

## ACERCA DE LA CONVENIENCIA DEL USO DE ALGORITMOS GENETICOS COMO HERRAMIENTA PARA LA DOSIFICACION DE HORMIGONES

Adrián Will<sup>a</sup>, Paula Folino<sup>b</sup>, Humberto Bálzamo<sup>b</sup>, Guillermo Etse<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> CEMCI - Centro de Métodos Numéricos y Computacionales en Ingeniería

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología - Universidad Nacional Tucumán - Av. Independencia  
1800 (CP 4000) – Tucumán - Argentina – [awill@herrera.unt.edu.ar](mailto:awill@herrera.unt.edu.ar) - [getse@herrera.unt.edu.ar](mailto:getse@herrera.unt.edu.ar)

<sup>b</sup> LMNI - Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería, - Laboratorio de Materiales y Estructuras  
- Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires - Las Heras 2214 (C1127AAR) Buenos Aires  
– Argentina - [pfolino@fi.uba.ar](mailto:pfolino@fi.uba.ar) - [hbalzamo@fi.uba.ar](mailto:hbalzamo@fi.uba.ar)

**Palabras Clave:** ANFIS, Algoritmos Genéticos, hormigón de alta resistencia, hormigón de resistencia normal, dosificación.

### Resumen

Para la dosificación de hormigones de resistencia normal se utilizan métodos empíricos que han sido suficientemente probados. En cambio, en lo que respecta a hormigones de alta resistencia, hay una falencia de dichos métodos, y habitualmente se recurre a la técnica de prueba y error para su dosificación. Esto involucra no sólo importantes costos de ensayos de laboratorio, sino también el consumo de un valioso tiempo que es necesario para realizar los ensayos experimentales. Por lo tanto la implementación de un sistema numérico que permita reducir dichos costos es de sumo interés para el ámbito de la construcción.

En trabajos anteriores, los autores han desarrollado dos sistemas numéricos. Primero, un sistema de predicción, basado en una red del tipo “Adaptive Neuro Fuzzy Inference System” (ANFIS), que estima la resistencia uniaxial a compresión del hormigón para una dosificación dada como dato de entrada. Luego, un sistema de dosificación, basado en un tipo de algoritmos genéticos “Niching Genetic Algorithms” (NGA) el cual, utilizando el sistema de predicción, resuelve el problema inverso: dada una cierta resistencia uniaxial a compresión, predice un listado de posibles dosificaciones que conducirían a esa resistencia dato.

En el presente trabajo se analizan de manera interdisciplinaria los resultados del sistema de dosificación, y se implementan mejoras tendientes a la coherencia de los resultados desde el punto de vista de la tecnología del hormigón. Se discute la utilidad y factibilidad de llevar estos métodos al campo de aplicación práctica.

## 1 INTRODUCCIÓN

La dosificación de hormigones, se realiza en general por medio de la aplicación de métodos empíricos. En el caso de hormigones de resistencia normal (*NSC Normal Strength Concretes*), existen diversos métodos que han sido suficientemente probados. Sin embargo en el caso de los hormigones de alta resistencia (*HSC High Strength Concretes*) la dosificación es en general aún del tipo prueba y error, existiendo algunos pocos métodos sugeridos en la bibliografía. La principal motivación que llevó al desarrollo de la línea de investigación presente en este trabajo, es el hecho de que prácticamente no existen sistemas numéricos de dosificación.

Desde el punto de vista de la tecnología del hormigón, si bien ninguna herramienta numérica puede evitar la necesidad de realizar ensayos de laboratorio de verificación, al menos permitiría reducir la cantidad de pruebas, disminuyendo consecuentemente los costos y los tiempos de ensayos.

Desde el punto de vista del análisis estructural, un sistema de este tipo permitiría en el momento de proyectar una estructura, definir algunos parámetros que son de fundamental importancia en el comportamiento mecánico del hormigón, como la relación agua-materiales cementicios que define la porosidad, o como el tamaño máximo del agregado grueso que tiene una importante influencia en la energía de fractura, o como el tipo de agregado grueso que influye entre otras cosas en el módulo de elasticidad.

Este trabajo es la continuación de esta línea de investigación, en la que se han desarrollado dos sistemas numéricos:

Uno, que predice la resistencia uniaxial a compresión del hormigón para una dosificación dada, basado en una red del tipo Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (*ANFIS*). Éste, se denominará “sistema de predicción” a lo largo del trabajo.

Otro, que resuelve el problema inverso: dada una cierta resistencia uniaxial a compresión, predice un listado de posibles dosificaciones que conducirían a esa resistencia dato, basado en un tipo de algoritmos genéticos: Niching Genetic Algorithms (*NGA*). Este sistema, fue íntegramente desarrollado por los autores en Matlab 7, utilizando como parte de las funciones de fitness, la red ANFIS previamente desarrollada. Éste, se denominará “sistema de dosificación” a lo largo del trabajo.

Ambos, fueron propuestos en un principio con el objeto de predecir resultados sólo de hormigones de alta resistencia (*HSC*). Luego se extendieron, de manera de incluir también hormigones de resistencia normal (*NSC*). Su rango de aplicabilidad actual incluye hormigones dentro de un rango de resistencia uniaxial a la compresión  $f'_c$  entre 20 y 120 MPa.

El objetivo del presente trabajo es analizar, desde un punto de vista práctico, las ventajas y falencias del sistema de dosificación basado en algoritmos genéticos desarrollado. En otras palabras, una vez probado que el mismo funciona desde el punto de vista computacional, prediciendo rangos de error adecuados respecto a la base de datos original la cual incluye una población de 254 datos correspondientes a mezclas con sus respectivos valores de  $f'_c$ , analizar qué mejoras convendría introducir de manera que resulte factible su utilización concreta.

Así, se observó por ejemplo que el volumen de las dosificaciones propuestas por el sistema original no conducía exactamente a un volumen igual a  $1\text{m}^3$ , y aunque el error siempre era inferior a aproximadamente un 10%, se introdujo una modificación tendiente a corregir este aspecto. Análogamente, se introdujeron otras modificaciones tendientes a optimizar diferentes aspectos de los resultados. Este proceso condujo a la imposición de una serie de restricciones operativas que se describen en la sección 4.

Como resultado, se consiguió desarrollar un sistema que entrega listas de soluciones con un número importante de restricciones operativas, y cuyos resultados responden con bastante exactitud a la evidencia experimental.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL “SISTEMA DE PREDICCIÓN”

Este sistema predice, para una determinada dosificación de hormigón dada como dato, la resistencia a compresión uniaxial  $f'_c$  del hormigón resultante.

Se utilizó la herramienta ANFIS contenida en el Fuzzy Logic Toolbox de Matlab, para desarrollar una red. Esto se hizo en base a 247 datos recolectados de la literatura, cada uno de los cuales consiste en una determinada dosificación y su correspondiente valor de resistencia a la compresión uniaxial  $f'_c$  obtenido mediante ensayo. Estos datos se recolectaron de manera de que cumplieran con las condiciones que se detallan a continuación, lo cual restringe la aplicabilidad de la red ANFIS desarrollada a las mismas condiciones generales:

- Probetas cilíndricas 100mm de diámetro y 200mm de altura (4in/8in)
- 28 días de curado bajo condiciones similares.
- Edad de ensayo: 28 días
- Cemento Tipo I
- Similar velocidad de carga
- Sin fibras incorporadas
- Sólo arena natural como Agregado Fino
- Sin aire incorporado (sin agentes de incorporación de aire)

En cuanto a las adiciones minerales, se incluyeron 3 casos:

- sin adiciones minerales
- con *silica fume*
- con *fly ash*

Se encontraron pocos datos con ambas adiciones (*silica fume* y *fly ash*) en conjunto, dado que es usual que se agregue sólo una de ellas. Por lo tanto, se eliminó la posibilidad de que existan ambas adiciones al mismo tiempo, ya que el sistema desarrollado no resultaría confiable.

Las variables elegidas como relevantes para el problema fueron:

1. Contenido de cemento [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
2. Contenido de *silica fume* [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
3. Contenido de *fly ash* [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
4. Contenido de agua [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
5. Contenido de super plastificante [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
6. Contenido de agregado grueso [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
7. Contenido de agregado fino [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
8. Tamaño máximo de agregado grueso [mm]
9. Tipo de agregado grueso

Nótese que las variables 1 a 8 son numéricas y por lo tanto, no representan problemas a la hora de representarlas y predecirlas mediante herramientas numéricas.

En contraposición, la variable 9 que considera el tipo de agregado grueso, no es numérica y corresponde a la clasificación geológica del agregado grueso utilizado, como por ejemplo piedra caliza dolomítica, piedra caliza calcítica, granito, distintos tipos de grava, etc. Para poder ser utilizada en ANFIS, fue necesario codificarla numéricamente. Luego de varias pruebas se procedió a clasificar el tipo de agregado grueso en 4 grandes clases: Granito, Basalto, Caliza, y Grava, que son codificadas para ANFIS como 4 variables binarias (ver Folino et al. [2007]), obteniendo en total 12 variables.

La red ANFIS desarrollada finalmente, tiene entonces las siguientes características:

1. FIS Tipo: Sugeno
2. Variables de Entrada: 12
3. Variables de Salida: 1
4. Funciones de Pertenencia de Entrada: 2 funciones de Gauss (gaussmf.m) por

variable

5. Tipo ANFIS: Grid Partition (Partición en Grilla)
6. Cantidad de Reglas generadas:  $2^{12}$  (4096 reglas en total)
7. Método de Entrenamiento: Híbrido
8. Tamaño Conjunto de Entrenamiento: 163 Datos
9. Tamaño Conjunto de Chequeo: 84 Datos
10. Error de Entrenamiento (Relativo): 1.98
11. Error de Chequeo (Relativo): 1.78

La gran cantidad de reglas generadas resulta en una red lenta para cargar en memoria, pero una vez cargada se puede evaluar una gran cantidad de veces a buena velocidad, por lo que no es un factor de gran impacto.

### 3 DESCRIPCIÓN DEL “SISTEMA DE DOSIFICACIÓN”

La dosificación del hormigón consiste en la determinación de las proporciones en que han de mezclarse los componentes que constituyen un hormigón. Dado que el hormigón está constituido por diversos materiales, no existe una única dosificación posible para obtener una resistencia uniaxial a compresión  $f'_c$  determinada, sino que hay un rango de dosificaciones posibles que responden a esa misma resistencia.

El objetivo del sistema de dosificación propuesto es predecir la mayor cantidad de dosificaciones posibles que permitan obtener un valor dado como dato de resistencia uniaxial a compresión  $f'_c$ . De esta manera, esta herramienta informa todas las posibles dosificaciones de manera tal de poder seleccionar luego la que resulte más conveniente de acuerdo a costos, propiedades específicas, disponibilidad de materiales, etc.

Para el presente sistema, se utilizó el Algoritmo Genético Niching (ver Mahfoud [1995]), con sólo modificaciones menores. Esto se debe a que otros algoritmos estudiados (Automatic Ratio Genetic Algorithm, Restricted Tournament selection, Worst Among Most Similar, entre otros), en general, requieren de una definición a priori de radio entre los óptimos, que en el caso del algoritmo utilizado, es implícita. Si bien para algunos valores de  $f'_c$  este radio puede ser estimable, en general no lo es, ni es necesariamente uniforme en el espacio de búsqueda. Mas aún, en general se requiere de ajuste fino de algunos otros parámetros, que en el caso del algoritmo seleccionado, se limita a la proporción de aplicación de cada operador de crossover, cuya puesta a punto es sencilla y no excesivamente sensible a perturbaciones.

El Algoritmo Genético Niching permite predecir plafones de soluciones, de manera de obtener listas de dosificaciones, lo cual es el objetivo de este sistema como se explicara previamente. Ya que una descripción detallada del algoritmo utilizado, así como los detalles de la implementación, quedan fuera de los objetivos del presente trabajo, se proporcionan a continuación las características más relevantes del sistema, incluidas las optimizaciones realizadas teniendo en cuenta las restricciones operativas que se detallan en la sección 4.

#### 3.1 Matriz de Bounds o límites para cada variable:

Los resultados experimentales sugieren que el rango en el que se mueven las variables debe ser distinto para diferentes rangos de  $f'_c$ . Se utilizaron entonces cuatro matrices distintas, correspondiente a distintos rangos de  $f'_c$ . En la Secc. 4, se verá que estas matrices se ajustaron en el presente trabajo para contemplar nuevas restricciones operativas (Sin uso de Fly Ash por encima de 60 MPa, especialmente).

##### **Rango 1 (0 a 30 MPa)**

$$\text{Bounds1} = \begin{pmatrix} 270 & 0 & 0 & 170 & 0 & 800 & 600 & 9 & 1 \\ 410 & 15 & 15 & 230 & 0 & 1250 & 900 & 20 & 4 \end{pmatrix}$$

**Rango 2 (30 a 60 MPa)**

$$\text{Bounds2} = \begin{pmatrix} 280 & 0 & 0 & 130 & 0 & 800 & 600 & 9 & 1 \\ 600 & 50 & 125 & 220 & 11 & 1300 & 1100 & 20 & 4 \end{pmatrix}$$

**Rango 3 (60 a 95 MPa)**

$$\text{Bounds3} = \begin{pmatrix} 380 & 0 & 0 & 120 & 2 & 800 & 450 & 9 & 1 \\ 720 & 100 & 0 & 210 & 20 & 1400 & 1000 & 20 & 4 \end{pmatrix}$$

**Rango 4 (Más de 95 MPa)**

$$\text{Bounds4} = \begin{pmatrix} 420 & 35 & 0 & 100 & 10 & 800 & 450 & 9 & 1 \\ 850 & 210 & 0 & 160 & 37 & 1300 & 800 & 20 & 4 \end{pmatrix}$$

Este ajuste produce, como se verá al final, un rango de soluciones propuestas bastante bien ajustado a los resultados experimentales disponibles.

**3.2 Función Distancia:**

Para aplicar este algoritmo es necesario definir una distancia. Esta distancia fue mejorada, cambiándose la original por la siguiente:

$$d(sol_1, sol_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } |sol_2^i - sol_1^i| \leq \text{Diferencia}(i) \quad \forall i = 1, \dots, 9 \\ \sum_i (sol_2^i - sol_1^i)^2 & \text{si } |sol_2^i - sol_1^i| > \text{Diferencia}(i) \text{ para algún } i = 1, \dots, 9 \end{cases}$$

donde  $\text{Diferencia} = (10, 5, 5, 1.5, 0.5, 10, 10, 1, 1)$ .

O sea, cuando una solución difiere de otra en menos de lo indicado, la distancia entre ambas es 0, y el algoritmo es forzado a considerarlas iguales. Esta nueva distancia provoca una menor incidencia de soluciones iguales o demasiado similares en la población final, lo que a su vez resulta en una mayor cantidad de soluciones útiles producidas por el sistema. Esto permitió bajar notablemente el tiempo general de convergencia eliminando el algoritmo de clustering utilizado en las versiones preliminares del sistema para eliminar soluciones redundantes. Un simple reordenamiento y eliminación de las soluciones sucesivas que no cumplen la condición arriba mencionada, es suficiente para producir una lista de soluciones útiles, sin repeticiones.

**3.3 Arquitectura del Algoritmo Genético:**

Se utilizó el siguiente esquema, que produjo una cantidad adecuada de soluciones válidas distintas en una sola corrida, una vez puesto a punto el sistema.

- **Tamaño de la Población Inicial:** 450 Individuos
- **Generación de la población Inicial:** Al azar, cumpliendo los límites (matriz de Bounds correspondiente al rango del valor objetivo de  $f'_c$  elegido) y las restricciones operativas (ver Secc. 4)
- **Cantidad de Generaciones:** 8 vueltas de 12 generaciones cada una (96

generaciones en total), con comprobación de restricciones y limpieza de soluciones inválidas entre vuelta y vuelta.

- **Operadores de Crossover utilizados:** Uniform Crossover with shuffle, y Cube Crossover
- **Relación de aplicación de Operadores de Crossover:** 92 % Uniform Crossover with shuffle, 8 % Cube Crossover
- **No se utiliza operador de Selección** (ya que toda la población es emparejada al azar y cruzada)
- **No se utilizaron operadores de Mutación** (debido a la alta probabilidad de que tome una solución válida y produzca una inválida a partir de ella)
- **Limpieza de Población Final:** Ordenamiento de la población de acuerdo a las 3 primeras variables no nulas (Cemento, Silica Fume o Fly Ash, Agua, y Plastificante), eliminación de 2 soluciones sucesivas cuya diferencia absoluta sea menor que la indicada en el vector de Diferencias.
- **Función de Evaluación (Fitness Function):**

$$F(sol) = -(P(sol) - Valor\_Objetivo)^2 - G(\beta_p(sol)) - (1 - Vol(sol))^2$$

donde  $F$  es la función de evaluación,  $sol$  es la solución considerada,  $P$  es la predicción dada por la red ANFIS, es decir por el “sistema predictive” desarrollado para la solución considerada,  $\beta_p$  es el parámetro de prestación definido en Folino et al. [2008],  $G$  es una función de penalización, y  $Vol$  es el volumen calculado para la solución (ver Secc. 4.3).

Esta arquitectura produjo una cantidad adecuada de soluciones en la primera corrida en el 80% de las pruebas (36 casos de 45). En 90 % de las pruebas bastó tomar la mejor de 3 corridas. En los casos restantes se extendió a 10 vueltas de 15 corridas cada una, debido a la existencia de pocas soluciones o a un espacio de búsqueda desconexo (caso de permitir cualquier tipo de Agregado Grueso, ya que cada tipo de Agregado Grueso representa una zona distinta y desconexa de soluciones con respecto a las otras). Restan casos inevitables donde la cantidad de soluciones es muy restringida, o las restricciones son incompatibles o casi incompatibles, donde el sistema produce pocos resultados (menos de 50 soluciones)

#### 4 RESTRICCIONES OPERATIVAS INTRODUCIDAS

Como se dijera en la introducción, el objetivo del presente trabajo es detectar qué mejoras se podrían introducir en el sistema de dosificación propuesto, de manera de que resulte factible su utilización concreta. Por lo tanto, luego de un análisis exhaustivo de los resultados, se introdujeron las siguientes restricciones operativas tendientes a acercar las soluciones dadas por el sistema propuesto a soluciones válidas, factibles de ser utilizadas en la práctica.

Es importante notar que la incorporación de restricciones operativas a un algoritmo evolutivo de cualquier tipo, es un problema complicado sin una solución general. Debe ser lograda o bien en la codificación del problema, o se debe diseñar una arquitectura adecuada (tipo de AG, operadores de selección, cruzamiento y mutación, etc.), de manera que las nuevas soluciones que se vayan produciendo sigan respetando las condiciones operativas dadas en la población anterior. Esto debe ser hecho en cada problema en particular. Además, la incorporación de nuevas restricciones resulta en un espacio de búsqueda más restringido, donde la probabilidad de encontrar óptimos locales o soluciones no útiles es mayor.

Si bien la incorporación de restricciones operativas al sistema de dosificación original, por un lado dio como resultado procesos más complicados y lentos (debido a la necesidad de incorporar procesos que eviten quedar atrapados en estos óptimos globales, entre otros),

mayores tiempos de proceso, y menor cantidad de soluciones útiles producidas, por otro lado permitió obtener resultados que responden con bastante exactitud a la evidencia experimental.

De la observación crítica de los resultados generados por el sistema de dosificación original, se concluyó que era conveniente mejorar o solucionar una serie de falencias que estos resultados presentaban. Este proceso se hizo mediante la imposición de una serie de restricciones operativas que se detallan a continuación:

**1. Determinación de Soluciones Distintas:** Se observó que entre las soluciones que daba el sistema de dosificación original, algunas eran prácticamente iguales.

Según lo indicado en la Secc. 3.3, para la limpieza de la población final (ver Secc. 3.2 y 3.3), es necesario indicar cuándo 2 mezclas son consideradas distintas, de modo de identificar las soluciones demasiado similares. Se determinaron diferencias mínimas por variable, en base a lo observado en los datos recogidos originalmente de la literatura (para el entrenamiento de la red ANFIS). Las diferencias tomadas son las siguientes:

- **Cemento:** 10 kg/m<sup>3</sup>
- **Silica Fume:** 5 kg/m<sup>3</sup>
- **Fly Ash:** 5 kg/m<sup>3</sup>
- **Agua:** 1.5 kg/m<sup>3</sup>
- **Super Plastificante:** 0.5 kg/m<sup>3</sup>
- **Agregado Grueso:** 10 kg/m<sup>3</sup>
- **Agregado Fino:** 10 kg/m<sup>3</sup>
- **Tamaño Máximo del Agregado Grueso:** 1 (adimensional; esta variable sólo puede tomar 2 valores distintos, correspondientes a la malla utilizada, por lo tanto una diferencia de 1 es suficiente para distinguir entre ellos)
- **Tipo de Agregado Grueso:** 1 (adimensional; esta variable puede tomar 4 valores enteros, 1 a 4, representando el tipo geológico de Agregado Grueso utilizado. Ver Secc. 2)

**2. Cantidad de Cifras Decimales:** Se notó que el sistema proporcionaba varios lugares decimales, lo cual no tiene mayor sentido en muchos casos, dado que por ejemplo el Cemento, Silica Fume y Fly Ash, se miden como máximo en una cantidad entera de Kgs. Esta condición resultó incompatible o casi incompatible con la siguiente (volumen de 1 m<sup>3</sup>, ver comentario al final de la sección). Se llegó a los siguientes valores de precisión:

- **Cemento:** 0.1
- **Silica Fume:** 0.1
- **Fly Ash:** 0.1
- **Agua:** 0.01
- **Super Plastificante:** 0.01 (al ser líquidos y ser utilizados en pequeñas cantidades, estimamos que esta precisión tiene sentido)
- **Agregado Fino:** 1 (Entero)
- **Agregado Grueso:** 1 (Entero)

Las 2 variables restantes son enteras en todos los casos, por definición.

**3. Volumen igual a 1 metro cúbico:** El volumen combinado de los materiales presentes debe sumar 1 metro cúbico, y contener un 2 % aproximadamente de aire, introducido durante el mezclado. Esto discrepaba con los resultados que daba el sistema de dosificación original.

Se implementó la siguiente ecuación de control:

$$Vol = \frac{Cem}{3150} + \frac{SF}{2300} + \frac{FA}{2650} + \frac{Agua}{1000} + \frac{SPlast}{1250} + \frac{Ag Grueso}{Densidad\ AG} + \frac{Ag Fino}{2630} + 0.02 = 1 \pm 0.01$$

donde para la densidad del Agregado Grueso, se tomaron los siguientes valores:

- 1 - Basalto: 3000 kg/m<sup>3</sup>
- 2 - Granito: 2660 kg/m<sup>3</sup>
- 3 - Piedra Caliza: 2700 kg/m<sup>3</sup>
- 4 - Grava: 2650 kg/m<sup>3</sup>

**4. Restricción de valores del Tamaño Máximo de Agregado Grueso:** En versiones preliminares del programa, se permitían valores enteros en mm, entre 9 y 20, que son el máximo y mínimo encontrados en los datos de entrada. Estos valores deben corresponderse con los tamaños de malla utilizada, por lo que los únicos valores permitidos son 9, 12.5, y 20 mm (Ver Aïtcin-Mehta [1990-2]). Se restringieron las salidas del sistema a 9 y 20, dado que son las mallas más comúnmente utilizadas, y que el sistema por problemas numéricos, presentaba una excesiva tendencia a utilizar el valor medio 12.5.

**5. Restricción del uso de Fly Ash:** Si bien los datos experimentales utilizados presentan uso de Fly Ash para valores de hasta 70 MPa, siguiendo Aïtcin-Mehta [1990-2] se restringió el uso de Fly Ash a valores menores o iguales a 60 MPa.

**6. Restricción del uso de Silica Fume:** De acuerdo con Malier [1993] y con los valores observados en la base de datos experimentales, se restringió el uso de Silica Fume a un máximo del 25% de la cantidad de Cemento utilizada en la mezcla. Esto se debe a que valores mayores de Silica Fume que el indicado, producen efectos adversos.

**7. Posibilidad de limitar una o más variables a valores fijos:** Se incorporó la flexibilidad de limitar el valor de una o más de las variables a valores prefijados, para adaptarse a necesidades específicas. Típicamente, se limita el tipo de Agregado Grueso al disponible en un caso particular. Esto de hecho en algunos casos aumenta la cantidad de soluciones encontradas por el sistema, ya que distintos tipos de agregado grueso requieren distintas necesidades y dosificaciones de las demás variables, por lo que matemáticamente representan espacios no conectados entre sí, y al Algoritmo Genético le resulta más difícil encontrar y llenar cada zona. Este efecto es notable hasta en la cantidad de soluciones generadas (ver Secc. 9). Sin embargo el sistema es bastante eficiente una vez que se fija el tipo de Agregado Grueso, por lo que esta situación no plantea mayores inconvenientes.

En cuanto a la restricción de otras variables, en los casos probados (restricción de Agua y restricción de cemento a intervalos fijos), el sistema se comporta de acuerdo a lo esperable: restricciones lógicas y sensatas producen una buena cantidad de soluciones, mientras que restricciones excesivas o incompatibles producen pocas o ninguna solución.

Las restricciones 1, 4, 5, y 6, pudieron ser cumplimentadas sin problemas, y se observó poca o ninguna disminución en la cantidad de soluciones producidas por el programa.

Las restricciones 2 y 3, son aparentemente incompatibles para algunos valores de  $f'_c$ : si bien para  $f'_c = 90$ MPa, el sistema produjo sin problemas más de 100 soluciones con cantidades enteras de Cemento, Silica Fume y Fly Ash, para  $f'_c = 30$ MPa produjo menos de 10 soluciones en todos los casos probados, y en algunos casos ninguna.

El análisis de la población final e intermedias propuestas por el sistema, reveló que es un problema del modelo utilizado y de los errores considerados. Si bien es claro que una modificación de 1 kg/m<sup>3</sup> en la cantidad de Cemento, Silica Fume o Fly Ash, no es probable

que introduzca diferencias notables en la medición del  $f'_c$  final de una mezcla de hormigón, la red ANFIS utilizada se basa en funciones diferenciables (Gauss membership Function), y como tal sí introduce una diferencia en el valor final de  $f'_c$  considerado. Si se limita entonces la precisión considerada tanto en el volumen como en el valor de  $f'_c$ , y sólo se permiten valores enteros de las variables, es claro que en muchos casos las condiciones resultarán incompatibles.

Se tomó como solución el permitir decimales en las variables, estimando que la diferencia introducida, de menos de  $1 \text{ kg/m}^3$  en todos los casos, debería ser despreciable frente a los errores introducidos, tanto el error de predicción de ANFIS, como el de medición de los parámetros involucrados, y el mismo error de medición de la resistencia a compresión uniaxial  $f'_c$ . Esto permitió que el sistema genere la cantidad de soluciones deseada.

## 5 RESULTADOS CONSEGUIDOS Y TENDENCIAS OBSERVADAS

Se incorpora: como Anexo I, la Tabla 1 de pruebas realizadas, y como Anexo II, la Tabla 2 que muestra un ejemplo de las soluciones que da el sistema de dosificación.

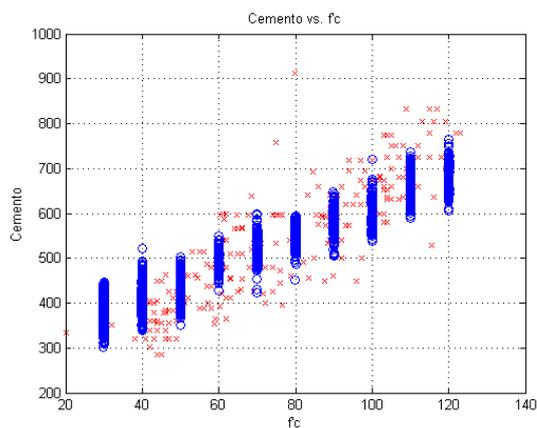
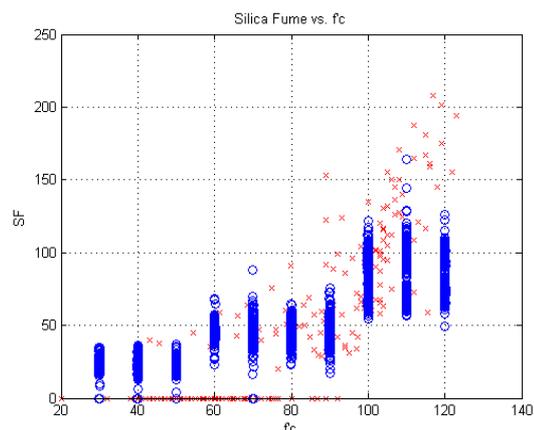
Las soluciones marcadas en rojo en la Tabla 1, representan casos difíciles donde en todas las corridas se obtuvieron menos de 200 soluciones. En general, las combinaciones con Granito (2) y Grava (4), producen menos resultados o con mayor dificultad, que con Basalto (1), o Piedra Caliza (3).

Existen combinaciones que producen pocos o ningún resultado (menos de 50, a ninguno), generalmente combinaciones con Grava o Basalto, y valores altos de  $f'_c$ , se producen por exigir condiciones incompatibles. Un ejemplo sería el intento de conseguir resultados con Silica Fume, Piedra Grava o Basalto, para  $f'_c = 110$  o  $120 \text{ MPa}$ . Esto produce en general entre 0 y 10 resultados, lo cual se explica al notar que en los datos de entrenamiento (Ver Folino et al [2007]), los valores con  $f'_c$  mayor que  $100 \text{ MPa}$ , sólo contienen Basalto o Caliza como Agregado Grueso.

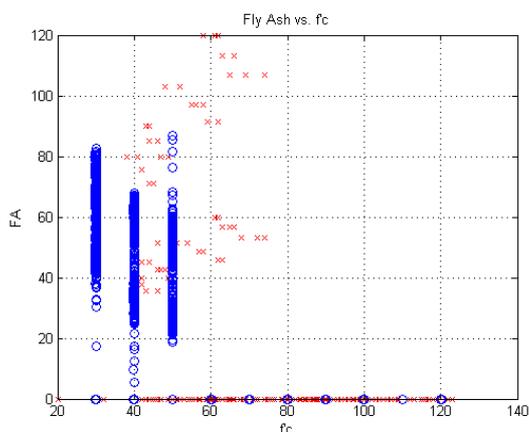
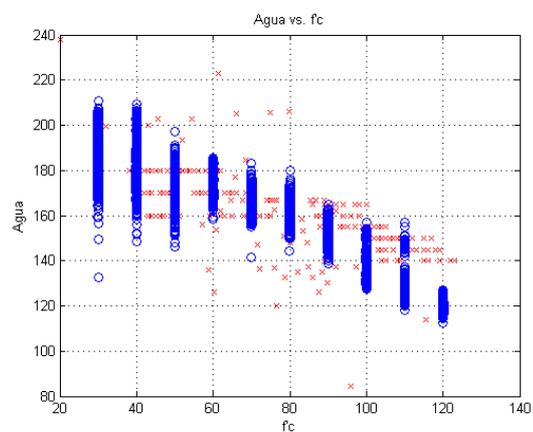
Es importante notar en esta última la tendencia del algoritmo a rellenar todos los valores intermedios una vez descubierta la relación entre las variables. Esto indica que en los casos donde se obtuvieron más de 250 o 300 soluciones, para obtener más, u obtener soluciones en un determinado rango, sólo se necesita tomar rangos de variables restringidos a la zona de interés, o poblaciones más grandes (en los casos en que el tiempo y la cantidad de procesamiento no sean factores importantes).

En las Figs. 1 a 10, se presenta la comparación entre los datos experimentales disponibles y los resultados de las pruebas realizadas con el sistema de dosificación propuesto. En las mismas se observa marcado con cruces los puntos correspondientes a los datos experimentales, y con círculos, los resultados del sistema propuesto. Se analiza a continuación cada una de estas curvas.

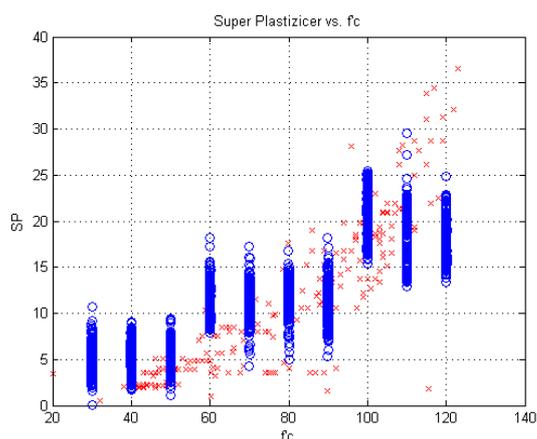
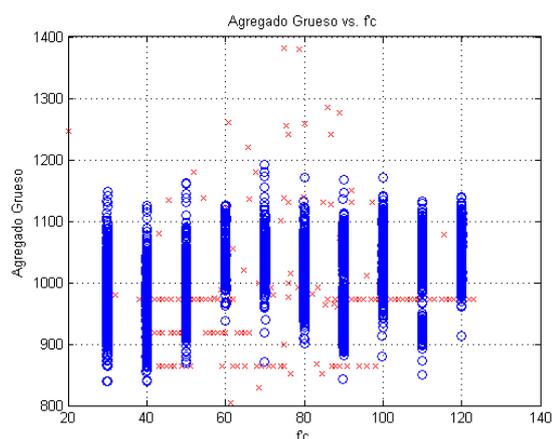
1. **Contenido de cemento vs.  $f'_c$ :** Se respeta la tendencia general lineal seguida por los datos experimentales, y se logra una buena dispersión, cubriendo la zona dada por los datos experimentales con bastante exactitud. Se nota una leve disminución en la cantidad de cemento frente a los datos experimentales, para valores mayores que  $100 \text{ MPa}$ . (Ver Fig. 1)
2. **Contenido de silica fume vs.  $f'_c$ :** Si bien la tendencia general de los datos experimentales es respetada, se nota una marcada disminución para valores mayores que  $100 \text{ MPa}$ . (Ver Fig. 2)

Figura 1 – Contenido de Cemento vs.  $f'_c$ Figura 2 – Contenido de Silica Fume vs.  $f'_c$ 

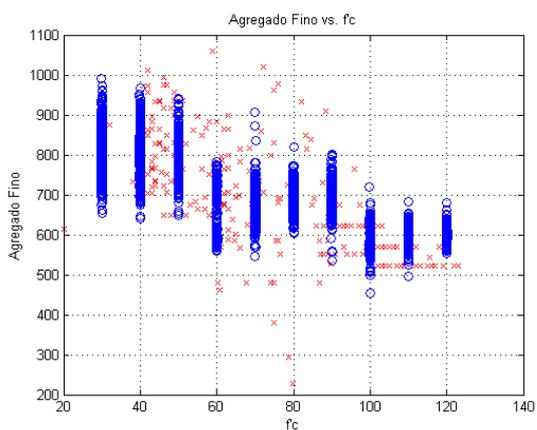
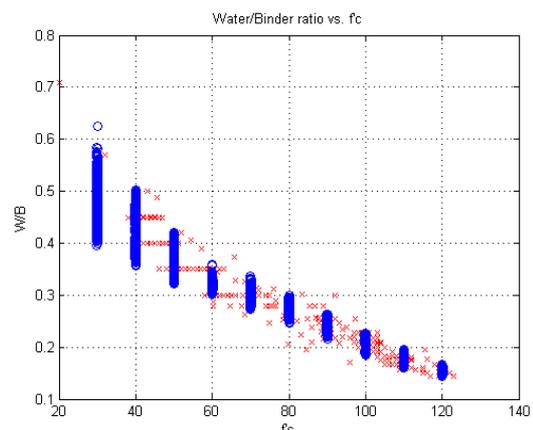
3. **Contenido de fly ash vs.  $f'_c$ :** el algoritmo genético tiene una marcada tendencia a utilizar menos fly ash que los datos experimentales. (Ver Fig. 3)
4. **Contenido de agua vs.  $f'_c$ :** La tendencia general de los datos experimentales es respetada, y se consigue una buena cobertura de la zona delimitada por los mismos (o sea, el sistema propone valores de contenidos de agua similar a los reales), excepto para valores mayores que 100 MPa. Un cambio en la matriz de Bounds no soluciona este problema, sino sólo provoca una disminución en la cantidad de resultados producidos. (Ver Fig. 4)

Figura 3 – Contenido de fly ash vs.  $f'_c$ Figura 4 – Contenido de agua vs.  $f'_c$ 

5. **Contenido de super plastificante vs.  $f'_c$ :** La tendencia general es respetada en menor medida que en otras variables. El sistema presenta tendencia a utilizar cantidades excesivas de plastificante para valores menores que 50 MPa, y cantidades insuficientes para valores mayores que 100 MPa. (Ver Fig. 5)
6. **Contenido de agregado grueso vs.  $f'_c$ :** El sistema presenta una tendencia general a usar mayor cantidad de agregado grueso que los datos experimentales, pero esta tendencia se subsana perfectamente en casos particulares por una limitación adecuada de la matriz de Bounds. (Ver Fig. 6)

Figura 5 – Contenido de super plastificante vs.  $f'_c$ Figura 6 – Contenido de agregado grueso vs.  $f'_c$ 

7. **Contenido de agregado fino vs.  $f'_c$ :** La tendencia y zona de cobertura de los datos experimentales es notablemente bien respetada, o sea, el sistema propone valores muy similares a los reales. (Ver Fig. 7)
8. **Relación agua-materiales cementicios ( $W/B$  ratio) vs.  $f'_c$ :** La tendencia general de los datos experimentales es respetada con gran exactitud, la zona delimitada por los valores dados por el sistema es la misma que los datos experimentales. (Ver Fig. 8)

Figura 7 – Contenido de agregado fino vs.  $f'_c$ Figura 8 – Relación W/B vs.  $f'_c$ 

9. **Contenido de silica fume vs. contenido de cemento:** La dosificación de silica fume lograda en relación con la de cemento, se mantiene dentro de la zona delimitada por los datos experimentales. Es notable el mayor cubrimiento de la zona por el nuevo sistema, y la marcada disminución con respecto a los valores experimentales para valores mayores que 100 MPa, tendencia que se mantiene en casi todas las variables. La restricción operativa impuesta de máxima cantidad de silica fume es respetada por el programa perfectamente bien. (Ver Fig. 9)
10. **Contenido de fly ash vs. contenido de cemento:** El sistema presenta una tendencia a utilizar cantidades bajas de fly ash, tanto en relación con  $f'_c$  como con la cantidad de cemento. La restricción operativa de máxima cantidad de fly ash en relación con la cantidad de cemento utilizada (recta en el gráfico) es claramente respetada. (Ver Fig. 10)

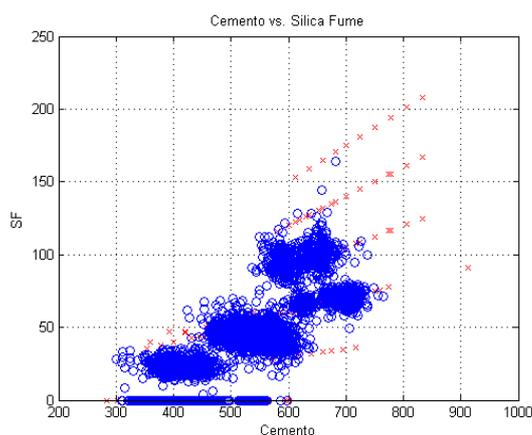


Figura 9 – Contenido de silica fume vs. contenido de cemento

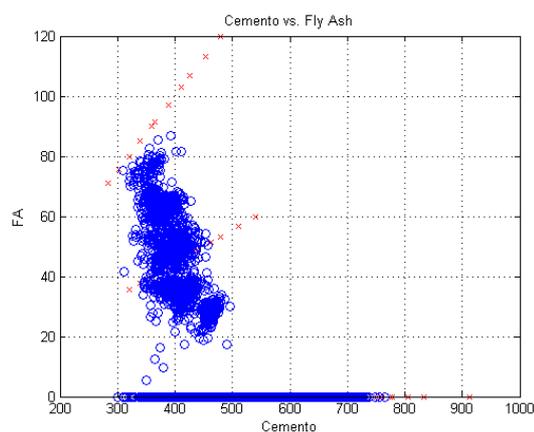


Figura 10 – Contenido de fly ash vs. contenido de cemento

La menor cantidad de fly ash y silica fume que presentan los resultados frente a los datos experimentales, tanto en relación con  $f'_c$  como en relación a la cantidad de cemento utilizada, se estima que se debe a la falta de factores que estimen la trabajabilidad del hormigón en la función de evaluación.

Análogamente, la menor cantidad de agua, cemento y silica fume que presentan los resultados frente a los datos experimentales, tanto en relación con  $f'_c$  como en relación a la cantidad de cemento utilizada, para valores de  $f'_c$  mayores que 100 MPa, también se estima que se debe principalmente a la falta de una estimación de la trabajabilidad en la función de evaluación.

## 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

En este trabajo se ha procedido al análisis exhaustivo y a la optimización del sistema desarrollado de dosificación de hormigones tanto de alta resistencia (HSC) como de resistencia normal (NSC), cubriendo un rango de resistencia uniaxial a compresión  $f'_c$  comprendido entre 20 y 120 MPa. Este sistema de dosificación, predice a partir de un único dato de entrada representado por una determinada resistencia  $f'_c$ , un listado de dosificaciones posibles que conducirían a obtener ese valor de  $f'_c$ .

El objetivo de este trabajo fue el de detectar y solucionar las falencias del sistema original, basado en un tipo especial de algoritmos genéticos denominados “*niching genetic algorithms*”, y que a su vez es alimentado por una red ANFIS desarrollada previamente y entrenada con aproximadamente 250 datos, cada uno de los cuales relaciona una dosificación con su valor correspondiente de  $f'_c$  obtenido mediante ensayos experimentales.

Al analizar críticamente los resultados y al analizar cómo es el procedimiento usual al momento de proceder a la mezcla de los componentes dados por una dosificación, se detectaron distintos problemas en los resultados del sistema. Estas falencias se solucionaron imponiendo un mayor número de restricciones al sistema, lo cual si bien condujo a una mayor complejidad y por lo tanto, a un sistema un poco más lento, permitió obtener muy buenos resultados.

De los análisis incluidos en este trabajo se concluye:

1. Que el sistema de dosificación de hormigones propuesto sí es apto para ser llevado a un campo de aplicación práctico.
2. Que sería necesario incorporar en las funciones de evaluación algún factor que le permitiera al sistema de algoritmos genéticos tener en cuenta de alguna forma la trabajabilidad de la mezcla al momento de seleccionar tanto la cantidad de agua como

de materiales cementicios. Se piensa que corregir este aspecto debería ser la línea futura de investigación.

Por último, se desea destacar que dado que los materiales que se utilizan para elaborar hormigón son en general distintos en distintas regiones (tipo de cemento, tipo de piedra, etc), se estima que es conveniente contar con una base de datos local para la aplicación práctica de este sistema. Sin embargo, dado que el sistema desarrollado es modular, es de una extrema sencillez incorporar o modificar la base de datos de partida. Lamentablemente en el caso de nuestro país, Argentina, no hay suficientes datos disponibles por el momento como para elaborar una base de datos local, fundamentalmente en lo que respecta al rango de alta resistencia. Por lo tanto para poder utilizar el sistema de dosificación propuesto a nivel local, sería necesario generar esos datos a partir de ensayos.

## 7 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad de Buenos Aires a través del proyecto UBACYT 2006-2009, I813; y a la Universidad Nacional de Tucumán a través del proyecto PICTO 669-6. Por último, desean también agradecer a los Lics. Jorge Bustos y Walter Díaz, por su colaboración en las pruebas efectuadas con el sistema.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Aïtcin P., Mehta P.; "Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete" *ACI Materials Journal*, 87-2, pp 103-107, 1990-1.
- Aïtcin, P., Mehta, P.; "Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete", *ACI SP 121-14*, pp. 265-286, 1990-2.
- Bai J., Wild S., Ware J., Sabir B.; "Using neural networks to predict workability of concrete incorporating metakaolin and fly ash", *Adv Eng Software*; 34(11-12), pp 663-669, 2003.
- Dias, W., Pooliyadda, S.; "Neural Network for predicting properties of concretes with admixtures", *Constructions and Building Materials* 15, pp 371-379, 2001.
- Folino, P.; Etse, G.; Will, A.; "Modelación inelástica de hormigones de distintas resistencias basada en el índice de prestación"- *Proc. ENIEF 2006, Mecánica Computacional Vol. XXV*, pp 1915-1925, 2006.
- Folino, P., Etse, G., Will, A.; "A performance dependent failure criterion for normal and high strength concretes", *sent to ASCE Journal of Engineering Mechanics in March 2008*.
- Folino, P., Will, A., Diaz, W., Flores, F., Etse, G.; "Uso de Redes Neuronales y ANFIS para predecir la resistencia a compresión uniaxial de Hormigones de Alta Resistencia", *Proc. ENIEF 2007, Mecánica Computacional Vol. XXVI*, pp 1413-1426, 2007.
- Gan, J., and Warwick, K.; "Dynamic Niche Clustering: A Fuzzy Variable Radius Niching Technique for Multimodal Optimisation in GAs", *Proc. 2001 Congress on Evolutionary Computation CEC2001, IEEE Press*, pp 215-222, 2001.
- Gao, L., and Hu, Y.; "MultiTarget Matching based on Niching Genetic Algorithms", *International Journal of Computer Science and Network Security*, 6, 7a, pp 215-220, 2006.
- Mahfoud, S. W.; "Niching Methods for Genetic Algorithms", *Illinois Genetic Algorithms Laboratory (IlligAL) Report No. 95001*, 1995.
- Malier, Y.; "Les Betons a Hautes Performances; caracterisation, durabilité, applications", Ed. *Presses de l'École Nationale des Ponts et Chausees*, 1993.
- Öztaş A., Pala M., Özbay E., Kanca E., Çağlar N., Bhatti M., "Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network", *Construction and Building Materials* 20: 769-775, 2006.
- Pärt-Enander, E., and Sjöberg, A.; "The Matlab 5 Handbook", *Prentice-Hall Int.*, 2000.
- Ji T, Lin T, Lin X.; "A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural

- networks”. *Cement and Concrete Research* 36(7), pp 1399–408, 2006.
- Yeh, I.; “Exploring concrete slump model using artificial neural networks”, *Journal of computing in civil engineering* Vol. 20, no3, pp. 217-221, 2006.
- Yeh, I.; ”Modelling slump flow of concrete using second-order regressions and Artificial Neural Networks”, *Cement & Concrete Composites* 29, pp 474–480, 2007.

## ANEXO I - LISTADO DE PRUEBAS EFECTUADAS

	Silica Fume	Fly Ash	Tipo Ag. Grueso	$f_c$ [MPa]	Cantidad Resultados
1	NO	NO	Libre (-1)	30	205
2	NO	NO	Libre (-1)	40	200
3	NO	NO	Basalto (1)	30	198
4	NO	NO	Basalto (1)	40	204
5	NO	NO	Caliza (3)	30	138
6	NO	NO	Caliza (3)	40	405
7	NO	NO	Granito (2)	30	283
8	NO	NO	Grava (4)	40	415
9	NO	NO	Libre (-1)	30	99
10	NO	NO	Libre (-1)	40	289
11	NO	SI	Basalto (1)	30	343
12	NO	SI	Basalto (1)	40	394
13	NO	SI	Basalto (1)	50	352
14	NO	SI	Caliza (3)	30	233
15	NO	SI	Caliza (3)	40	238
16	NO	SI	Caliza (3)	50	262
17	NO	SI	Grava (4)	30	245
18	NO	SI	Grava (4)	40	399
19	NO	SI	Libre (-1)	50	150
20	NO	SI	Libre (-1)	30	134
21	SI	NO	Basalto (1)	40	442
22	SI	NO	Basalto (1)	50	428
23	SI	NO	Basalto (1)	60	417
24	SI	NO	Caliza (3)	40	395
25	SI	NO	Caliza (3)	50	277
26	SI	NO	Caliza (3)	60	363
27	SI	NO	Granito (2)	40	108
28	SI	NO	Libre (-1)	30	380
29	SI	NO	Libre (-1)	50	99
30	SI	NO	Basalto (1)	70	269
31	SI	NO	Basalto (1)	80	279
32	SI	NO	Basalto (1)	90	234
33	SI	NO	Basalto (1)	100	388
34	SI	NO	Basalto (1)	110	391
35	SI	NO	Basalto (1)	120	290
36	SI	NO	Caliza (3)	70	301
37	SI	NO	Caliza (3)	80	370
38	SI	NO	Caliza (3)	90	170
39	SI	NO	Caliza (3)	100	386
40	SI	NO	Caliza (3)	110	395
41	SI	NO	Caliza (3)	120	208
42	SI	NO	Libre (-1)	80	122
43	SI	NO	Libre (-1)	90	224
44	SI	NO	Granito (2)	90	84
45	SI	NO	Grava (4)	100	426
46	SI	NO	Granito (2)	110	417

Tabla 1

**ANEXO II - EJEMPLO DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN**

Se presenta en esta tabla una serie de resultados entregados por el sistema de dosificación a modo de ejemplo, correspondientes a la prueba 16 de la Tabla 1 (Sin Silica Fume, con Fly Ash, Piedra Caliza (3)). De las 262 soluciones conseguidas, se incluyen sólo las primeras a título de ejemplo.

Cemento	Silica Fume	Fly ash	Agua	Super-plastificante	Agr. Grueso	Agr. Fino	Tam Max AG	Tipo AG	Beta_p	Volumen	$f_c$
kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	mm	---	---	m <sup>3</sup>	MPa				
371.1	0	85.5	182.45	5.32	916	819	20	3	0.12493	1.0074	49.922
374	0	47.8	160.11	5.64	981	843	9	3	0.13158	1.0053	49.945
374.2	0	57	175.69	5.22	976	786	20	3	0.1226	1.0005	49.952
381.1	0	52.9	177.32	5.9	937	824	20	3	0.1222	1.0033	49.926
382.2	0	36.6	172.52	5	953	823	20	3	0.12151	0.9976	50.055
383.5	0	45.6	168.16	5.91	1006	789	9	3	0.12746	1.0044	49.95
384.3	0	57.7	174.6	4.63	945	801	20	3	0.12659	0.9966	50.007
386	0	47.8	170.94	5.21	986	783	9	3	0.12679	0.9986	49.962
386.7	0	52.9	171.88	3.57	897	870	9	3	0.12785	1.0005	49.99
386.8	0	49.3	182.62	6.31	977	754	9	3	0.11945	0.9976	50.02
387.5	0	52.1	174.67	5.24	930	834	9	3	0.12601	1.0031	50.067
387.6	0	61.9	177.26	5.06	957	786	20	3	0.12684	1.0010	50.019
389.2	0	50.9	171.12	5.24	953	824	9	3	0.12838	1.0043	49.918
389.4	0	58.1	176.05	4.75	956	792	20	3	0.1269	1.0006	49.922
389.9	0	46.7	166.83	5.15	994	802	9	3	0.13098	1.0054	50.051
390.5	0	49.9	176.36	5.28	966	783	9	3	0.12484	0.9989	49.991
390.6	0	49.6	169.89	5.43	973	800	9	3	0.12945	1.0015	49.96
391.8	0	48.9	163.82	5.5	984	803	9	3	0.13468	1.0008	50.063
392.4	0	48.8	163.7	4.94	981	805	9	3	0.13485	1.0001	50.034
392.4	0	51.4	177.3	5.28	944	813	9	3	0.12518	1.0042	50.011
392.6	0	49.8	177.55	5.32	966	788	9	3	0.12452	1.0026	49.975
393	0	46.4	174.97	5.42	1002	755	9	3	0.12543	0.9998	49.946
393.3	0	56.4	179.17	5.79	961	774	20	3	0.12568	1.0002	50.074
393.5	0	57.6	175.12	4.25	1010	756	20	3	0.12896	1.0067	50.064
393.8	0	50.7	169.94	4.92	955	820	9	3	0.13096	1.0035	50.068
394	0	50.7	177.83	5.54	967	774	20	3	0.12504	0.9989	50.002
394.4	0	53.3	179.25	5.75	981	749	20	3	0.12466	0.9973	49.913
394.8	0	39.9	145.97	4.33	1048	788	9	3	0.14897	0.9976	50.023
395.6	0	45	172.32	5.02	1009	769	9	3	0.12774	1.0050	49.961
395.6	0	51.7	177.55	5.3	966	781	20	3	0.12579	1.0016	49.929
395.9	0	52.1	176.77	4.87	980	766	20	3	0.12648	1.0002	49.904

Tabla 2