

## USO DE REDES NEURONALES Y ANFIS PARA PREDECIR LA RESISTENCIA UNIAXIAL A COMPRESIÓN DE HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

Paula C. Folino<sup>a</sup>, Adrián Will<sup>b</sup>, Fernando Flores<sup>b</sup>, Walter Diaz<sup>b</sup>, Guillermo Etse<sup>a, b</sup>

<sup>a</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 - [lmni@fibertel.com.ar](mailto:lmni@fibertel.com.ar)

<sup>b</sup> CEMCI - Centro de Métodos Numéricos y Computacionales en Ingeniería  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología - Universidad de Nacional Tucumán, C.P. 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)

**Palabras Clave:** ANFIS, Redes Neuronales Artificiales, Hormigón de Alta Resistencia.

**Resumen:** El Hormigón de Alta Resistencia (HSC), es un material complejo, de amplia aplicación, y cuyos ensayos experimentales son extremadamente caros debido al largo tiempo que se requiere para efectuarlos (28 días, más en algunos casos). Por lo tanto, el modelado de su comportamiento es un tema de relevancia que ha sido sujeto de investigación los últimos años. Especialmente, la posibilidad de predicción de las propiedades mecánicas del HSC final sin necesidad de llevar a cabo costosos ensayos experimentales.

El presente trabajo es un paso más hacia la formulación de una relación constitutiva realista válida para hormigones de alta resistencia. El objetivo aquí es desarrollar una herramienta de software, tan precisa como sea posible, que permita predecir la resistencia a compresión uniaxial " $f_c$ " de un HSC, con una composición dada. Para tal fin, se aplican ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) y Redes Neuronales al problema, utilizando una base de 250 datos recolectada de la literatura. Los resultados son comparables en ambos casos, y permiten una adecuada predicción de la resistencia a compresión uniaxial del HSC, conocida su composición.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los Hormigones de Alta Prestación (HPC) son aquellos diseñados de manera de obtener la mejor prestación posible del material, de acuerdo a su uso futuro. Los Hormigones de Alta Resistencia (HSC), el objeto de este trabajo, son una clase de HPC.

La principal diferencia entre la composición de un Hormigón de Resistencia Normal (NSC), y los de Alta Resistencia (HSC), es la progresiva reducción de la relación agua/cemento. Esta reducción se logra por un lado incorporando aditivos químicos tales como reductores de agua, y por otro, incorporando adiciones minerales como *fly ash*, *silica fume*, etc. Convencionalmente, HSC son aquellos hormigones cuya resistencia a compresión uniaxial  $f'_c > 41$  MPa [6000 psi]

A diferencia de los NSC, el conocimiento sobre el comportamiento a nivel macro y mesomecánico de los HSC es muy limitado. Más aún, los ensayos experimentales en laboratorio de HSC son muy caros, toman bastante tiempo, y son en general difíciles de llevar a cabo. Así que el modelado de su comportamiento, en especial la posibilidad de determinar las propiedades mecánicas del HSC final, sin necesidad de llevar a cabo costosos ensayos experimentales, es un tema de relevancia que ha sido objeto de investigación en los últimos años.

Para obtener un HSC, en primer lugar es necesario realizar una cuidadosa selección de los materiales componentes a utilizar. Luego, se deben estimar las proporciones de cada uno de estos materiales. Contrariamente a lo que ocurre con NSC, para los cuales existen métodos de dosificación conocidos y extensamente utilizados, en el caso de los HSC hasta el presente las proporciones de la mezcla sólo se determinan por ensayo y error, tomando en cuenta experiencias previas y métodos probados para NSC.

Por lo tanto, crear una herramienta de software que prediga la resistencia a compresión uniaxial  $f'_c$  de una mezcla en particular, ayudaría a decidir la mezcla final y a reducir en gran medida, el número de ensayos de laboratorio necesarios.

Es importante destacar que si bien el desarrollo de la base de datos necesaria y el proceso de entrenamiento, son procesos complicados y que toman tiempo, la evaluación de una solución particular es un proceso extremadamente rápido y eficiente (una de las características más importantes tanto de las redes ANFIS como de las Redes Neuronales), por lo que las herramientas desarrolladas también pueden ser utilizadas en un proceso iterativo de diseño, para conseguir una mezcla con un  $f'_c$  deseado.

Las herramientas presentadas en este trabajo son ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System), y Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Networks). El tipo particular de Red Neuronal utilizado se describe más abajo. Ambas herramientas han sido utilizadas exitosamente para predicción de valores de variables a partir de datos históricos, en el caso en que no se dispone de modelos matemáticos confiables del sistema.

## 2 IMPORTANCIA DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACION

El interés de las redes desarrolladas en este trabajo no se limita al campo de la tecnología del hormigón, para el cual su utilidad es obvia y ha sido explicada en la introducción. Por el contrario, la motivación de su desarrollo surge de la necesidad de determinar la relación agua/materiales cementicios para el cálculo del Parámetro de Prestación  $\beta_p$  presentado por los autores en trabajos anteriores (Ver [Folino-Etse-Will 2006](#)).

Este parámetro ha sido propuesto en el marco del desarrollo de una formulación constitutiva realista válida tanto para hormigones normales (NSC) como para hormigones de alta resistencia (HSC). La factibilidad de esta formulación, función del Parámetro de

prestación  $\beta_p$ , depende en gran medida de la posibilidad de que dicho parámetro pueda determinarse fehacientemente.

El parámetro de prestación  $\beta_p$  se define como la resistencia uniaxial a compresión  $f'_c$  dividida por la relación agua/materiales cementicios (W/B), y por una constante cuyo valor hace que el parámetro no exceda el valor de 1 para hormigones en el rango de 20Mpa (2900psi) <  $f'_c$  < 140Mpa (20300 psi).

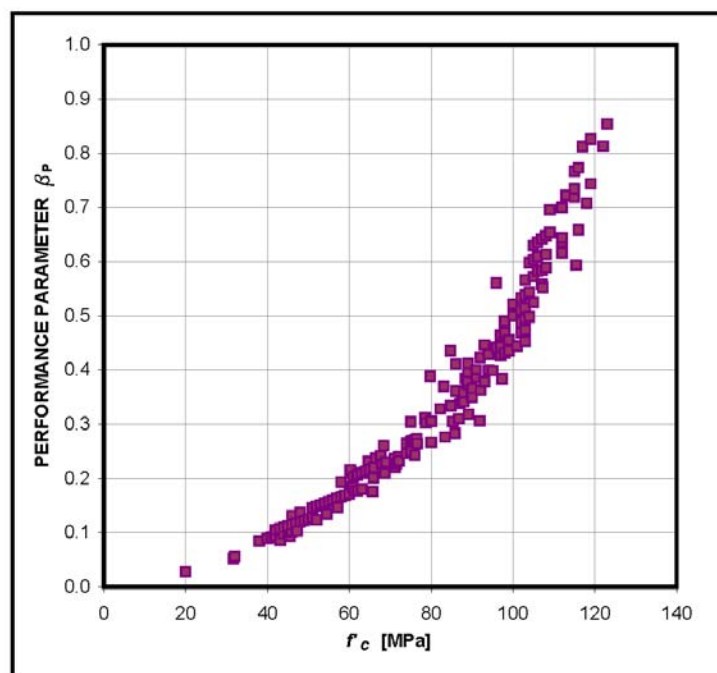


Fig. 1 – Performance parameter  $\beta_p - f'_c$

$$\text{Parámetro de Prestación: } \beta_p = \frac{1}{1000MPa} \frac{f'_c [MPa]}{(W/B)} \quad \left[ \beta_p = \frac{1}{145038psi} \frac{f'_c [psi]}{(W/B)} \right] \quad (1)$$

Este parámetro intenta ser una medida por un lado de la diferencia de rigidez que existe entre los dos componentes que el hormigón posee a nivel mesomecánico: la pasta y los agregados gruesos, y por otro, de la porosidad del hormigón. Cuanto más próximo a 1 es su valor, menor es la diferencia de rigidez entre la pasta y los agregados gruesos, y menor es la porosidad del hormigón.

Como se observa en la Fig. 1, para un mismo valor de  $f'_c$  pueden obtenerse distintos valores de  $\beta_p$ , actuando este último como un parámetro complementario del primero, lo cual introducido en una formulación constitutiva permitiría distinguir dos comportamientos diferentes de hormigones de igual valor de  $f'_c$ .

Para la determinación de  $\beta_p$  pueden distinguirse tres casos:

- Caso 1: W/B y  $f'_c$  son conocidos. Entonces  $\beta_p$ , se obtiene directamente con la Eq. 1
- Caso 2: Si la relación W/B no es conocida, pero se desea obtener un hormigón de un determinado valor de  $f'_c$ , las herramientas desarrolladas en este trabajo pueden ser utilizadas para predecir el valor de  $f'_c$  para una mezcla propuesta y así, iterativamente, seleccionar un valor W/B para el  $f'_c$  buscado. De esta manera, la dosificación del hormigón se incorporaría al diseño integral del mismo desde su concepción en la etapa de diseño.

- Caso 3: este caso se refiere a un hormigón existente del que no se poseen datos: la relación W/B no es conocida, y tampoco lo es  $f'_c$ . En este caso  $f'_c$  puede determinarse mediante ensayos experimentales. En cambio la relación W/B sólo puede estimarse en base a ecuaciones empíricas que surgen de la relación que se observa entre  $f'_c$  y  $\beta_P$  que se observa en la Fig. 1.

### 3 ARMADO DE LA BASE DE DATOS

#### 3.1 Recolección de Datos

Tanto para poder aplicar ANFIS o Redes Neuronales Artificiales a un problema determinado, es necesario recolectar datos. Se recolectaron de la literatura disponible alrededor de 300 datos de mezclas de hormigones de resistencia normal (NSC) y de alta resistencia (HSC), y sus correspondientes resultados de ensayos de compresión uniaxial  $f'_c$ . Estos datos proceden de diferentes laboratorios, y corresponden al rango  $20 \text{ MPa} < f'_c < 120 \text{ MPa}$  ( $2900 \text{ psi} < f'_c < 17400 \text{ psi}$ ). Los datos fueron recolectados cuidadosamente de manera tal que se cumplan las siguientes condiciones generales:

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

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

- o sin adiciones minerales
- o con *silica fume*
- o 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.

Varios de los 300 datos debieron ser descartados, dejando 254 datos confiables y utilizables, por las siguientes razones:

- o Componentes Especiales. Hay una gran cantidad de trabajos dedicados a determinar el efecto de agregar ciertos componentes en particular al HSC. Estos componentes son poco usuales y obligan a agregar una variable al problema, lo que hace al sistema innecesariamente más grande (y por lo tanto más difícil de entrenar).
- o Datos faltantes, poco claros, o incompletos. Varios trabajos son poco claros acerca del Tipo de Agregado Grueso que incorporan, haciendo que el dato no sea confiable.

Las variables elegidas como relevantes para el problema fueron:

1. Cemento [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
2. *Silica Fume* [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
3. *Fly Ash* [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
4. Agua [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
5. Super Plastificante [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
6. Agregado grueso [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

7. Agregado fino [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
8. Tamaño máximo de agregado grueso [mm]
9. Tipo de agregado grueso

Las 8 primeras son variables numéricas y fáciles de representar numéricamente para introducirlas como variables de entrada, tanto en ANFIS como a las Redes Neuronales. Pero la última variable, el Tipo de Agregado Grueso, es la clasificación geológica del Agregado Grueso Utilizado: Piedra Caliza Dolomítica, Piedra Caliza Calcítica, Granito, Basalto, etc. Tiene que ser codificada numéricamente de modo de poder ser introducida como variable de entrada para uno de estos procedimientos.

Se realizaron varias pruebas, incluyendo asignar diferentes números a cada tipo de piedra. La que produjo mejores resultados fue una clasificación amplia, basada en el efecto del Tipo de Agregado Grueso en el hormigón final:

1. Basalto
2. Granito
3. Piedra Caliza
4. Grava

El tipo de agregado grueso tiene influencia sobre el valor final de resistencia a la compresión uniaxial, especialmente en el caso de los HSC. En la lista dada, los tipos de agregado grueso se encuentran en orden descendente según este efecto. El basalto triturado (Crushed Basalt), que es el de mayor resistencia mecánica, produce el HSC de mayor resistencia, seguido del granito triturado (Crushed Granite). El tercero, piedra caliza, si bien es de menor resistencia mecánica, posee mejores propiedades de adherencia a la pasta de cemento, lo que produce resistencias a compresión similares a las del segundo tipo. La grava figura en último lugar, debido a que produce los HSC de menor resistencia.

Esta forma de representación fue la que produjo los mejores resultados finales. En el Anexo 1 se presenta la base de datos utilizada.

Ahora, para poder aplicar ambos Redes Neuronales y ANFIS, los datos deben ser divididos en 3 conjuntos:

1. Conjunto de Entrenamiento (Training Set): La mayor parte de los datos (generalmente 50% o mayor), tiene que ser prevista a la red como datos de entrenamiento, o sea, los datos que son efectivamente usados por el algoritmo de aprendizaje para ajustar los parámetros de la red, principalmente las matrices de pesos y los vectores de Bias. El objetivo del entrenamiento de una de estas redes es llevar el error de predicción sobre este conjunto de entrenamiento a un mínimo.
2. Conjunto de Control (Testing Set): Este conjunto de datos en realidad no participa directamente del entrenamiento, ya que para esto sólo se utiliza el error calculado sobre el conjunto de Entrenamiento. Sin embargo, se lo utiliza para detener el entrenamiento y evitar el fenómeno de *Sobreentrenamiento*. El entrenamiento se detiene cuando el error, calculado sobre este segundo grupo de datos, comienza a aumentar.
3. Conjunto de Validación (Checking Set): También llamado Conjunto de Generalización, este grupo de datos no participa de manera alguna del proceso de entrenamiento. Su uso es proveer una medida de la calidad de la predicción de la red en datos nuevos, no disponibles al momento del entrenamiento.

Ambos el tamaño de los conjuntos, y la partición misma del conjunto total de datos en los 3 conjuntos mencionados, son críticos para el éxito de la predicción: Un conjunto de entrenamiento demasiado pequeño o mal elegido, no podrá reducir el error calculado sobre el conjunto de Control o de Validación (Error de Control y Error de Validación

respectivamente). Un conjunto de Control o Validación excesivamente pequeño o mal elegido hace que el problema sea excesivamente simple, y produzca errores pequeños, pero la red obtenida será incapaz de predecir correctamente nuevos datos.

Es importante notar que el segundo grupo de datos, el de Control, no siempre es utilizado, por diversas razones, siendo suficiente con el primer grupo para entrenar la red, y el tercero para determinar la calidad de la generalización.

### 3.2 Redes ANFIS

Para utilizar las redes ANFIS, se dividió el conjunto de 254 datos disponibles en 3 subconjuntos generados aleatoriamente, y divididos de la siguiente manera: 60 % para el Conjunto de Entrenamiento (152 datos), 20 % para el conjunto de Control (51 datos), y 20 % para el conjunto de Validación (51 datos).

Los datos fueron analizados utilizando la herramienta ANFIS incluida en el Fuzzy Logic Toolbox de Matlab 7:

- Método usado: Grid Partition (Partición en Grilla)
- Input Membership Functions: Gauss Membership Function (gaussmf.m)
- Output Function type: Constante
- Número de membership functions por variable: 2
- Método de Entrenamiento: Híbrido

El tipo y número de membership functions por variable del problema fue elegido de manera de mantener el número total de parámetros a ajustar al mínimo. Esto produjo una red ANFIS con 1072 nodos, 548 parámetros (512 lineales y 36 no lineales), y 512 reglas.

El proceso seguido en el entrenamiento del sistema consistió en entrenar el sistema por un período, usualmente 30 a 50 épocas, identificar los datos “Alejados” (“Outliers”, o sea, aquellos cuyo error de predicción es por lo menos un orden de magnitud mayor que el resto), y transferirlos a otro conjunto o reemplazarlos por otro dato que sea mas representativo (este tipo de datos procede en general de datos de características singulares, o que no se encuentran similares en el conjunto de entrenamiento, y por lo tanto la red no puede predecirlos con exactitud).

Alrededor del 15 por ciento de los datos debió ser movido de este modo, de manera de producir resultados con errores homogéneos. De hecho, 4 datos debieron ser descartados debido a que las redes no consiguieron aproximarlos correctamente en ninguno de los 3 conjuntos, en todas las pruebas realizadas. Aparentemente son datos extremos y de características singulares, que no siguen el patrón dado por el resto del conjunto de datos. Se obtuvo entonces lo siguiente

- Conjunto de Entrenamiento: 155 datos
- Conjunto de Control: 43 datos
- Conjunto de Validación: 48 datos
- Descartados: 8 datos
  
- Épocas de Entrenamiento: 150
- Error Relativo – Datos de Entrenamiento: 2.17
- Error Relativo – Datos de Control: 1.74
- Error Relativo – Datos de Validación: 1.36

Estos errores resultan aceptables, si se considera que los ensayos de Resistencia a la compresión uniaxial tienen errores mayores que los mencionados.

El error considerado es Error Relativo:

$$Error = \sum_i \frac{|(Valor\_Calc_i - Valor\_Orig_i)|}{Valor\_Orig_i} \quad (2)$$

donde *Valor\_Calc* y *Valor\_Orig* son los valores calculado por ANFIS, y los valores originales conocidos, respectivamente. Es importante destacar que ambos son conocidos y positivos, por lo que este error puede ser calculado sin problemas.

En las Fig. 2, 3 y 4 se presentan respectivamente la performance obtenida para el conjunto de entrenamiento, para el conjunto de control y para el conjunto de validación.

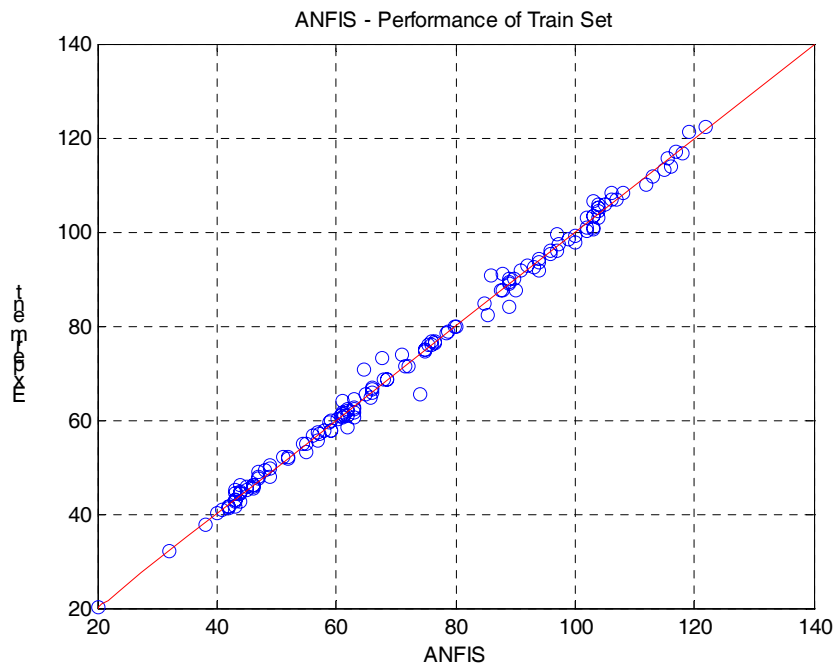


Fig. 2 – ANFIS - Performance del Conjunto de Entrenamiento

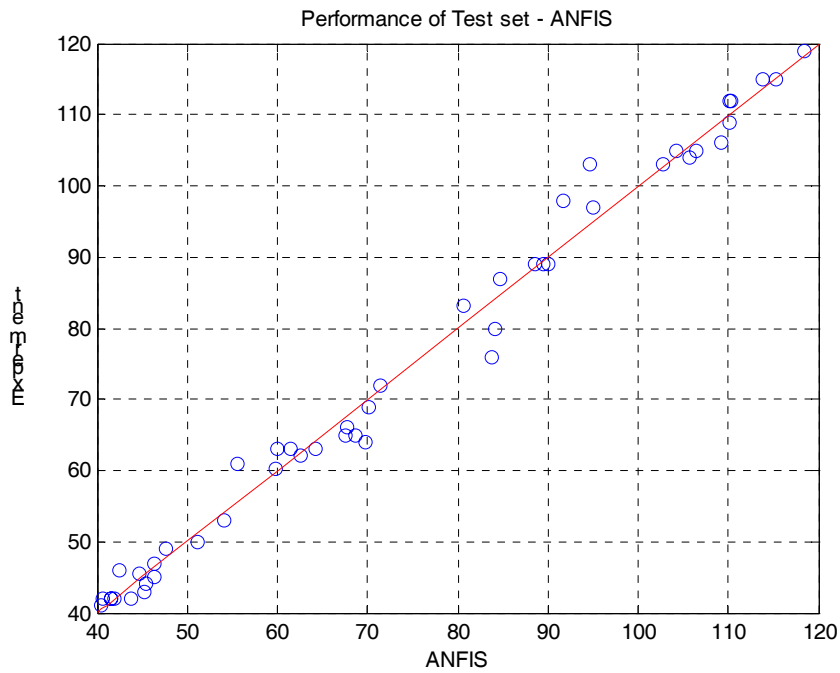


Fig. 3 – ANFIS - Performance del Conjunto de Control

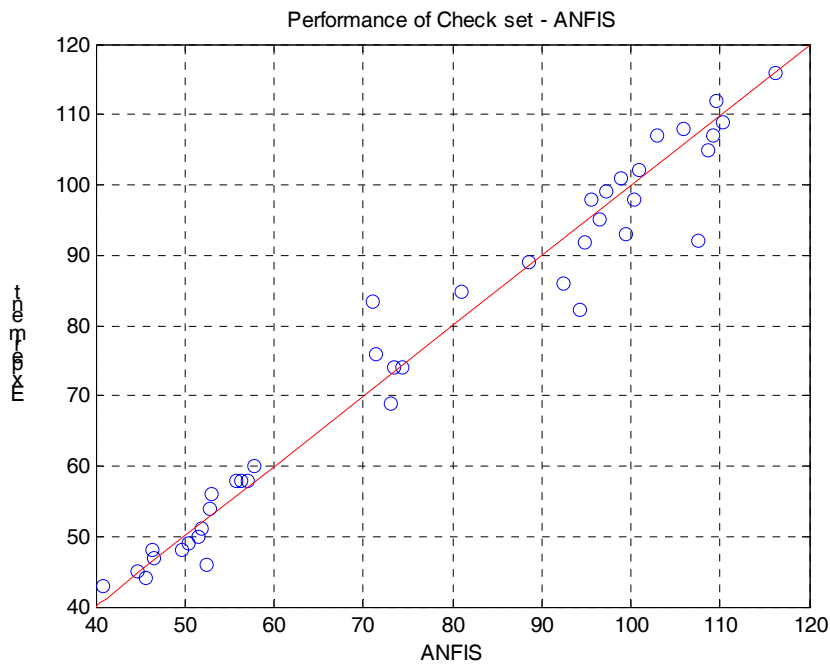


Fig. 4 – ANFIS - Performance del Conjunto de Validación

### 3.3 Redes Neuronales

Las Redes Neuronales Artificiales también pueden ser exitosamente aplicadas al problema, de acuerdo a [Öztaş \(2006\)](#), entre otros. Una Red Neuronal de tipo Feed Forward, MultiLayer Perceptron, con 2 capas Ocultas, y diferentes arquitecturas y divisiones de datos fueron probadas. Los resultados obtenidos son comparables a los obtenidos con ANFIS, si bien son



necesarios ajustes más finos en los parámetros y mayor trabajo en la división del conjunto de datos.

Se utilizó el Neural Network Toolbox de Matlab 7 para este trabajo.

La división de datos que produjo mejores resultados resultó tener 155 datos en el conjunto de Entrenamiento, y 91 en el conjunto de Validación (Conjunto de Entrenamiento igual al utilizado para ANFIS, Conjunto de Validación el resto de los datos). No se utilizó conjunto de Control, dado que todos los intentos realizados para introducir un conjunto de control de cualquier tamaño, condujeron a finalización prematura del entrenamiento (Validation Stop), produciendo grandes errores tanto de Entrenamiento como de Control y Validación, en todos los casos probados.

Se consiguió entonces una red de las siguientes características

- Tipo de Red Neuronal: Multi Layer Perceptron (MLP)
- Número de Capas Ocultas: 2
- Número de Neuronas en la Capa de Entrada: 9 (número de variables de Entrada)
- Número de Neuronas en la 1er Capa Oculta: 50
- Número de Neuronas en la 2da Capa Oculta: 20
- Número de Neuronas en la Capa de Salida: 1 (número de variables de Salida)
- Método de Entrenamiento: Scaled Conjugated Gradient (traincsg.m)
- Épocas de Entrenamiento: 500
- Learning Rate: 0.2
- Error para Entrenamiento: Sum Squared Error (sse.m)
- Error Relativo – Datos de Entrenamiento: 0.78
- Error Relativo – Datos de Validación: 3.74

En las Fig. 5 y 6 se presentan respectivamente la performance obtenida para el conjunto de entrenamiento y para el conjunto de validación.

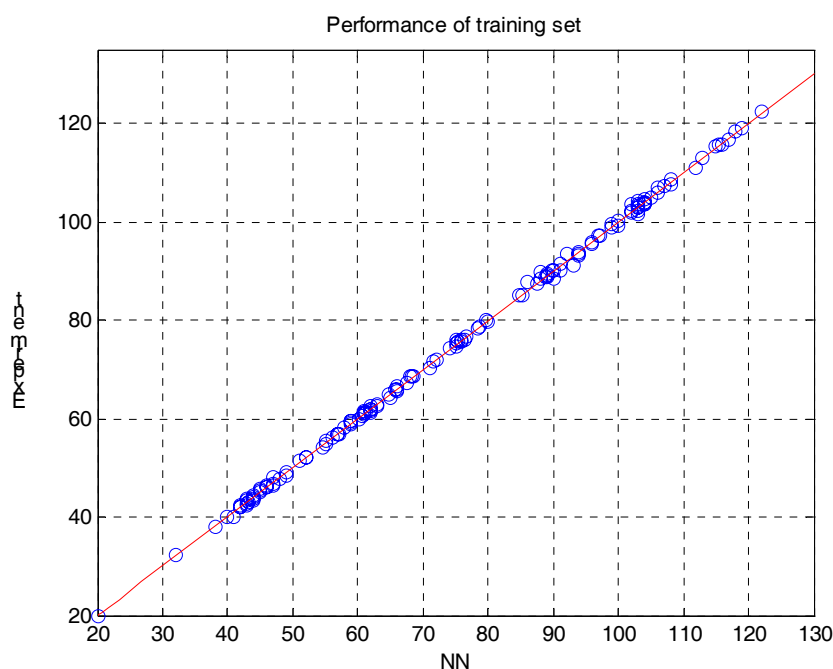


Fig. 5 – Red Neuronal - Performance del Conjunto de Entrenamiento

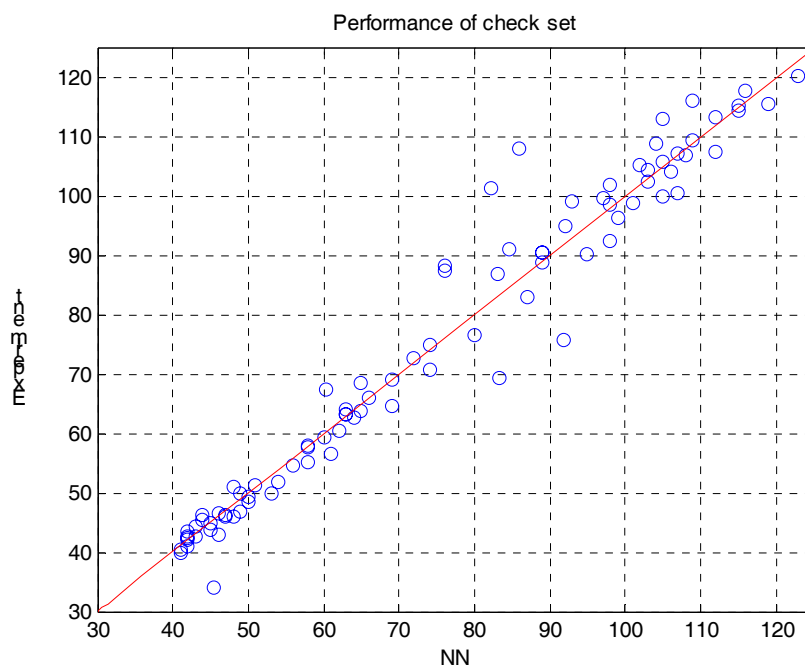


Fig. 6 – Red neuronal - Performance del Conjunto de Validación

#### 4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentaron dos sistemas basados respectivamente en ANFIS y Redes Neuronales para predecir la resistencia a compresión uniaxial  $f'_c$  de un hormigón con una dosificación dada, dentro del rango de variables considerado. Ambos sistemas produjeron errores finales de orden similar en el conjunto de validación, y éstos son de similar tamaño y características (en cuanto a los datos que contienen), por lo que se considera que ambos sistemas pueden ser utilizados indistintamente para la predicción de  $f'_c$ .

En cuanto al proceso de entrenamiento, ANFIS aceptaron un conjunto de entrenamiento de menor tamaño, y un conjunto de Control, sin mayores problemas, mientras que las Redes Neuronales no aceptaron conjunto de Control, y requirieron de un conjunto de Entrenamiento de mayor tamaño.

Por lo tanto, los sistemas propuestos proveen 2 herramientas útiles tanto desde el punto de vista de la tecnología del hormigón para ser utilizadas en el diseño de mezclas para HSC y para la optimización de costos de materiales, como desde el punto de vista del diseño de hormigones cuyo comportamiento mecánico se desea analizar.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores primero y último agradecen el apoyo brindado por la Universidad de Buenos Aires (UBA) - Argentina, por medio del proyecto UBACYT 2006-2009, I813. Los autores segundo, tercero, cuarto y último, agradecen el apoyo brindado por la ANPCyT y la Universidad Nacional de Tucumán (UNT) de Argentina por medio del proyecto PICTO 669-6.

Agradecen también la respuesta del Dr. Torrent, de Holcim Group, Suiza.

#### REFERENCIAS

Atcin P., Mehta P., "Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of

- high-strength concrete” *ACI Materials Journal*, 87-2: 103-107, 1990.
- Alves M., Cremonini R., Dal Molin D., “A comparison of mix proportioning methods for high-strength concrete”, *Cement and Concrete Composites* 26: 613-621, 2004.
- Cetin A., Carrasquillo R., “High performance concrete: Influence of coarse aggregates on mechanical properties”, *ACI Materials Journal*, 95-3: 252-261, 1998.
- Dias, W., Pooliyadda, S. “Neural Network for predicting properties of concretes with admixtures”, *Constructions and Building Materials* 15(2001),371--379
- Einsensfeld R., Velasco M., “Fracture parameters for high-performance concrete”, *Cement and Concrete Research* 36: 576-583, 2006.
- 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)
- Giaccio G., Rocco C., Violini D., Zappitelli J., Zerbino R., “High strength concretes incorporating different coarse aggregates”, *ACI Materials Journal*, 89-3: 242-246, 1992.
- Goldberg, “Genetic Algorithms in Optimization and Machine Learning”
- Hampel T., Curbach M., “Behavior of high performance concrete under multiaxial loading”, *Proceedings of the PCI/FHWA/FIB International Symposium on High Performance Concrete, Orlando, Sept. 25-27, 2000.*
- Jeyasehar, C., Sumangala, K. “Damage assessment of prestressed concrete beams using Artificial Neural Networks (ANN) approach”, *Computers and Structures* 34(2006), 1709--1718
- Kosko, B. “Neural Network and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence”
- Lee I., “Complete stress-strain characteristics of high performance concrete”, *Phd Thesis, New Jersey Institute of Technology, 2002.*
- Lim C., Yoon-Soo Y., Kim J., “Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete”, *Cement and Concrete Research* 34: 409-420, 2004.
- Lu, X., “Uniaxial and triaxial behavior of high strength concrete with and without steel fibers”, *Phd Thesis, New Jersey Institute of Technology, 2005.*
- Navalurkar, R. K., “Fracture mechanics of high strength concrete members”, *Phd Thesis, New Jersey Institute of Technology, 1996.*
- 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.*
- Rong-Song He, Shun-Fa Hwang, “Damage detection by an adaptive real-parameter simulated annealing Genetic Algorithm”, *computers and structures*, in press.
- Sfer D., Carol I., Gettu R., Etse G., “Experimental study of the triaxial behavior of Concrete”, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 128-2:156-163, 2002.
- Tolentino E., Lameiras F., Gomes A., Rigo da Silva C., Vasconcelos W., “Effects of high temperature on the residual performance of Portland cement concretes” *Materials Research, vol.5, no.3, p.301-307, 2002.*
- Xie J., Elwi A., Mac Gregor J., “Mechanical properties of three high-strength concretes containing silica fume”, *ACI Materials Journal*, 92-2: 135-145, 1995.

## ANEXO 1 – BASE DE DATOS UTILIZADA

CEM	S F	F A	WATER	S P	COARSE AGG		MAX. AGG. SIZE	COARSE AGG SIZE	f <sub>c</sub>
					AGG	FINE AGG.			
335	0	0	237,8	3,4	1246	615	19,00	3	20,0
350	0	0	199,5	0,472	980	875	20,00	2	32,0
400	0	0	180	2,0	972	1012	19,00	3	42,0
400	0	0	180	2,0	972	862	19,00	3	42,0
378	0	0	170	1,9	918	882	19,00	3	43,0
378	0	0	170	1,9	918	762	19,00	3	43,0
400	0	0	180	2,0	972	764	19,00	3	43,0
450	0	0	180	2,3	972	733	19,00	3	44,0
356	0	0	160	3,6	864	766	19,00	3	44,0
450	0	0	180	2,3	972	934	19,00	3	45,0
450	0	0	180	2,3	972	828	19,00	3	45,0
356	0	0	160	3,6	864	864	19,00	3	45,0
378	0	0	170	1,9	918	995	19,00	3	46,0
425	0	0	170	2,1	918	847	19,00	3	47,0
425	0	0	170	2,1	918	751	19,00	3	47,0
356	0	0	160	3,6	864	974	19,00	3	47,0
425	0	0	170	2,1	918	955	19,00	3	49,0
400	0	0	160	4,0	864	830	19,00	3	50,0
400	0	0	160	4,0	864	736	19,00	3	50,0
400	0	0	160	4,0	864	936	19,00	3	51,0
460	0	0	193,3	2,3	1180	648	9,50	4	52,0
514	0	0	180	5,1	972	675	19,00	3	53,0
514	0	0	180	3,9	972	897	19,00	3	56,0
514	0	0	180	3,9	972	764	19,00	3	56,0
486	0	0	170	4,9	918	693	19,00	3	57,0
400	0	0	156,1	7,08	975	868	16,00	1	57,2
486	0	0	170	4,9	918	782	19,00	3	59,0
486	0	0	170	4,9	918	882	19,00	3	60,0
597	0	0	167	3,6	1122	481	19,00	1	60,3
600	0	0	180	7,5	972	795	19,00	3	61,0
600	0	0	180	7,5	972	596	19,00	3	61,0
540	0	0	162	4,1	1055	676	19,00	2	61,9
600	0	0	180	7,5	972	704	19,00	3	62,0
457	0	0	160	5,7	864	899	19,00	3	63,0
457	0	0	160	5,7	864	798	19,00	3	63,0
457	0	0	160	5,7	864	707	19,00	3	63,0
567	0	0	170	8,5	918	638	19,00	3	64,0
597	0	0	167	3,6	1020	586	19,00	1	64,7
567	0	0	170	8,5	918	721	19,00	3	66,0
567	0	0	170	8,5	918	814	19,00	3	66,0
597	0	0	167	3,6	918	692	19,00	1	66,5
597	0	0	167	3,6	1179,2	481	19,00	2	67,6
520	0	0	170	4,3	1000	760	9,53	1	68,6
533	0	0	160	8,0	864	626	19,00	3	69,0
533	0	0	160	8,0	864	736	19,00	3	71,0
597	0	0	167	3,6	1100	481	19,00	2	74,0
597	0	0	167	3,6	1381,6	481	19,00	4	75,0
597	0	0	167	3,6	900	692	19,00	2	75,0
533	0	0	160	8,0	864	830	19,00	3	75,0
597	0	0	167	3,6	1256	586	19,00	4	75,5
597	0	0	167	3,6	1130,4	692	19,00	4	76,0
597	0	0	167	3,6	1000	586	19,00	2	76,0
597	0	0	167	3,6	1015,2	692	13,00	2	76,5
540	0	0	162	4,1	1040	676	19,00	3	80,0
597	0	0	167	3,6	964,8	692	19,00	2	86,3
597	0	0	167	3,6	1128	586	13,00	2	86,8
597	0	0	167	3,6	1240,8	481	13,00	2	86,8
597	0	0	167	3,6	1072	586	19,00	2	89,1
540	0	0	162	4,1	1150	676	19,00	4	91,9
360	39,6	0	200	3,6	1080	720	9,53	4	43,1
378	38	0	203,0	3,2	1134	756	19,00	4	45,5
455	45	0	202,9	4,6	1138	683	19,00	4	54,5
353	35	0	135,9	10,4	988	1059	19,00	4	58,9
393	47	0	126	1	1080	745	14,00	1	60,2
420	46,2	0	154	4,2	1260	462	9,53	4	60,8
587	59	0	223,1	3,2	804	787	19,00	4	61,2
431	43	0	177,1	5,7	1220	698	19,00	4	65,7
568	57	0	205,0	6,3	1136	568	19,00	4	65,9
638	64	0	184,4	7,0	829	817	19,00	4	68,4
420	47	0	147	11,5	992	860	9,50	3	71,5
400	40	0	136,4	8,8	980	1020	19,00	4	72,1
759	76	0	205,7	11,1	1139	380	19,00	4	75,0
472	47	0	162,4	7,4	1241	680	19,00	4	76,0
444	44	0	136,8	9,8	977	977	19,00	4	76,0
395	20	0	120	9,9	851	552	9,50	4	76,6
540	60	0	151	14,8	992	724	9,50	3	78,5
460	50,6	0	133	4,6	1380	294,4	9,53	4	78,7
912	91	0	206,1	17,7	1140	228	19,00	4	79,8
514	51	0	148,0	12,3	1259	663	19,00	4	80,0
491	49	0	135,0	9,3	982	933	19,00	4	82,2
642	64	0	158,6	10,6	867	847	19,00	4	83,1
457	50	0	153	12,4	992	814	9,50	3	83,4
693	69	0	148,3	15,2	852	839	19,00	4	84,7
500	42	0	137,5	10,6	1130	675	14,00	3	84,8
576	58	0	132,5	19,0	1284	622	19,00	4	86,0
660	33	0	165	16,8	972	621	19,00	3	86,0

CEM	S F	F A	WATER	S P	COARSE		MAX. AGG.	COARSE		f <sub>c</sub>
					AGG	FINE AGG.	SIZE	AGG SIZE		
593	30	0	180	11,9	864	552	19,00	3		<b>87,0</b>
450	45	0	126,3	12,213	966	729	16,00	1		<b>87,6</b>
574	29	0	155	10,9	972	621	19,00	3		<b>88,0</b>
593	59	0	160	13,8	864	552	19,00	3		<b>88,0</b>
534	53	0	135,1	11,3	961	908	19,00	4		<b>88,4</b>
541	54	0	139,6	15,2	1277	644	19,00	4		<b>88,9</b>
640	32	0	160	16,8	864	552	19,00	3		<b>89,0</b>
611	92	0	165	15,3	972	621	19,00	3		<b>89,0</b>
611	153	0	165	15,3	972	621	19,00	3		<b>89,0</b>
611	92	0	165	15,3	972	621	19,00	3		<b>89,0</b>
611	122	0	165	15,3	972	621	19,00	3		<b>89,0</b>
611	153	0	165	15,3	972	621	19,00	3		<b>89,0</b>
611	92	0	165	15,3	972	621	19,00	3		<b>89,0</b>
611	122	0	165	15,3	972	621	19,00	3		<b>89,0</b>
611	153	0	165	15,3	972	621	19,00	3		<b>89,0</b>
611	92	0	165	15,3	972	621	19,00	3		<b>89,0</b>
461	51	0	130	2	1026	529	14,00	1		<b>89,9</b>
611	31	0	165	15,4	972	621	19,00	3		<b>90,0</b>
611	61	0	165	13,9	972	621	19,00	3		<b>90,0</b>
640	64	0	160	13,4	864	552	19,00	3		<b>91,0</b>
593	89	0	160	13,8	864	552	19,00	3		<b>91,0</b>
660	99	0	165	16,6	972	621	19,00	3		<b>92,0</b>
500	42	0	137,5	10,6	1130	675	10,00	1		<b>92,1</b>
620	124	0	155	14,2	972	571	19,00	3		<b>93,0</b>
574	57	0	155	12,9	972	621	19,00	3		<b>93,0</b>
696	35	0	160	16,8	864	552	19,00	3		<b>94,0</b>
717	36	0	165	19,8	972	621	19,00	3		<b>94,0</b>
574	86	0	155	15,8	972	621	19,00	3		<b>94,0</b>
620	31	0	155	14,8	972	621	19,00	3		<b>95,0</b>
450	45	0	84,6	28,143	1012	764	16,00	1		<b>95,9</b>
640	96	0	160	16,8	864	552	19,00	3		<b>96,0</b>
674	34	0	155	18,5	972	621	19,00	3		<b>97,0</b>
717	72	0	165	18,0	972	621	19,00	3		<b>97,0</b>
620	62	0	155	18,3	972	621	19,00	3		<b>97,0</b>
500	42	0	137,5	10,6	1130	675	10,00	2		<b>97,3</b>
696	70	0	160	13,8	864	552	19,00	3		<b>98,0</b>
696	104	0	160	19,8	864	552	19,00	3		<b>98,0</b>
660	66	0	165	15,7	972	621	19,00	3		<b>98,0</b>
620	93	0	155	19,8	972	621	19,00	3		<b>99,0</b>
620	62	0	155	12,2	972	571	19,00	3		<b>99,0</b>
620	93	0	155	11,7	972	571	19,00	3		<b>99,0</b>
674	135	0	155	13,7	972	571	19,00	3		<b>100,0</b>
717	108	0	165	17,1	972	621	19,00	3		<b>100,0</b>
600	60	0	150	12,7	972	571	19,00	3		<b>101,0</b>
682	102	0	150	23,0	972	523	19,00	3		<b>102,0</b>
674	101	0	155	18,3	972	621	19,00	3		<b>102,0</b>
600	90	0	150	13,7	972	571	19,00	3		<b>102,0</b>
674	67	0	155	18,6	972	571	19,00	3		<b>102,0</b>
775	78	0	155	18,1	972	571	19,00	3		<b>103,0</b>
659	99	0	145	19,3	972	523	19,00	3		<b>103,0</b>
652	65	0	150	14,6	972	571	19,00	3		<b>103,0</b>
652	98	0	150	14,6	972	571	19,00	3		<b>103,0</b>
674	67	0	155	18,8	972	621	19,00	3		<b>103,0</b>
674	101	0	155	14,6	972	571	19,00	3		<b>103,0</b>
580	58	0	145	17,6	972	571	19,00	3		<b>103,0</b>
580	87	0	145	13,4	972	571	19,00	3		<b>103,0</b>
600	120	0	150	14,6	972	571	19,00	3		<b>103,0</b>
725	109	0	145	20,9	972	523	19,00	3		<b>104,0</b>
775	116	0	155	18,6	972	571	19,00	3		<b>104,0</b>
636	95	0	140	16,5	972	523	19,00	3		<b>104,0</b>
630	63	0	145	16,1	972	571	19,00	3		<b>104,0</b>
652	130	0	150	18,6	972	571	19,00	3		<b>104,0</b>
580	116	0	145	21,0	972	571	19,00	3		<b>104,0</b>
700	105	0	140	21,9	972	523	19,00	3		<b>105,0</b>
750	113	0	150	20,9	972	523	19,00	3		<b>105,0</b>
775	155	0	155	21,0	972	571	19,00	3		<b>105,0</b>
659	132	0	145	20,9	972	523	19,00	3		<b>105,0</b>
630	95	0	145	15,1	972	571	19,00	3		<b>105,0</b>
750	75	0	150	16,6	972	571	19,00	3		<b>106,0</b>
750	113	0	150	18,1	972	571	19,00	3		<b>106,0</b>
750	150	0	150	19,5	972	571	19,00	3		<b>106,0</b>
725	145	0	145	20,9	972	523	19,00	3		<b>107,0</b>
682	136	0	150	20,9	972	523	19,00	3		<b>107,0</b>
630	126	0	145	21,9	972	571	19,00	3		<b>107,0</b>
750	150	0	150	27,7	972	523	19,00	3		<b>108,0</b>
636	127	0	140	21,4	972	523	19,00	3		<b>108,0</b>
682	170	0	150	26,1	972	523	19,00	3		<b>108,0</b>
833	125	0	150	28,2	972	523	19,00	3		<b>109,0</b>
700	140	0	140	21,4	972	523	19,00	3		<b>109,0</b>
725	73	0	145	19,3	972	571	19,00	3		<b>112,0</b>
750	188	0	150	28,7	972	523	19,00	3		<b>112,0</b>
659	165	0	145	25,0	972	523	19,00	3		<b>112,0</b>
725	109	0	145	19,0	972	571	19,00	3		<b>112,0</b>
806	121	0	145	27,7	972	523	19,00	3		<b>113,0</b>
778	117	0	140	31,1	972	523	19,00	3		<b>115,0</b>
833	167	0	150	33,9	972	523	19,00	3		<b>115,0</b>

CEM	S F	F A	WATER	S P	COARSE		MAX. AGG. SIZE	COARSE AGG SIZE	f <sub>c</sub>
					AGG	FINE AGG.			
725	181	0	145	28,1	972	523	19,00	3	115,0
529	59	0	114	2	1078	544	14,00	1	115,4
806	161	0	145	28,7	972	523	19,00	3	116,0
636	159	0	140	21,9	972	523	19,00	3	116,0
833	208	0	150	34,4	972	523	19,00	3	117,0
725	145	0	145	22,5	972	571	19,00	3	118,0
806	201	0	145	28,7	972	523	19,00	3	119,0
700	175	0	140	31,3	972	523	19,00	3	119,0
778	156	0	140	32,1	972	523	19,00	3	122,0
778	194	0	140	36,5	972	523	19,00	3	123,0
320	0	80	180	2,0	972	733	19,00	3	38,0
360	0	40	180	2,0	972	764	19,00	3	40,0
320	0	80	180	2,0	972	972	19,00	3	41,0
320	0	80	180	2,0	972	862	19,00	3	41,0
360	0	40	180	2,0	972	862	19,00	3	41,0
405	0	45	180	2,3	972	704	19,00	3	42,0
340	0	38	170	1,9	918	955	19,00	3	42,0
302	0	76	170	1,9	918	955	19,00	3	42,0
340	0	38	170	1,9	918	847	19,00	3	42,0
302	0	76	170	1,9	918	847	19,00	3	42,0
340	0	38	170	1,9	918	751	19,00	3	42,0
302	0	76	170	1,9	918	751	19,00	3	42,0
360	0	40	180	2,0	972	972	19,00	3	42,0
360	0	90	180	2,3	972	897	19,00	3	43,0
360	0	90	180	2,3	972	704	19,00	3	43,0
320	0	36	160	3,6	864	864	19,00	3	43,0
320	0	36	160	3,6	864	766	19,00	3	43,0
340	0	85	170	2,1	918	721	19,00	3	44,0
405	0	45	180	2,3	972	934	19,00	3	44,0
405	0	45	180	2,3	972	828	19,00	3	44,0
360	0	90	180	2,3	972	795	19,00	3	44,0
284	0	71	160	3,6	864	736	19,00	3	44,0
284	0	71	160	3,6	864	936	19,00	3	45,0
284	0	71	160	3,6	864	830	19,00	3	45,0
463	0	51	180	5,1	972	648	19,00	3	46,0
340	0	85	170	2,1	918	918	19,00	3	46,0
340	0	85	170	2,1	918	814	19,00	3	46,0
383	0	43	170	2,1	918	721	19,00	3	46,0
320	0	36	160	3,6	864	974	19,00	3	46,0
320	0	80	160	4,0	864	707	19,00	3	47,0
383	0	43	170	2,1	918	814	19,00	3	47,0
411	0	103	180	3,9	972	733	19,00	3	48,0
411	0	103	180	5,1	972	648	19,00	3	48,0
383	0	43	170	2,1	918	918	19,00	3	48,0
360	0	40	160	2,6	864	936	19,00	3	49,0
320	0	80	160	4,0	864	899	19,00	3	49,0
360	0	40	160	4,0	864	830	19,00	3	49,0
320	0	80	160	4,0	864	798	19,00	3	49,0
360	0	40	160	4,0	864	736	19,00	3	49,0
463	0	51	180	3,9	972	764	19,00	3	51,0
411	0	103	180	3,9	972	828	19,00	3	52,0
463	0	51	180	3,9	972	862	19,00	3	54,0
389	0	97	170	4,9	918	665	19,00	3	55,0
389	0	97	170	4,9	918	847	19,00	3	56,0
437	0	49	170	4,9	918	665	19,00	3	57,0
480	0	120	180	7,5	972	648	19,00	3	58,0
437	0	49	170	4,9	918	882	19,00	3	58,0
437	0	49	170	4,9	918	751	19,00	3	58,0
389	0	97	170	4,9	918	751	19,00	3	58,0
366	0	91	160	5,7	864	766	19,00	3	59,0
366	0	91	160	5,7	864	652	19,00	3	59,0
540	0	60	180	7,5	972	675	19,00	3	61,0
540	0	60	180	7,5	972	596	19,00	3	61,0
480	0	120	180	7,5	972	571	19,00	3	61,0
540	0	60	180	7,5	972	764	19,00	3	62,0
480	0	120	180	7,5	972	764	19,00	3	62,0
366	0	91	160	5,7	864	864	19,00	3	62,0
411	0	46	160	5,7	864	679	19,00	3	62,0
453	0	113	170	8,5	918	665	19,00	3	63,0
510	0	57	170	8,5	918	612	19,00	3	63,0
453	0	113	170	8,5	918	587	19,00	3	63,0
411	0	46	160	5,7	864	864	19,00	3	63,0
411	0	46	160	5,7	864	766	19,00	3	63,0
427	0	107	160	8,0	864	600	19,00	3	65,0
510	0	57	170	8,5	918	693	19,00	3	65,0
453	0	113	170	8,5	918	782	19,00	3	66,0
510	0	57	170	8,5	918	782	19,00	3	66,0
480	0	53	160	8,0	864	626	19,00	3	68,0
427	0	107	160	8,0	864	679	19,00	3	69,0
480	0	53	160	8,0	864	707	19,00	3	72,0
480	0	53	160	8,0	864	798	19,00	3	74,0
427	0	107	160	8,0	864	798	19,00	3	74,0