

El proyecto y la ejecución de obras con ayuda de sistemas expertos: Aplicación de un prototipo demostrativo a la optimización de la dosificación de hormigones^(*)

Por PABLO RUBIO PEREZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Dragados y Construcciones, S. A.

Se comenta la estructura general de los Sistemas Expertos y sus posibilidades de aplicación, en el futuro inmediato, en la Ingeniería de la Construcción. Se desarrolla, como ilustración, un prototipo demostrativo que resuelve la optimización de la dosificación de hormigones, comprobado mediante su aplicación a la contrastación de la dosificación del hormigón de una presa.

1. INTRODUCCION

Los instrumentos y técnicas de la Inteligencia Artificial, y su extensión a la creación de Sistemas basados en el conocimiento, son, hoy día, adecuados para la solución de problemas con gran número de variantes, no solubles de forma algorítmica y sí heurística, y en los que la acumulación de experiencia anterior, desempeña un papel primordial.

Múltiples actividades del proyecto y ejecución de las obras, cumplen, en buena medida, las condiciones anteriormente indicadas, a las que debe agregarse la motivación del impacto económico que podría derivarse de soluciones más afinadas.

Tales condiciones, incluyendo esta última, se identifican con requerimientos típicos habitualmente recomendados para el desarrollo de Sistemas Expertos (1).

La situación del desarrollo y aplicación de las técnicas del conocimiento o Ingeniería del Conocimiento y su formulación práctica más extendida, que son los Sistemas Expertos, en el área de la Ingeniería de la Construcción, es todavía incipiente, y, dejando a un lado la previsible reserva mantenida por Empresas y Centros no académicos en actividades y/o realizaciones consideradas de interés estratégico, supone, por

el momento, más una inquietud, que una realidad efectiva.

Se ha iniciado, sin embargo, la divulgación de algunas realizaciones en áreas muy diversas de la actividad constructora.

La referencia (2) corresponde al 1^{er} Simposio sobre Sistemas Expertos de Ingeniería Civil, patrocinado por la ASCE, celebrado en Seattle, Washington, en abril de 1986.

Aunque la tónica común de una parte importante de las comunicaciones sea de carácter genérico, la propia celebración del Simposio es, de por sí, un índice del potencial esperado sobre la extensión de estos Sistemas a nuevas posibilidades prácticas en nuestra esfera profesional.

Destacamos como realizaciones concretas entre las presentadas, las relativas a diagnóstico del funcionamiento de bombas centrífugas en plantas energéticas, análisis de vibraciones, programas de soldadura, análisis dinámico y sísmico de estructuras, evaluación de daños en estructuras sometidas a cargas severas, diseño de sistemas de tratamiento y depuración de aguas, y de plantas incineradoras de residuos, estimación de caudales de inundación, diagnóstico sobre seguridad, programas de gestión de proyecto y ejecución de obras, etc.

Las referencias (3) a (7) corresponden a otras aplicaciones específicas, desarrolladas en los

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de junio de 1988.

últimos años en el área del diseño y cálculo estructural.

Por último, la referencia (8) es un informe detallado del trabajo institucionalizado de la División Productique et Construction del CSTB, en colaboración con el INRIA. En él se describen diversos sistemas expertos operativos en las áreas del diseño arquitectónico y edificación (Ingénierie du bâtiment).

En las secciones siguientes se incluirá, en primer término, una referencia somera a la filosofía y configuración de un sistema experto general, refiriéndonos, a continuación, como ilustración, al desarrollo de un prototipo de demostración, programado en LISP, para optimización de la dosificación de hormigones. Finalmente se efectúa la contrastación del prototipo, mediante su aplicación a un ejemplo concreto.

2. Estructura de los sistemas expertos

Los Sistemas Expertos (SS.EE.) son aplicaciones concretas del concepto general, más difuso, de la Inteligencia Artificial, que tratan de simular el razonamiento humano en un área determinada sobre la que se dispone de un conocimiento anterior. Su objetivo fundamental es el de asistir al profesional, puesto ante la necesidad de tratar con un volumen excesivo de información, o impelido a tomar decisiones trascendentes antes de poder examinar todas las posibles opciones.

La configuración básica de un S. E. descansa en la separación del conocimiento de que se dispone en un dominio a tratar, en dos elementos distintos:

1. La Base de conocimientos, que comprende toda la información necesaria, dividida, a su vez, en dos partes:

La Base de datos, que contiene todos los datos básicos que definen la situación del sistema, a lo largo de cada estado del proceso de deducción.

Esta Base de Datos tiene, por tanto, carácter evolutivo, sobre una situación de partida, a la que va incorporando los resultados de las sucesivas deducciones del S. E.

La Base de Reglas, llamadas «reglas de producción», que recoge los propios conocimientos del experto/s, estableciendo modos lógicos de comportamiento del sistema.

La expresión de las reglas es de la forma sencilla SI... ENTONCES, siguiendo la máxima tradicional *modus ponendo ponens*.

Esta forma simplista, pero sumamente potente, de la lógica del S. E., permite una gran versatilidad en su construcción. Por su propia naturaleza, la Base de Reglas tiene, en general, carácter estático durante toda la aplicación, salvo nuevo replanteo inicial del propio S. E.

2. El Motor de Inferencia, independiente de la Base de Conocimientos, que efectúa la aplicación de la Base de Reglas sobre la base de conocimiento, en dos etapas distintas que se repiten ciclicamente.

En la primera etapa, fase de decisión, se seleccionan las reglas interesantes de la Base de Reglas, mediante consideración de las restricciones expresadas por las partes antecedentes, efectuando lo que se llama «resolución de conflictos».

En la segunda etapa, o fase de acción, se activan (se «disparan») las reglas seleccionadas, esto es, se ejecutan los consecuentes, obteniéndose como resultado una nueva situación o estado de la Base de Datos.

La ejecución de los sucesivos ciclos decisión-acción, se controla por una condición básica, como puede ser, por ejemplo, el hallazgo de una solución.

La descripción anterior de la estructura de un S. E. basada en reglas, con ser la más expresiva, no debe entenderse, sin embargo, como un modelo único obligado, de representación del conocimiento. Otros SS. EE. utilizan representaciones basadas en objetos, o en marcos (conocimiento por redes asociativas), y también mixtas como combinación de objetos, reglas y marcos.

En función de la representación formal elegida, debe seleccionarse, finalmente, la herramienta computacional adecuada, constituida por un lenguaje de programación específico, un sistema o entorno asociado que en los desarrollos avanzados, incorporará el motor de in-

ferencia, y el hardware soporte (por ej. máquinas LISP).

En defecto de medios orientados específicamente al trabajo en I. A., todavía poco vulgarizados en el ámbito empresarial, resulta también posible, utilizar técnicas de I. A. sobre ordenadores convencionales, efectuando una programación semi-convencional en lenguajes LISP y/o PROLOG, al menos para la construcción de los primeros prototipos. En la ref. (9), hemos publicado anteriormente, en esta Revista, una aplicación concreta, en el área de la construcción, desarrollada con esta metodología.

En esta misma línea, nos referimos en las secciones siguientes, a un sistema (prototipo de demostración) de ayuda para optimización de la dosificación de hormigones, programado en GCLISP, e implementado en un ordenador PC de 640 kbytes, que incorpora básicamente, aún en forma simplista, los elementos esenciales de la construcción de SS. EE.

3. DESCRIPCION DEL PROTOTIPO PARA OPTIMIZACION DE LA DOSIFICACION DE HORMIGONES

En defecto de poder referir nuestra exposición a tratamientos más apropiados, basados en acumulación de experiencias de empresa, por las razones de reserva, propias y ajenas, apuntadas en la introducción; nos referiremos, en esta ocasión, al problema habitual de la dosificación de hormigones que verifiquen especificaciones determinadas.

Elegimos este ejemplo concreto, perfectamente conocido y resuelto en la práctica usual, por la circunstancia de corresponder claramente a un problema de reglas y no algorítmico, con la observación de que para su solución se utilizan reglas empíricas bien conocidas, es decir, pertenecientes al conocimiento público y escrito.

Esta diferenciación entre conocimiento público y conocimiento tácito individualizado, es, ciertamente, el aspecto fundamental en la construcción de Sistema Expertos, por lo que, manteniéndose otras condiciones típicas, por ejemplo, la solución por vías heurísticas y no algorítmicas, el ejemplo tiene únicamente un ca-

rácter ilustrativo de primera aproximación a estos temas.

Dejemos aquí constancia de nuestro deseo de que, en un futuro próximo, la mayor vulgarización de las técnicas que comentamos, elimine el aspecto de reserva que aún tienen, y la divulgación de sus aplicaciones pueda efectuarse con la misma normalidad que se produce en muchas otras áreas de la tecnología y la investigación.

Describimos, a continuación, los elementos básicos del prototipo, correspondientes a las partes básicas de un S. E, indicadas en la sección 2:

1. Base de Datos (estado inicial)

- Tipo de hormigón: En masa/Para armar.
- Dosificación de cemento en Kg/m³.
- Tipo de armado de secciones: Normal/Fuertemente armadas.
- Tipo de árido: Rodado/Procedente de machaqueo/Mixto.
- Densidades de conjunto y relativas a los materiales.
- Serie UNE de tamices normalizados.
- Curva granulométrica de cada árido individual.
- Relación en peso agua/cemento (eventual).
- Método de puesta en obra del hormigón/consistencia.
- Contenido de humedad de los áridos.
- Inclusión de aditivos (eventual).
- Resistencia media o característica del hormigón (eventual).
- Costes unitarios de los áridos (eventual).

Todos los datos anteriores se introducen, en cada una de las aplicaciones, de forma conversacional.

En el desarrollo de sistemas reales, existirán, además, partes importantes de la Base de Datos, por ej. las relativas a parques de maquinaria, que pueden mantenerse en ficheros permanentes, siendo sólo necesaria su actualización, en su caso.

La disponibilidad de ficheros permanentes en la Base de Datos, no implica, necesariamente, su carácter estático a lo largo de la aplicación

de valores determinados para juegos de parámetros distintos de los correspondientes a su definición inicial.

2. Base de Reglas

Una primera estimación de la entidad alcanzada en el desarrollo de un Sistema de Reglas, está dada por el número total de reglas, según baremos usualmente aceptados, como indica la ref. [2].

Para un número de reglas comprendido entre 50 y 100, que correspondería al Sistema que comentamos, el estadio correspondiente es el de un prototipo de demostración, distante todavía del prototipo de producción (más de 1.000 reglas), alcanzando hasta el momento por muy pocos SS. EE.

En la clasificación de los prototipos en cuatro estadios sucesivos, indicada en la referencia anterior, el número total de reglas es un parámetro de carácter estrictamente indicativo, pues, como se señaló en el Coloquio de las Jornadas de Inteligencia Artificial, celebradas en Barcelona los días 7 y 8 de abril de 1987, patrocinadas por Texas Instruments, hay «reglas y reglas», en alusión a su diferente complejidad.

La necesidad y el valor lógico de todas y cada una de las reglas, son sin embargo, uniformes.

En efecto, la observación más importante relacionada con la construcción del sistema de reglas, es destacar la necesidad de que se incorporen absolutamente todas las directrices que configuren una lógica del sistema cerrada, incluyendo en las mismas, desde las aparentemente triviales, que la máquina no puede aprender por sí sola, hasta las que son expresión de los conocimientos menos accesibles, en general procedentes de una larga experiencia, que sólo habrá podido facilitar el experto.

En el prototipo desarrollado, las reglas a aplicar, pertenecientes al saber empírico común, pueden consultarse en textos al uso, sobre materiales de construcción [9].

Algunos ejemplos de reglas de producción incluidas en el sistema, entre ellas, las tres principales reglas operativas, serían:

- Si la resistencia característica o la resistencia media a los 28 días es un dato, se aplicará el método de la resistencia.
- Si el tipo de hormigón es para armar, con dosificación de cemento no inferior a 300 kg/m³, en secciones no fuertemente armadas, y si el árido es rodado de tamaño máximo 50 ± 20 mm, se ajustará la mezcla de áridos a una parábola de Fuller.
- Si el tipo de hormigón es en masa o para armar en secciones fuertemente armadas, y/o se dispone de más de dos áridos, se ajustará la mezcla de áridos y del cemento a una parábola de Bolomey.
- Si se efectúa consolidación por vibrado, la consistencia del hormigón será seco-plástica.
- Si el árido es de tipo rodado, y la consistencia del hormigón es seco-plástica, la ordenada en el origen de la parábola de Bolomey, será 10.

Debemos destacar aquí, como observación importante, la necesidad del carácter dinámico de los datos sobre los que operan las reglas, para que pueda hablarse, con propiedad, de la naturaleza experta del sistema.

Así, determinada en este prototipo, una u otra forma parabólica de la curva teórica de distribución acumulada de los áridos, desde el primer ciclo de operación, la determinación del único parámetro, para la parábola de Bolomey, debe admitir todavía un cierto grado de incertidumbre (variación) al pasar de un ciclo al siguiente. Su justificación práctica derivaría de considerar una eventual procedencia mixta del árido, como son los casos de machaqueo de áridos rodados, o de mezcla de ambos tipos de áridos, naturales y de machaqueo.

La misma observación se aplica a la cantidad de agua necesaria si la relación agua/cemento no se da como dato.

El control de estas variaciones se efectúa mediante una función de medida de la distancia entre la distribución del material disponible en origen, y la distribución resultante del ciclo inmediato anterior.

Estos problemas, poco relevantes en este sistema sencillo, adquieren dimensión plena en los

casos de ajuste de curvas con un número importante de parámetros, o incluso en los que la propia forma de las curvas admite diferentes posibilidades o familias según la situación de los datos, entre los que mencionamos, como paradigma, los modelos de previsión.

Este sería el caso, por ejemplo, de un sistema experto para el análisis de la previsión y control de avenidas en el área hidrológica.

Las reglas empíricas del prototipo que comentamos, están como decimos, completamente experimentadas. En el planteamiento de un sistema inédito, la adecuación del conjunto de reglas a la definición del problema a tratar, constituirá, obviamente, el núcleo del desarrollo del sistema, siendo, por tanto, la principal dificultad a solucionar.

3. Procesos y Operaciones de Inferencia

La aplicación de la Base de reglas determinará, en primer término, el método particular de ajuste de la mezcla de áridos.

El método de resistencia del hormigón dato se resuelve, a continuación, mediante la aplicación de ábacos tabulados, que determinan las proporciones de mezcla del árido más fino con cada uno de los restantes, en función del módulo granulométrico del primero. Ello nos lleva directamente a un proceso algorítmico que se separa de nuestro objetivo principal, en este escrito, por lo que prescindiremos en adelante de la posibilidad de este método.

Los otros dos métodos que operan mediante sendas curvas de ajuste, parábolas de Fuller y Bolomey, nos permiten asimilar el problema al resuelto por las vías heurísticas en la ref. [10], sin más que hacer corresponder el huso-dato de aquél, por la banda definida por curvas paralelas a la parábola de ajuste, a distancias ± 3 , que es la tolerancia usualmente admitida para los porcentajes finales.

La síntesis del proceso es, en suma, la siguiente:

- Definición conversacional de la Base de Datos inicial 1), relativa a características del hormigón y propiedades físicas de cada material aislado.

- Determinación del método a aplicar, definido desde el ciclo inicial.
- Determinación en cada ciclo, de la cantidad de agua necesaria, y del parámetro de definición de la curva de ajuste, en su caso.
- Optimización del ajuste a partir de sucesivas aproximaciones heurísticas, que se seleccionan mediante aplicación de funciones de escalada a todas las sucesivas mezclas posibles, con adición de un solo agregado original.

Las tres funciones de selección aplicadas corresponden, respectivamente, a la determinación de dos índices de ajuste, esto es, el número de tamices ajustados, y una medida de la desviación conjunta con relación a la curva teórica, y a la determinación del coste promedio.

Como observación de interés sobre la segunda función selectora, señalaremos que la mayor eficiencia experimentada, se ha conseguido con un criterio de Tchebichef, que por su sencillez de formulación es, además adecuado para estos tratamientos heurísticos. La eficiencia la entendemos aquí como probabilidad de alcance de una solución aceptable y rapidez de aproximación a la misma, medida en número de iteraciones, sacrificando, por contra, tiempo de proceso de máquina.

En defecto de medios instrumentales específicos del desarrollo de SS. EE., que permiten la aplicación directa de la Base de Reglas 2) sobre la Base de Datos 1), se ha efectuado una programación en lenguaje básico LISP (primer método de construcción de SS. EE.), que simula la anterior secuencia de operaciones. La formación de las posibles mezclas y la selección de las óptimas se efectúa de la forma indicada en [10]. El programa allí desarrollado constituye pues el elemento fundamental, con efectos equivalentes a los que produciría la aplicación de las reglas seleccionadas por el motor de inferencia, en la construcción del S. E. utilizando herramientas específicas (2.º método).

En procesos menos determinados, el Sistema presentaría a lo largo de la ejecución, la gama de óptimos y subóptimos ordenados según el criterio heurístico discrecional, permitien-

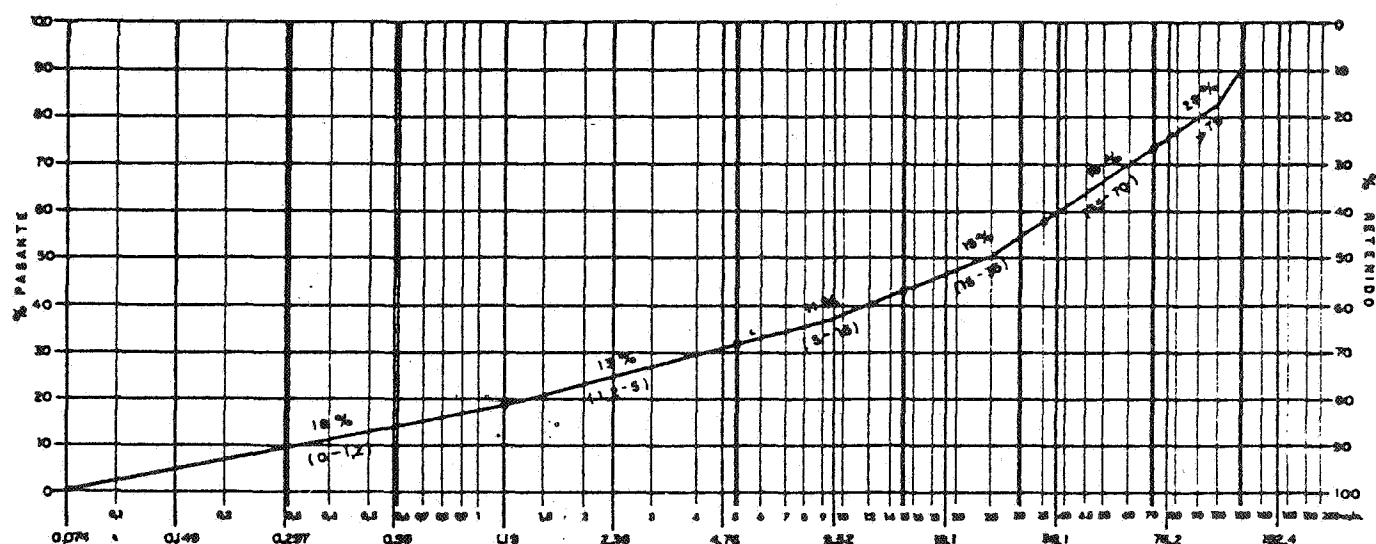


Fig. 1.— Curva granulométrica del material de la gravera.

do al usuario experto la selección de la mezcla (solución temporal) elegida, y por tanto, del nuevo camino a seguir.

La interacción hombre-máquina en estos Sistemas, es así permanente, pudiendo aceptarse las conclusiones del Sistema como simple información, o bien funcionar en todo momento en condiciones de pilotaje automático. Con el prototipo que comentamos, que opera automáticamente, se han obtenido soluciones aceptables en todos los casos experimentados.

4. EJEMPLO DE APLICACION

Para la demostración sobre un ejemplo real, se ha efectuado una contrastación de la dosificación de proyecto del hormigón de una presa de gravedad, en fase de ejecución.

El material origen es rodado, procedente del propio cauce del río. La curva media granulométrica de la gravera se incluye en la figura n.º 1.

El tamaño máximo del material es de 300 mm. El material necesita lavado, habiéndose instalado una planta para lavado y clasificación de arenas, con escurridores para arenas gruesas (1,20 - 6 mm) y finas (0,08 - 1,20 mm).

La dosificación de áridos del proyecto, para el hormigón del cuerpo principal de la presa, es la indicada en la Tabla I.

TABLA I
DOSIFICACION ARIDOS HORMIGON TIPO H-150

Designación	Tipo de árido	Dosificación tipg Kg/m³
A1	Grava (150-70 mm)	523
A2	Grava (70-35 mm)	502
A3	Grava (35-15 mm)	348
A4	Grava (15- 5 mm)	279
A5	Arena gruesa (5-1,2 mm)	246
A6	Arena fina (1,2-0 mm)	373
	TOTAL	2.271

La producción de estos áridos finales incluye un machaqueo primario en machacadora de mandíbulas Allis-Chalmers mod. P-7500-125, y secundario con dos molinos Hydrocone Allis-Chalmers, mod. 836, en paralelo. El material no machacado se recicla sobre los propios molinos.

Para la aplicación del prototipo se han supuesto los datos de densidades y costes indicados en la Tabla II.

Los valores de la cantidad de agua necesaria, y del parámetro de la curva de Bolomey, se determinan en cada ciclo, aplicando un criterio de experto, función de la distancia de la distribución obtenida al final del ciclo anterior, a la distribución inicial de la gravera (Fig. 1), corregida por el lavado de finos.

En la Tabla III se incluyen las soluciones intermedias obtenidas por el prototipo, y la solu-

EL PROYECTO Y LA EJECUCION DE OBRAS CON AYUDA DE SISTEMAS EXPERTOS

TABLA II
DATOS DE LOS MATERIALES (*)

Material	Densidad relativa	Densidad de conjunto	Coste relativo
Cemento	3,05	1,5	
Agua	1,00	1,00	
A1	2,50	1,50	1,00
A2	2,50	1,50	1,00
A3	2,60	1,60	1,00
A4	2,60	1,60	1,00
A5	2,70	1,70	1,50
A6	2,70	1,70	1,50

(*) Datos supuestos, no experimentados.

ción final elegida según la triple jerarquía de prioridades Número de tamices ajustados-Coste unitario de la mezcla-Índice de ajuste a la curva teórica.

TABLA III
SOLUCIONES INTERMEDIAS Y DEFINITIVA

N.º	Índices Ajuste (1)		Composición (%) (2)							Coste Relativo
			A1	A2	A3	A4	A5	A6		
1	1	48,3	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	1,00	
2	2	36,3	0,0	50,0	50,0	0,0	0,0	0,0	1,00	
3	2	29,4	0,0	32,5	32,5	35,0	0,0	0,0	1,00	
4	2	23,8	20,0	26,0	26,0	28,0	0,0	0,0	1,00	
5	3	12,4	14,0	21,0	22,1	23,8	0,0	15,0	1,07	
6	4	11,0	29,5	18,8	18,8	20,2	0,0	12,8	1,06	
7	5	6,7	28,0	17,8	17,8	19,3	5,0	12,1	1,08	
8	4	4,8	26,5	17,0	17,0	18,2	4,8	16,5	1,11	
9	5	3,6	30,3	16,1	16,1	17,3	4,5	15,7	1,10	
10	5	4,6	28,8	20,3	15,3	16,4	4,3	15,9	1,09	
11	6	2,6	27,3	19,3	14,5	15,7	9,1	14,1	1,11	

(1) El primer índice es el número de tamices ajustados. El segundo representa una medida de la desviación con relación a la curva teórica, según el criterio de la aproximación uniforme.

(2) Distribución en volúmenes relativos.

Como se observa en la tabla, los pasos de la solución 7 a la 8, y de la solución 9 a la 10, suponen sendos retrocesos respectivos de la primera y la segunda función selectoras, decididos por el sistema una vez que las soluciones de partida no son mejorables con la disciplina de mezcla adoptada.

Para la solución 11, la función coste no es tampoco mejorable, por lo que se adopta como definitiva.

En la Tabla IV se indica finalmente la comparación de la solución correspondiente a la dosificación de proyecto, y la solución definitiva obtenida con el prototipo, correspondiente a mínimo coste.

TABLA IV
COMPARACION DE SOLUCIONES

Solución	Dosificación (Kg/m ³ - %) (1)						Índice Ajuste (2)	Coste Relativo
	A1	A2	A3	A4	A5	A6		
Proyecto	523,0 23,8	502,0 22,8	348,0 15,2	279,0 12,2	246,0 10,3	373,0 15,7	5,6	1,13
Prototipo	601,0 27,3	425,0 19,3	333,0 14,5	358,0 15,7	216,0 9,1	336,0 14,1	2,6	1,11

(1) La distribución porcentual corresponde a los volúmenes relativos.

(2) Definido con el criterio de la aproximación uniforme.

En resumen, para las hipótesis y método de dosificación adoptados, no necesariamente coincidentes con los criterios originales de proyecto, que no nos son conocidos, y en los que pudieran haberse considerado otros aspectos prácticos, por ejemplo, el mejor aprovechamiento del material de la grava, la solución del prototipo supone una mejora del índice de ajuste a la curva teórica, correspondiente a la heurística definida, de 5,6 a 2,6, compatible con una reducción del 2 por 100 en el coste promedio de los áridos, en términos relativos.

Por otro lado, la inclusión de reglas adicionales, relativas a los aspectos prácticos que comentamos, sería igualmente necesaria, para conferir al prototipo, un verdadero carácter de experto. Un factor primordial es la evaluación del coste absoluto de obtención de la distribución y volúmenes necesarios, a partir de la distribución inicial y volumen total en grava. El desarrollo sucesivo del modelo requeriría, pues, su profundización en este sentido.

REFERENCIAS

1. PAZOS, J.: «Metodología IDEAL para el diseño y la implementación de sistemas expertos». Jornadas RANK XEROX sobre Sistemas Expertos. Noviembre, 1986, páginas 65-94.
2. «Expert Systems in Civil Engineering», Proceedings of a Symposium of ASCE in Seattle, Washington. Edited by C. N. Kostem and M. L. Maher. Abril 8-9, 1986.
3. ADELI, H. and PAEK, Y. J.: «Computer-Aided Desing of Structures Using LISP». Computers and Structures, vol. 22, núm. 6, 1986, págs. 939-956.
4. ADELI, H.: «Artificial intelligence in computer-aided desing of structures, in Engineering Mechanics in Civil Engineering, vol. 1. University of Wyoming, 1984, páginas 184-187.
5. ADELI, H.: «Knowledge-based expert systems in structural engineering». Proc. Second Int. Cong. on Civil and Structural Engineering Computing. London, december 3-5. 1985.
6. BROWN, D. C. and CHANDRASEKARAN, B.: «An approach to expert systems for structural desing». IEEE Comput. Soc. Trends and Applications Conf. Gaithersburg. Maryland, 1983.
7. MAHER, M. L. and FENVES, S. J.: «HI-RISE: an expert system por the preliminary structural desing of high rise buildings». Proc. Int. Federation for Information Processing WG5. 2 Working Conference on Knowledge Engineering in Computer-Aided Desing. Budapest. Hungary, september 11-14, 1984.
8. DELCAMBRE, B.: «Les Systems Experts (Dossier)». 3.^a Journées Informatique et Construction organisées par le Moniteur les 4-5-6 février 1986.
9. MAYOR, G.: «Materiales de Construcción (Teoría y 171 problemas resueltos)». McGraw-Hill, 1980.
10. RUBIO, P.: «Aplicación de la Inteligencia Artificial a la optimización de mezclas de agregados». Revista de Obras Públicas, marzo 1987, págs. 164-168.

