciares), fue seleccionada mediante estrictos controles manteniéndola en suspensión para sedimentarla después en 8 tamaños y recombinarla para obtener la gradación deseada.

Frente a estas soluciones, el Ministerio de Obras Públicas francés mantiene una actitud bien definida: la de prescindir del empleo del humo de sílice aunque sea renunciando a unas calidades a veces innecesariamente elevadas. Puestos a destacar tendencias, puede decirse que lo más significativo de la orientación gala consiste en la articulación de un conjunto de procedimientos normalizados tendentes a sistematizar la dosificación y el amasado de unas mezclas con las cuales se garantiza la obtención de unas resistencias características que, en determinados casos, alcanzan los 75 MPa a los 28 días en probeta cúbica. El criterio seguido brilla por su sencillez; bastan unos buenos áridos naturales, mezclados con una buena arena y con un buen cemento portland, para conseguir unas altas prestaciones. La circunstancia de que, para alcanzar el objetivo propuesto, se precisen unas relaciones agua/cemento comprendidas entre 0,30 y 0,35, obliga al empleo de unos superplastificantes que, con tan baja proporción de agua, permita la obtención de unas consistencias de la mezcla que, medidas en el Cono de Abrams, superen los 20 cm de asiento como propiedad necesaria para suprimir la consolidación por vibración y hacer posible la puesta en obra por bombeo en piezas dotadas de unas cuantías de armaduras superiores a 800 kg/m³.

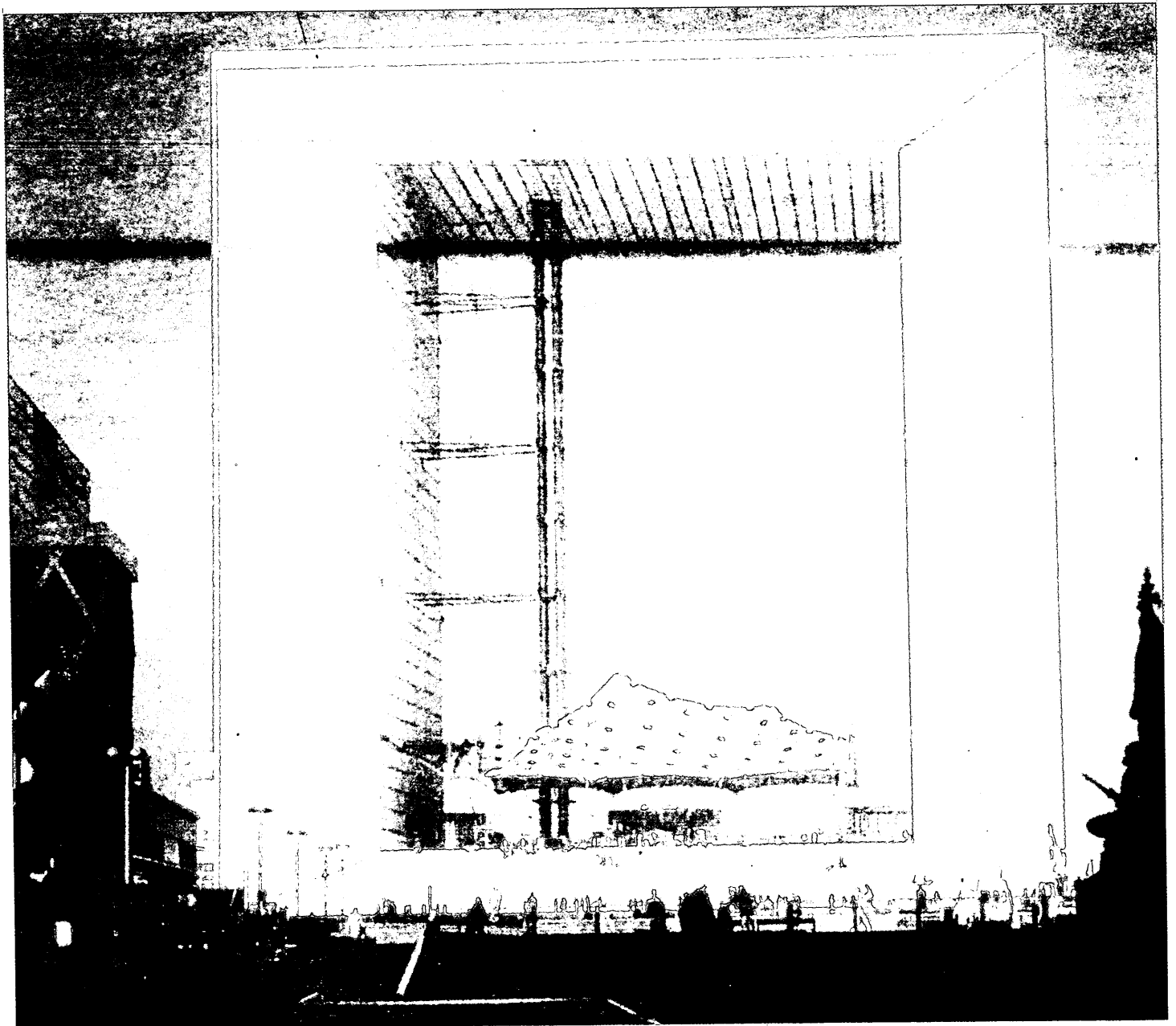


Figura 4.
El Monumento a la
Fraternidad de
París, un cubo de
100 metros de
arista, a modo de
una ventana
abierta al futuro.
(Arquitecto: J. O.
Von Spreckelsen)

El puente de Hoigny (figura 3), es un ejemplo representativo de las posibilidades que se abren con tales criterios. Sólo en determinadas ocasiones y por determinadas circunstancias, se añade el humo de sílice como aditivo que mejora las propiedades de durabilidad en términos

de resistencia a los agentes agresivos tanto a corto plazo no, muy especialmente, a lo largo del tiempo. La Archée de la Fraternité en el barrio parisino de La Défense (figura 4), constituye un ejemplo de lo que la técnica puede hacer en el campo de la Arquitectura Moderna.

Una dosificación muy corriente es la de

Cemento portland	425 kg/m ³
Agua	150 “
Aridos	1880 “
Superplastificante	entre 6 y 11 kg/m ³
Humo de sílice	0 “

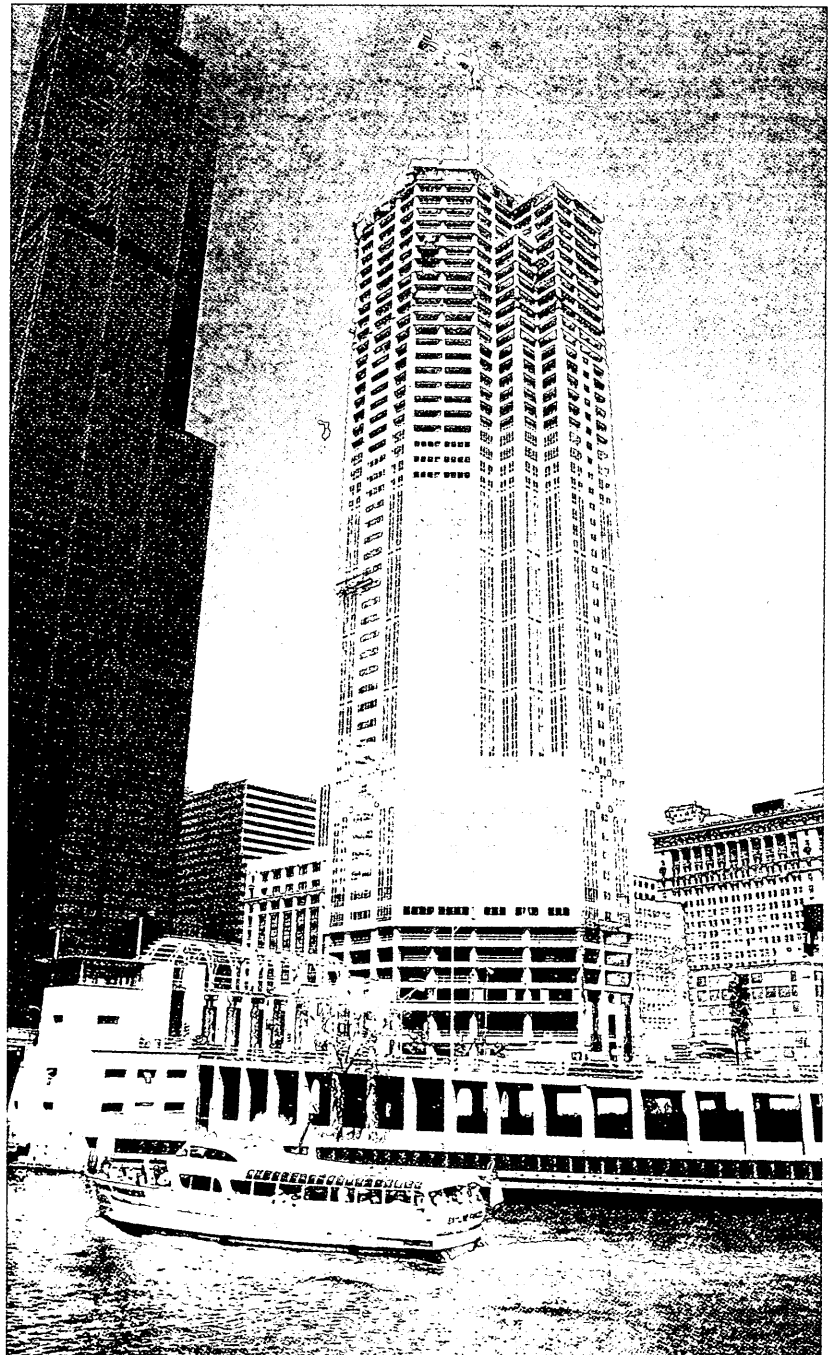
que permite alcanzar resistencia de 50 a 54 MPa a los 28 días en probeta cilíndrica. La misma dosificación, pero con algo más de superplastificante (16 kg/m³) y 30 kg/m³ de humo de sílice permite llegar a los 67 MPa (puente de Pertuiset), y con una dosificación de 40kg de humo de sílice por metro cúbico de hormigón se lograron alcanzar resistencia de 80 MPa en la Mezquita de Hassan II en Casablanca.

En otros continentes, especialmente en América del Norte y Australia, parece como si el criterio imperante fuera el de la directa contratación entre el constructor y el fabricante de hormigones preparados. En esta situación de libre oferta, la competencia entre las empresas comerciales induce al establecimiento de unos precios que, entre otros factores, varían con la calidad del producto expresada en términos de resistencia característica regulada por un cierto fractil de rechazos. El hecho de que, frecuentemente, se contraten resistencia características a los 56 días en lugar de a los 28, induce a un cierto embrollo en el análisis de los estudios comparativos ofertados por los diversos suministradores. De modo suficientemente aproximado puede admitirse que, como valor medio, la resistencia a los 28 días, en esta clase de hormigones, suele ser el 90% de la resistencia a los 56 días.

Cada vez es mayor el número de países en los cuales aumenta la utilización de los hormigones preparados. Sin embargo, mientras en unas zonas o regiones la oferta se reduce a unas pocas calidades, en otras se comercializan hormigones de 55 y hasta 80 MPa de resistencia característica. Un ejemplo típico de esta libre contratación la ofrecen las ciudades de Chicago

y Hong Kong entre otras muchas ciudades estadounidenses y australianas de igual o menor población. Cuando en Noviembre de 1989 la torre de 79 pisos del edificio situado en el n° 311 de South Wacker drive en Chicago alcanzó los 295 m de altura (figura 5) el citado rascacielos se había convertido en el edificio de hormigón más alto del mundo aunque no la torre

Figura 5. Edificio de 295 metros de altura en Chicago, destinado principalmente a oficinas, en donde el hormigón (de alta resistencia) se colocó, como es habitual, por bombeo.



más alta (Toronto 510 m). En su ejecución se bombearon 85.000 m³ de hormigón con resistencia de 50, 67 y 83 MPa en probeta cilíndrica (ref.3).

COSTE UNITARIO

La Bibliografía que al final se adjunta, permite al lector profundizar en el conocimiento de los criterios mantenidos por diversos especialistas en torno a este tema de manifiesta actualidad. En algunos de esos documentos, se analizan las ventajas económicas que suscitan el empleo de estos hormigones de altas prestaciones.

Sin embargo no parece que este peculiar estudio económico comparativo, sea el dato que con más claridad expresa la conveniencia o no de emplear estos superhormigones. En opinión del autor, el criterio que con más precisión responde a la pregunta de cuando son más ventajosos los hormigones de alta resistencia, no es otro que el basado en el establecimiento de una ley general que relacione el precio con la calidad del producto, una calidad que, en principio, se expresa en términos de la resistencia característica que ese hormigón ofrece a los 28 días con una cierta garantía (convencionalmente representada por el fractil del 5%). Si para conseguir una mayor flexibilidad práctica, se establece el principio de aceptar, a modo de unidad monetaria, el precio-patrón P_0 del metro cúbico de hormigón-tipo de 25 MPa de resistencia característica, resultará que el precio unitario P_f de un hormigón de f_{ck} de resistencia característica es

$$P_f = K_f P_0 \quad (1)$$

Ecuación en la cual el coeficiente K_f es un factor adimensional cuyo valor depende de la respectiva resistencia f , y tal que $K_f = 1$ para $f_{ck} = 25$ MPa. Dicho de otro modo, se conviene en llamar P_0 al precio del metro cúbico de un hormigón-patrón equivalente al valor medio ofertado por los suministradores de hormigones preparados para una calidad de 25 MPa de re-

sistencia característica. En consecuencia, queda establecido que este precio P_0 corresponde al que, en cada ciudad o región, aparece como precio representativo de este hormigón patrón, un precio que, para ser más precisos, no incluye la colocación ni el transporte ni, por supuesto, encofrados ni armaduras. Es el simple precio (de contratación) de una mezcla.

Partiendo de estas consideraciones, la primera impresión que se obtiene es la de que la variación en el coste es muy pequeña mientras la calidad no supere los 30 MPa de resistencia característica. Si P_{15} es el precio unitario del hormigón de 15 MPas de resistencia y P_{30} es el de 30 MPa, resulta que el coste de producción es prácticamente el mismo, ya que, con una misma dosificación y áridos, pueden alcanzarse tanto unas como otras resistencias. Basta con reducir el agua de amasado al 0,5 del peso del cemento, para obtener un hormigón fluido de 20MPa de resistencia, y basta con reducir a 0,43 la relación agua/cemento para alcanzar holgadamente, y con consistencias adecuadas, unas resistencia que, oscilando al rededor de los 30 MPa de resistencia media, permitan la contratación de resistencias características de 25MPa con un fractil del 5%, lo cual supone una varianza en torno al 10% de la resistencia media. Admitiendo que un descuido en la dosificación del agua o en la limpieza o calidad de los áridos apenas puede suponer una reducción en el coste del 10%, podemos escribir que

$$P_{15} = 0,9 P_0$$

Partiendo de esta superficial valoración, podemos establecer que, para resistencias características inferiores a 25 MPa el coste del metro cúbico P_f es :

$$P_f = (0,25 + 0,01f_{ck}) P_0 \quad (2)$$

$$\text{para } f_{ck} < 25 \text{ MPa} \quad (2)$$

Para disponer de un soporte que oriente la valoración, se parte del supuesto de que este hormigón-patrón, de coste P_0 y de 25 MPa de

resistencia características (30 MPa de resistencia media), está dosificado de la siguiente forma:

Cemento I-45 A	300 kg/m ³	
Grava 12-20 mm	380 "	Relación a/c = 0,40
Gravilla 5-12 mm.	610 "	
Arena	948 "	Cono de Abrams previsto: 7 cm
Agua	120 "	
Superplastificante	2 "	Melcrete 222
Total	2360	

Tanto el precio de la tonelada de cemento como, muy especialmente, el precio unitario de los áridos, depende del transporte. Englobando en un mismo grupo el precio de los áridos junto con la mano de obra y el correspondiente consumo de energía, se puede intentar la distribución de los costes P_f en los tres sumandos:

$$P_f = (K_c C + K_f F + K_a) P_0 = K_f P_0 = K_f P_{25} \quad (3)$$

en donde G y F son las dosificaciones de cemento y de superfluidificante por metro cúbico de hormigón, K_c y K_f los respectivos precios relativos y K_a una constante en la cual se agrupo el coste relativo a los áridos, el coste de la mano de obra, y el consumo de energía, todo referido al metro cúbico de hormigón. En consecuencia, y en el caso particular del hormigón-patrón:

$$K_f = k_c C + k_f F + k_a = 1 \quad (4)$$

resulta que, de acuerdo con la precedente dosificación:

$$K_f = 300k_c + 2k_f + k_a = 1 \quad (5)$$

conociendo las relaciones entre los precios del kilogramo de cemento utilizado, del superplastificante empleado, y del resto de áridos, mano de obra y energía, y cumpliéndose la relación (5) se deduce que, para un cemento portland I-45 A, para ese agente fluidificante, y para ese resto resulta:

$$\begin{aligned} k_c &= 0,0022 \text{ kg}^{-1} \\ k_f &= 0,017 \text{ kg}^{-1} \\ k_a &= 0,306 \end{aligned}$$

Experimentalmente se deduce que, para obtener un hormigón de parecida consistencia (asiendo de 8 cm en el Cono de Abrams), con la misma relación a/c = 0,4 de agua/cemento, pero de 30 MPa de resistencia característica (resistencia media de alrededor de 35 MPa), se precisa retocar ligeramente la anterior dosificación, resultando:

Cemento portland I-45 A	320 kg/m ³
Grava 12-20 mm	370 "
Gravilla 5-12 mm	600 "
Arena	939 "
Agua 0,4x320	128 "
Superplastificante	3 "
Total	2360 "

que determina un precio de

$$P_{30} = (320 \times 0,0022 + 3 \times 0,017 + 0,306) P_0 = 1,06 P_0 = 1,06 P_{25}$$

indicativo de la circunstancia de que el precio de los hormigones de 30 MPa de resistencia característica (35 MPa de resistencia media), es un 6% más alto que el precio estimado para el hormigón-patrón.

Para obtener, de un modo regular o sistemático, hormigones de 40 MPa de resistencia característica (resistencia media de 48 MPa a los 28 días), pero con consistencias tan fluidas como para alcanzar asientos de, al menos, 15 cm en el Cono de Abrams, se puede hacer de diversas maneras, una de ellas es la de utilizar la siguiente dosificación:

Cemento I-55A	400 kg/cm ³	
Grava 12-20 mm.	317 "	Relación a/c = 0,35
Gravilla 5-12	590 "	
Arena	907 "	Cono de Abrams 15 cm
Agua	140 "	
Superplastificante	6 "	Melcrete 222
Total	2360 "	

Si antes el coste del cemento I-45A se suponía de $0,00022 \text{ Kg}^{-1}$, ahora al subir la calidad de 45 a 55, se supone que ese coste se incrementa en un 7%. El coste unitario del superplastificante se mantiene, si bien aumentando la dosificación para obtener una consistencia tan líquida como para permitir la colocación de bombeo. Los áridos deben ser mejores, y dado que no puede establecerse una correlación directa por la incidencia de valores constantes, se supone que los costes relativos son:

$$\begin{aligned} k_c &= 0,00235 \text{ kg}^{-1} \\ k_f &= 0,017 \text{ kg}^{-1} \\ k_a &= 0,35 \end{aligned}$$

en consecuencia, el coste previsible de este hormigón de 40 MPa de resistencia característica se estima que puede ser de:

$$P_{40} = (400 \times 0,00235 + 6 \times 0,017 + 0,35) P_0 = 1,39 P_0$$

Otros de los datos disponibles es el de los hormigones 45 MPa de resistencia característica (resistencia media de 54 MPa), fabricado con una calidad algo superior de cemento, forzando la riqueza a 425 kg/m^3 , y a 7 kg/m^3 la cantidad de superplastificante. El nuevo coste será, para una similar consistencia:

$$P_{45} = (425 \times 0,0025 + 7 \times 0,017 + 0,35) P_0 = 1,53 P_0$$

Siguiendo sobre la base de mantener la consistencia mínima de 15 cm puede llegarse a duplicar la calidad patron (50 MPa de resistencia característica y 60 MPa de resistencia media), a base de operar con unos cementos de la más alta calidad, cuyo coste se supone de $k_c = 0,0027 \text{ kg}^{-1}$ y de acuerdo con la siguiente dosificación.

Cemento I-55 A especial	450 kg/m^3	
Grava 12-20 mm	305 "	Relación a/c = 0,35
Gravilla 5-12 mm	567 "	
Arena	872 "	Consistencia 15 cm
Agua	158 "	
Superplastificante	8 "	Resist.media 60 MPa
Total	2360 "	

cuyo coste se estima en:

$$P_{50} = (450 \times 0,0027 + 8 \times 0,017 + 0,35) P_0 = 1,7 P_0$$

Resultado que indica que, a igualdad de esfuerzo resistido, los hormigones de 50 MPa son más económicos que los de 25 MPa (el 85%).

Naturalmente que, con otras dosificaciones, se obtienen diferentes resultados. Con todas las reservas que supone la recopilación de unos ensayos sobre probetas que no siempre conservan la misma forma ni mantienen la misma edad, se han introducido las transformaciones consideradas como más adecuadas a cada caso, sustentándose el criterio de mantener fijos los precios k_c , k_f y k_a del cemento, del superplastificante y de los áridos, a fin de ser medianamente consecuentes con el análisis comparativo que este estudio desarrolla. Como lógicamente se anticipa, la principal dificultad en la valoración de estos hormigones de muy alta calidad, radica, en la inclusión del humo de sílice (o micro-sílice) como nuevo componente sin el cual difícilmente se supera la barrera de los 55 MPa de resistencia característica. Aún cuando el precio de este último aditivo varía de unos países a otros, se observa que, sin embargo, oscila de un modo bastante uniforme entre 8 y 10 veces el precio del cemento. En consecuencia, y como mejor representación de estas fluctuaciones, se estima en:

$$k_m = 0,025 \text{ kg}^{-1}$$

CUADRO I
Hormigones de alta resistencia. Relación de dosificaciones, resistencias y costes relativos

n Número	C Cemento kg/m ³	F Súper fluid. kg/m ³	M Micro silic. kg/m ³	W Agua kg/m ³	A Arido kg/m ³	f f _{ck} Mpa	K Coef K	Observaciones K = k _c C + k _f F + k _m M + k _a
0	300	2	0	120	1940	25	1,00	k _c = 0,0022 k _a = 0,306
1	320	3	0	128	1910	30	1,06	k _f = 0,017
2	371	7	0	130	1785	36	1,34	k _c = 0,00235
3	400	6	0	140	1815	40	1,39	k _a = 0,35
4	425	7	0	149	1780	45	1,53	k _c = 0,0025
5	400	16	0	150	1930	48	1,70	Viaducto de Sylans
6	450	8	0	158	1745	50	1,70	k _c = 0,0027 k _f = 0,017 k _a = 0,35
7	425	6,4	0	150	1880	50	1,61	Región
8	425	8,5	0	150	1880	51	1,64	de
9	425	10,6	0	150	1880	52	1,68	Lyon
10	505	0	0	160	1760	54	1,71	k _m = 0,025
11	342	10	38	134	1831	56,4	2,39	Puente de la Isla de Re (Francia)
12	400	15	30	160	1920	56,6	2,43	k _c = 0,0027
13	346	9	38	135	1853	58	2,39	k _f = 0,017
14	344	10	38	135	1845	58	2,40	k _m = 0,025
15	345	11,3	38	135	1851	60	2,42	k _a = 0,35
16	400	16	30	140	1880	67	2,45	Puente de Pertuisset
17	475	18,5	32	135	1790	67	2,78	
18	450	13,3	39	130	1900	68,5	2,77	
19	450	8,2	36	145	1875	69,3	2,60	
20	452	8,2	36	145	1885	70	2,61	
21	315	6	36	145	1775	70	2,20	Nova Scotia.- Toronto 1988
22	500	12,6	42	150	1800	71	2,96	
23	500	25,8	30	135	1800	72	2,89	
24	480	28	38	135	1850	72,2	3,07	
25	500	18	30	135	1800	75,2	2,76	
26	427	18	59	132	1883	76	3,28	
27	530	13	40	145	1755	76,2	3,00	
28	487	10	47	155	1738	76,8	3,00	
29	500	17	30	135	1800	77,3	2,74	
30	450	21	50	140	1795	78	3,17	
31	425	13,8	40	165	1795	80	2,73	Mezquita de Hassan II (Marruecos)
32	500	12	42	138	1805	81	2,95	
33	375	8	75	135	1735	82,3	3,37	
34	486	24	54	135	1773	83,6	3,42	
35	500	13	42	150	1805	84	2,97	k _c = 0,0027
36	428	8	42	117	1912	84,4	2,69	k _f = 0,017
37	513	15,7	43	130	1780	84,8	3,08	k _m = 0,025
38	513	19	43	120	1785	86,3	3,13	k _a = 0,35
39	450	19,5	50	130	1855	88,6	3,15	
40	425	19,5	45	130	1855	89,4	2,95	
41	517	30	58	126	1767	90	3,71	
42	450	19,5	45	130	1855	90	3,02	
43	450	19,5	40	130	1855	91	2,90	
44	450	19,5	45	130	1855	91	3,02	
45	450	21,5	45	130	1855	91,5	3,06	
46	450	19,5	45	140	1850	92	3,02	
47	450	17,5	45	130	1855	92,3	2,99	
48	450	19,5	45	130	1850	92,8	3,02	
49	450	19,5	45	130	1854	93,5	3,02	
50	450	19,5	45	120	1855	94	3,02	
51	500	10	45	145	1800	95	3,00	
52	450	19,5	45	130	1855	95,5	3,02	
53	450	19,5	45	130	1852	96	3,02	
54	513	19	43	120	1765	98	3,13	
55	513	19	43	130	1765	99,4	3,13	
56	513	19	43	120	1765	99,8	3,13	

la más ajustada evaluación de este eficaz producto.

Para evitar inútiles reiteraciones, en el adjunto Cuadro I aparecen las respectivas dosificaciones y resistencias recopiladas de la bibliografía que al final de este texto se incluye. Para facilitar la búsqueda, los datos están ordenados siguiendo el orden creciente de f_{ck} (resistencia característica en probeta cilíndrica a los 28 días). Como en la casilla de observaciones se indica, el coeficiente K_f .

$$P_f = K_f P_0$$

que aparece en la última columna de la tabla, expresa la previsible relación entre el precio P_f de un hormigón de resistencia característica f_{ck} , y el precio P_0 (a la igualdad de restantes condiciones) de un hormigón-patrón de 25 MPa de resistencia característica, tomado como unidad por considerársele como el producto comercialmente más común, entre los suministradores de hormigones preparados. Este coeficiente K_f , número sin dimensiones especificado en la fórmula (3), y que ahora, con la intervención de la microsílíce, adquiere la forma de:

$$K_f = k_c C + k_f F + k_m M + k_a \quad (6)$$

es un conjunto de cuatro sumandos representativos de los costes parciales del cemento, del superplastificante, del humo de sílice, y del resto de obra (áridos, más mano de obra, más consumo de energía). Así por ejemplo, el primer sumando $k_c C$, expresa el cociente que resulta de dividir el coste del cemento empleado en la ejecución de un metro cúbico de un hormigón de resistencia característica f_{ck} , por el coste P_0 de un metro cúbico de hormigón patrón. Siendo múltiples las dosificaciones que conducen a la elaboración de un hormigón de resistencia f_{ck} , no existirá una relación biunívoca entre K_f y f_{ck} . En el gráfico de la figura 6, aparecen representados los 57 resultados consignados en el Cuadro I. Como es obligado, el valor de K_f para un hormigón de resistencia

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

es, por definición, igual a la unidad. La nube de puntos describe, con su dispersión, el desajuste de unas dosificaciones en relación con la resistencia conseguida. Obsérvese que el borde inferior de puntos, representa las soluciones, tanto más económicas en precio, como las más eficaces en su rendimiento mecánico.

Antes de deducir conclusiones, conviene destacar algunas particularidades que pueden haber pasado desapercibidas. Como en todo listado que agrupa procedencias diversas, se han reunido ensayos de laboratorio con extensas series de probetas de control. Con la finalidad de establecer las necesarias correlaciones, se ha supuesto, a falta de datos concretos, que la varianza era del 10% de la resistencia media. Si ahora aceptamos, como resistencia característica, aquella que estadísticamente delimita un fractil del 5%, se deduce que:

$$f_{ck} = (1 - 1,64 \times 0,1) f_{cm} = 0,836 f_c$$

expresión en la cual f_{cm} representa la resistencia media de la serie.

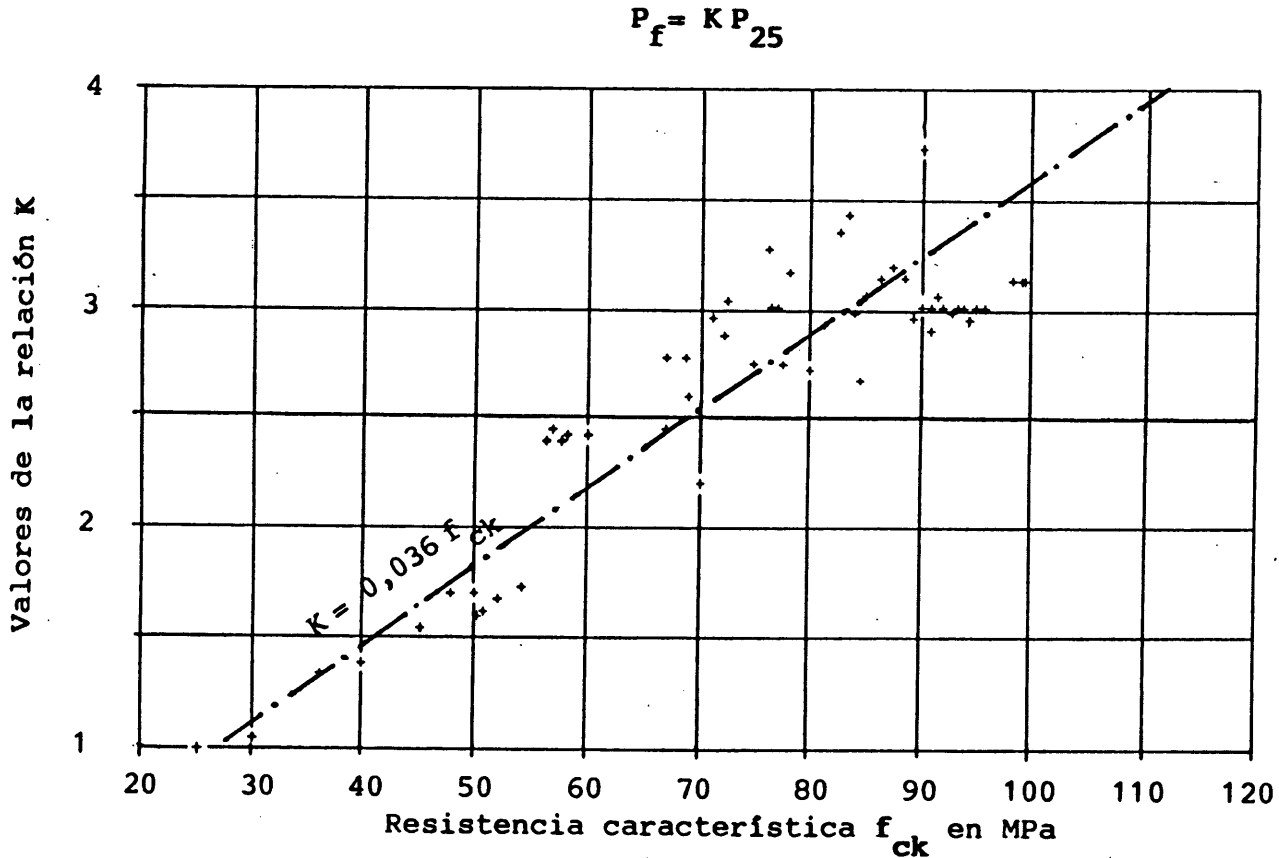
La amplia serie de ensayos realizada con estos hormigones de más de 60 MPa de resistencia, permite establecer una relación media de:

$$f_{c28} = 0,9 f_{c56} \quad (7)$$

como valor representativo del cociente que resulta de dividir la resistencia a los 28 días por la obtenida a los 56 días.

El carácter marcadamente lineal de la nube experimental de la figura 6, permite la simplificación máxima de suponer que el precio de un hormigón es:

$$P_f = 0,036 f_{ck} P_0 \quad (8)$$



directamente proporcional a la resistencia para todo valor superior a 30 MPa. En esta expresión f_{ck} es la resistencia característica expresada en MPa. A título meramente indicativo, puede suponerse que, para valores de:

$$25 < f_{ck} < 29 \text{ MPa} \quad (9)$$

la relación K_f de precios es:

$$K_f = \frac{P_f}{P_0} = 0,012 f_{ck} + 0,7 \quad (10)$$

mientras que, para valores de:

$$17 < f_{ck} < 25 \text{ MPa} \quad (11)$$

el valor de K_f es más bien:

$$K_f = 0,01 f_{ck} + 0,75 \quad (12)$$

CONCLUSIONES

A efectos de estudios comparativos puede suponerse que, en unas mismas condiciones, el precio previsible de un hormigón de alta resistencia es:

$$P = 0,036 f_{ck} P_0 \quad (14)$$

siendo f_{ck} su resistencia característica (fractil del 5%) expresada en MPa y medida en probeta cilíndrica a los 28 días, y P_0 el precio, en

Figura 6. Precio de los hormigones de alta calidad, en relación con el de un hormigón-tipo de 25 MPa de resistencia característica.

igualdad de restantes condiciones, de un hormigón-patrón de $f_{ck}=25\text{MPa}$. Dado que la relación K_f entre los precios:

$$K_f = P_f / P_0 \quad (15)$$

ha sido valorada en base a las respectivas dosificaciones, tanto el precio genérico P_f , como el patrón P_0 se entienden referidos al coste del material, sin incluir posteriores transportes ni gastos de colocación (bombeo o vibración) que, por ser independientes de la resistencia, supone un igual incremento de P_f que de P_0 . En consecuencia, tanto P_f como P_0 , son valores equiparables a los precios de venta que pudiera ofertar un suministrador de hormigones preparados.

EJEMPLO NÚMÉRICO

Aparte de las informaciones puramente comerciales, la referencia (5) indicada en la adjunta Bibliografía, constituye uno de los pocos textos en donde se precisa, de un modo concreto, el valor específico de un hormigón de alta resistencia. Según su autor, Jaime Moreno, desde el año 1962, vienen empleándose en Chicago hormigones de alta resistencia, una modalidad que, desde entonces, se ha hecho cada vez más frecuente. Recientemente, y en la construcción de un edificio de 31 pisos, se han materializado unas ofertas que, contractualmente, se han establecido en \$ 45/yd³ para el hormigón de 3000 psi de resistencia, y \$140/yd³ para el 14000 psi. Tomando como base las transformaciones de:

$$\begin{aligned} 1 \text{ yd}^3 &= 0,7645 \text{ m}^3 \\ 1000 \text{ psi} &= 6,89 \text{ MPa} \end{aligned}$$

resulta que los precios ofertados fueron de:

$$59 \text{ \$/m}^3 \text{ para los hormigones de } 20 \text{ MPa} \quad (16)$$

$$183 \text{ \$/m}^3 \quad \text{"} \quad \text{"} \quad \text{"} \quad \text{"} \quad 96 \quad \text{"} \quad (17)$$

Según la ecuación (12) el precio de un hormigón de 20 MPa es:

$$P_{20} = (0,01 \times 20 + 0,75) P_{25}$$

luego el precio del hormigón-patrón en aquella ciudad debió ser, en el año 1990 de:

$$P_{25} = P_0 = \frac{59}{0,95} = 62 \text{ \$/m}^3$$

y el precio de un hormigón de 96 MPa debería ser, según (14):

$$P_{96} = 0,036 \times 96 \times 62 = 214 \text{ \$/m}^3$$

valor que, en principio, supera en un 17% el precio (17) del metro cúbico contratado. Si ahora, estimando excesiva la diferencia, profundizamos en el texto, nos encontramos con varios malentendidos. El primero de ellos es el de que, según los datos que aparecen en dicho artículo, la resistencia media de las probetas cilíndricas ensayadas a los 56 días fue de:

$$f_{cm \ 56} = 16 \ 139 \text{ psi} = 111,2 \text{ MPa}$$

con una varianza unitaria de 0,058. En estas condiciones, la resistencia característica a la misma edad de 56 días, con un fractil del 5% será:

$$f_{ck \ 56} = (1 - 1,64 \times 0,058) 111,2 = 0,905 f_{cm} = 100,6 \text{ MPa}$$

resistencia que, a los 28 días, supone una característica de:

$$f_{ck} = 100,6 \times 0,9 = 90,9 \text{ MPa}$$

y no los 96 MPa correspondientes a otro fractil distinto al europeo.

Nada se dice si los precios convenidos incluían la colocación por bombeo. Si suponemos

que este coste es de unos 1000 ptas/m³ como término medio, resultaría que el precio del material habría que reducirlo en 8 dólares por metro cúbico, es decir que los precios sin incluir la colocación, debieron ser:

$$P_{20} = 59 - 8 = 51 \$/m^3$$

$$P_{25} = \frac{51}{0,95} = 53,7 \$/m^3$$

y, por consiguiente

$$P_{91} = 0,036 \times 90,9 \times 53,7 = 175 \$/m^3$$

y sumándole ahora los 8 \$/m³ del bombeo:

$$P_{91} = 175 + 8 = 183 \$/m^3$$

$$P_{91} = 183 \times 0,7645 = 140,4 \$/yd^3$$

que coincide con los datos originales.

AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su reconocimiento a Manuel Burón Maestro, Director General del Grupo Pacadar, por su inestimable aportación al facilitarle dosificaciones y costes comerciales con los cuales se ha podido valorar la incidencia de los elementos constituyentes de las mezclas en su doble aspecto de aumento de coste y correlativo incremento de las resistencias mecánicas. ●

BIBLIOGRAFIA, ORDENADA CRONOLOGICAMENTE

- 1.- A.S.G. Bruggeling. Structural concrete: Science and practice. Heron. Vol. 32 n° 2.- Delft Univ. 1987
- 2.- ACI Committee 363. High Strength concrete. Concrete International Vol. 9 n° 10. Oct. 1987.
- 3.- K.M. Page. High strength concrete pumped on world's tallest (300m) concrete building (100 MPa) Concrete International. Vol. 12 n° 1.- Enero 1990.
- 4.- H. Ronneberg, M. Sandvik. High strength concrete for North Sea platforms. Concrete International. Vol. 12 n° 1.- enero 1990.
- 5.- J. Moreno. 225 w. Wacker drive. Concrete International. Vol. 12 n° 1.- Enero 1990
- 6.- F. Larrard. Prévion des resistances mécaniques des bétons à hautes performances. Annales de l'ITBTP n° 483. - Paris Mayo 1990.
- 7.- L. Berntsoib, S. Chandra, T. Kutti. Principles and factors influencing high strength concrete production. Concrete International. Vol. 12 n° 12.- Dic. 1990.
- 8.- J. Bostvoronnois, F. Larrard. Les bétons à haute résistance perdent-ils de la résistance à long terme?. Annales de l'ITBTP, n° 491.- Paris. Febrero 1991.
- 9.- T.A. Durning, M.C. Hicks. Using microsilica to increase concrete's resistance to aggressive chemical.. Concrete International. Vol. 13 n° 3.- Marzo 1991
- 10.- Y. Malier. The french approach to using HPC. Concrete International. Vol. 13 n° 7.- Julio 1991.
- 11.- I. Burnett. Silica fume concrete in Melbourne, Australia. Concrete International. Vol. 13 n° 8.- Agosto 1991.
- 12.- P.C. Aitcin. Long-term behavior of silica fume concrete. Concrete International. vol. 14 n° 4.- Abril 1992.
- 13.- Y. Malier. Les bétons à hautes performances. Presses de l'école national des ponts et chaussées.- Paris 1992.
- 14.- G. Detwiler. High strength silica fume concrete. Concrete International. Vol. 14 n° 10.- Octubre 1992.
- 15.- P.C. Aitcin, A. Neville. High performance concrete demystified. Concrete International. Vol. 15 n° 1.- Enero 1993.
- 16.- C. Ozyildirim. High performance concrete for transportation structures. Concrete International. Vol. 15 n° 1.- Enero 1993.
- 17.- G. González Isabel. Hormigón de alta resistencia. Ed: Intermac. Madrid 1993.
- 18.- S. Alexander. Highlights of the third International Symposium on utilization of high strength concrete. PCI Journal. Vol. 38 n° 6.- Noviembre-diciembre 1993.