REVISTA DE OBRAS PUBLICAS, Marzo 1987. Págs. 164 a 168.

Aplicación de la inteligencia artificial a la optimización de mezclas de agregados(*)

Por PABLO RUBIO PEREZ
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Dragados y Construcciones, S. A.

Un problema habitual en la construcción, la obtención de mezclas óptimas, que ajusten a especificaciones granulométricas determinadas, es abordado por métodos de Inteligencia Artificial (I.A.), mediante aplicación de funciones heurísticas de búsqueda por escalada, con dos órdenes de prioridad, el coste de la mezcla y su dispersión con relación a la línea media del huso de tolerancia. Se comenta la validez de esta aproximación en relación con el planteamiento alternativo de modelos de programación matemática.

1. INTRODUCCION

El problema complejo de la obtención de mezclas granulares de un número importante de agregados, con optimización de una función mono o multi-objetivo, relacionada, en general, con índices de calidad y de coste, según criterios de prioridad discrecionales, ha sido repetidamente abordado a partir del planteamiento de diversos modelos de optimización matemática.

Pueden citarse así la aplicación de Neumann del método de mínimos cuadrados para minimizar la desviación media, sin consideración de restricciones sobre los límites de especificación, coste, o propiedades físicas de la mezcla [1]. El modelo de programación lineal de Ritter y Shaffer que establece la minimización del coste, con restricciónes sobre los límites de especificación y el límite plástico [2]. El modelo de programación dinámica de Easa, circunscrito a mezclas de dos o tres agregados para pavimentos del hormigón asfáltico, que minimiza los objetivos de coste y desviación media con orden de prioridad fijado [3]. Los modelos de Easa y Can que minimizan la desviación media con restricciones de límites de especificación, coste, índice plástico y módulo de finura [4].

Otros refinamientos del planteamiento mediante modelos matemáticos, tienen en cuenta las variaciones estocásticas de los agregados individuales, como el método gráfico de Sargent para la mezcla de tres agregados [5], los análisis preliminares de Lee y Olson [6], o los métodos iterativo y del agregado dominante en Easa y Can [7].

En general podría decirse que la aplicación de algoritmos y modelos de programación matemática, que han alcanzado cuerpo de doctrina en las técnicas y disciplinas de la Investigación Operativa, no han respondido, sin embargo, a sus expectativas potenciales, al menos en nuestro campo de actividad. Los inconvenientes provienen, en primer término, de la dificultad de ajustar los múltiples factores reales de la ingeniería de la construcción a la rigidez de un modelo matemático, y en segundo lugar, a la servidumbre que implica la necesidad de medios informáticos complejos, software y hardware, muchas veces desproporcionados frente a la entidad del problema. Mencionaremos, a título de ejemplo, que la aplicación de un programa de programación lineal continua, con un número de variables relativamente limitado, podría ser aceptable, pero la aplicación de programas de programación lineal cuadrática o entera, más ajustados al problema real, multiplica desproporcionadamente los costes de ejecución del modelo y son únicamente aceptables en aplicaciones singulares de gran impacto económico [8].

Las técnicas de la I.A. permiten establecer un compromiso más pragmático en la dicotomía modelo real, modelo teórico y pueden consti-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de junio de 1987.

tuir en el futuro una alternativa valiosa, con una economía de recursos sensible. A los algoritmos y métodos específicos utilizados por esta disciplina, procedentes de múltiples campos, y obviamente, en particular, de la propia Investigación Operativa, se une la atractiva posibilidad de integrar directamente el conocimiento difuso experimental, dando así lugar a los llamados Sistemas Expertos.

En la línea citada, el presente artículo desarrolla la solución del problema de mezcla óptima de agregados mediante funciones heurísticas de búsqueda, comprobándose la adecuación de los resultados con relación a los anteriores obtenidos por métodos de programación matemática. Para sencillez de la exposición, el problema se planteará, únicamente, en el caso de granulometrías deterministas de los agregados individuales.

La metodología aplicada se describirá como analogía con uno de los problemas clásicos en la descripción tópica de las técnicas de la I.A., el problema del puzzle.

2. EL 15-PUZZLE

Como se ha mencionado en la Introducción, en muchas ocasiones la práxis de la I.A. sustituye la obtención de un óptimo matemático estricto, por la búsqueda heurística de una solución suficientemente próxima, alcanzable con un esfuerzo computacional realista.

Un método no exhaustivo de búsqueda, aplicable a problemas en los que se produce rápidamente la explosión del espacio de estados posibles, es el de la función de escalada, en el cual la búsqueda se orienta mediante el valor de una función aplicable a los diversos estados sucesores, de forma que se reduzca la probabilidad de encontrar una solución pobre, es decir, situada lejos del óptimo.

Por su analogía con el problema concreto de mezclas de agregados, nos referiremos con algún detalle al problema del 15-puzzle. Se trata de un rompecabezas cuya solución consiste en reordenar, a partir de una configuración inicial dada, 15 elementos numerados móviles situados sobre un tablero de 4 × 4, en una configuración dada. El ordenamiento de los elementos sólo puede hacerse desplazando uno de los elementos hacia el lugar vacío desde una posición ortogonalmente adyacente (fig. 1):

ESTADO INICIAL

7	8	9	10
6	1	2	11
5	4	3	12
	15	14	13

$\Longrightarrow$

ESTADO FINAL

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	

Figura 1.

La primera condición a analizar en este problema es la compatibilidad o incompatibilidad de ambas configuraciones que implica un estudio de la paridad. En múltiples problemas de I.A. el conjunto de estados posibles se divide en dos conjuntos disconjuntos, tales que para uno cualquiera de ellos un estado cualquiera es siempre alcanzable a partir de otro estado cualquiera del grupo, pero, en cambio, no es alcanzable desde un estado cualquiera del grupo disjunto.

En efecto, si se considera la permutación que forman los números siguiendo la secuencia de uno de los estados EI o EF, tomado como referencia, basta observar que cualquier nuevo desplazamiento que se efectúe tiene los siguientes efectos:

En primer término, cambia todos los casos de la paridad de la permutación. En segundo lugar, cambia también la paridad de la posición de la casilla sin número si se trata de un desplazamiento horizontal, pero no la cambia si se trata de un desplazamiento vertical.

La doble consideración de la paridad de la permutación y de la paridad de la posición de la casilla sin número, esto es, en resumen, la paridad del número suma de los tres números siguientes, el número total de inversiones que presenta el estado inicial con relación al estado final, el número de posición del espacio en blanco, y el número de fila de dicha posición, permiten establecer, en definitiva, la compatibilidad de ambos estados.

En consecuencia, el número de estados compatibles con la configuración determinada es $\frac{16\,!}{2}$, indicativo por tanto de la explosión com-

combinatoria que aparecería en el supuesto de una búsqueda exhaustiva.

La selección del estado sucesor exige, por ello, la consideración de heurísticas que midan la proximidad del estado elegido al estado final. Las dos heurísticas ensayadas para este problema son el número de elementos bien colocados (función heurística h_1), y la suma de las dos distancias, horizontal y vertical, entre cada par de elementos situados de manera distinta en uno y otro estado, conocida también como distancia Manhattan (función heurística h_2).

La utilización conjunta de ambas funciones, con una prioridad discrecional, permite un refinamiento en la selección de estados sucesores para un mismo valor de la primera función selectora.

Este método de búsqueda se ha programado en el lenguaje LISP (LISt Processing), idóneo para trabajos de I.A. La ejecución en un ordenador PC de 256 kbytes lleva a la solución del problema propuesto después de 393 operaciones, con un tiempo de proceso de 1 hora (se incluye la solución en el Apéndice 2). La utilización conjunta de las dos funciones selectoras se ha comproblado como necesaria para el éxito de este problema particular.

3. MEZCLAS DE AGREGADOS

La analogía del problema del puzzle con la obtención de mezclas de agregados que cumplan determinadas especificaciones granulométricas, es inmediata. El establecimiento de modelos adecuados de representación del conocimiento es una clave primaria en la aplicación de la I.A., y los juegos representan efectivamente situaciones muy próximas a las reales, por lo que son profusamente utilizados para una exposición didáctica de las metodologías aplicadas.

La variedad de estados posibles en el problema de mezclas, es infinita como corresponde a una transición continua, por lo que es necesario discretizarla, lo que constituye una primera simplificación del problema. La discretización se establece por el mínimo incremento porcentual que permite una diferenciación de las franjas granulométricas, sin mayores reducciones que incrementen el coste de computación.

Las funciones heurísticas a considerar son tres, con una prioridad principal definida, y otras dos prioridades secundarias discrecionales.

El función heurística h_1 se mide por el número de franjas granulométricas con especificación concreta, y debe quedar con valor determinado, igual al número total de gradaciones, al final del proceso, en caso de éxito.

La función heurística h_2 se define como el coste de cada nueva mezcla obtenida.

La función heurística h_3 se define como un índice significativo de la desviación total respecto de la línea media del huso (suma de valores absolutos de las diferencias, o bien la desviación media cuadrática), y representará una medida adicional de la calidad de la mezcla.

La selección de prioridades entre las funciones h_2 y h_3 es discrecional, según se desee primar preferentemente el factor de calidad o el de coste.

La programación de la búsqueda con los criterios definidos se ha efectuado igualmente en lenguaje LISP, habiéndose comprobado para el ejemplo de mezcla de tres agregados de Lee [6], contrastado después por Easa y Can [7], con resultados totalmente concordantes con los anteriores, según se indica en la Tabla I.

Los resultados obtenidos para la mezcla óptima, con prioridad preferente la minimización del coste, son los indicados en la Tabla II.

El programa actúa de forma conversacional, imprimiendo cada sucesiva operación de mezcla, lo que permite al usuario la decisión sobre la continuación o parada en el intento de mejora de la última solución obtenida. Las respuestas del sistema, en el ordenador PC de 256 Kbytes, se obtienen en tiempos admisibles que pueden ser aún considerados conversacionales. Debe observarse que la obtención de una solución ajustada a las especificaciones granulométricas, no significa en este caso, a diferencia del ejemplo del puzzle, que haya sido alcanzada una meta óptima, ya que, sin disminuir el valor de la heurística h_1, puede todavía mejorarse una u otra o ambas heurísticas h_2 y h_3. La detención final del proceso es discrecional del usuario, o queda determinada después de comprobar que

TABLA I

DATOS PARA MEZCLA DE TRES AGREGADOS

Criba		Porcentaje que pasa para cada agregado			Especificación	
Designación	Tamaño	A	B	C	Huso	Punto medio
C1	1 in.	100	100	100	94-100	97,0
C2	1/2 in.	63	100	100	70- 85	77,5
C3	N.° 4	19	100	100	40- 55	47,5
C4	N.° 10	8	93	100	30- 42	36,0
C5	N.° 40	5	55	100	20- 30	25,0
C6	N.° 80	3	36	97	12- 22	17,0
C7	N.° 200	2	3	88	5- 11	8,0
Coste unitario		13	11,3	22		

TABLA II

RESULTADOS

Proporciones de mezcla			Coste unitario	Porcentajes de paso de la mezcla óptima						
A	B	C		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
60	37	3	12,64	100	77	51	42	26	18	5

no resulta posible mejorar la solución anterior, con la disciplina de busca aplicada, si se produce la repetición de la misma. La salida de ordenador de este proceso conversacional se incluye en el Apéndice 1.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. NEUMANN, D. L.: «Mathematical Method for Blending Aggregates». Journal of de Construction, ASCE, Vol. 90, N.° CO 2, pp. 1-13. 1964.
2. RITTER, J. B. and SHAFFER, L. R.: «Blending Natural Earth Depositis for Least Cost». Journal of de Construction Division ASCE. Vol. 87, n.° CO 1, pp. 39-61. 1961.
3. EASA, S.: «Trade-off of Gradation and Cost Requirements in Aggregate Blending». Journal of Cement, Concrete and Aggregates, ASIM. Vol. 7 n.° 1. 1985.
4. EASA, S. and CAN, E.: «Optimization Model for Aggregate Blending». Journal of Construction Engineering and Management, ASCE. Vol. 111, n.° 3. Sept. pp. 216-230. 1985.
5. SARGENT, C.: «Economic Combinations of Aggregates for Varions Types of Concrete». HRB Bulletin 275. pp. 1-17. 1960.
6. LEE, D. and OLSON, D.: «Chance Constrained Aggregate Blending». Journal of Construction Engineering and Management. Vol. 109, n.° 1, pp. 39-47. 1983.
7. EASA, S. and CAN, E.: «Stochastic Priority Model for Aggregate Blending». Journal of Construction Engineering and Management. Vol. 111, n.° 4, pp. 358-373. 1985.
8. DA DEPPO, L., DATEI, C. and FIOROTTO, V.: «Optimizing the Choice of Quarries for Large Dam Construction». Water Power and Dam Construction. pp 40-44. 1985.

APENDICE 1

EJEMPLO DE MEZCLA OPTIMA DE TRES ARIDOS (TABLA I)

```
$ ARIDO-A
((COMPOS (100 0 0)) (GRANUL ((1 2) (2 3) (3 5) (4 8) (5 19) (6 63) (7 100))) (COSTE 13))
$ ARIDO-B
((COMPOS (0 100 0)) (GRANUL ((1 3) (2 36) (3 55) (4 93) (5 100) (6 100) (7 100))) (COSTE 11,3))
$ ARIDO-C
((COMPOS (O O 100 )) (GRANUL ((1 88) (2 97) (3 100) (4 100) (5 100) (6 100) (7 100))) (COSTE 22))
$ (SETQ L (LIST ARIDO-1 ARIDO-2 ARIDO-3))
$ (OPTIM L O)
((NB 1) ((COMPOS (0 100 0)) (GRANUL ((1 3) (2 36) (3 55) (4 93) (5 100) (6 100) (7 100))) (COSTE 11,3)))
SIGA
((NB 6) ((COMPOS (65 35 0)) (GRANUL ((1 2) (2 14) (3 22) (4 37) (5 47) (6 75) (7 100))) (COSTE 12,4)))
SIGA
((NB 7) ((COMPOS (62 33 5)) (GRANUL ((1 6) (2 18) (3 25) (4 40) (5 49) (6 76) (7 100))) (COSTE 12,9)))
SIGA
((NB 7 ((COMPOS (60 37 3)) (GRANUL ((1 5) (2 18) (3 26) (4 42) (5 51) (6 77) (7 100))) (COSTE 12,6)))
SIGA
((NB 7) ((COMPOS (60 37 3)) (GRANUL ((1 5) (2 18) (3 26) (4 42) (5 51) (6 77) (7 100))) (COSTE 12,6)))
FIN
```

APENDICE 2

SOLUCION DEL 15-PUZZLE (EJEMPLO FIG. 1)

```
$ EI
((1 7) (2 8) (3 9) (4 10) (5 6) (6 1) (7 2) (8 11) (9 5) (10 4) (11 3) (12 12) (13 B) (14 15) (15 14) (16 13))
$ EF
((1 1) (2 2) (3 3) (4 4) (5 5) (6 5) (7 7) (8 8) (9 9) (10 10) (11 11) (12 12) (13 13) (14 14) (15 15) (16 B))
$ (CAMINO EI EF)
((OPERACIONES ( D D D AR AR AR I AB AB D AB I AR I AR I AB D D AB D AR AR AR I
AB D AB AB I AR AR D AR I AB D AR I AB D AR I I I AB AB AB D D D AR AR AR I AB
D AR I AB AB D AB I I I AR D D AB D AR AR AR I AB D AB AB I AR AR AR D AB I AB
AB D AR AR AR I AB AB D AB I AR AR D AR I AB D AR I AB D AR I I I AB AB AB D D
D AR AR AR I AB D AB AB I I I AR AR D D AB AB D AR I AR I I AB AB D D D AR AR AR
I AB D AB AB I I I AR AR D AR D D AB AB AB I AR D AB I AR D AB I AR AR D AR I AB
AB D AB I AR D AB I AR D AB I I I AR AR D AB D AB D D AB I I AR AR D AR D AB I I
AB AB I AR D AR D D AR I AB I AB AB I AR D AR D AR D AB I I AB AB D D AR AR AR
I AB I AB AB D D AR AR AR I AB D AB AB I AR D AB I AR I I AB D D D AR I AB D AR
AR AR I AB D AB AB I I I AR D AB D D AR AR AR I AB D AB AB I I AR I AB D D D AR
AR AR I AB AB AB D AR I AR D AR I AB D AR I AB D AR I I AB AB AB I AR D AR AR D
D AB I AR D AB AB AB I AR D AR AR I AB AB AB D AR AR I AR D AB AB AB I AR I AB
D D AR AR AR I AB AB D AB I I AR D AB D AR AR I AR D AB AB AB)) (NUMERO 393))*
```

*AR = ARRIBA, AB = ABAJO, D = DERECHA, I = IZQUIERDA