

ESTADO DEL ARTE PARA MODELO DE COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN A PARTIR DE REDES NEURONALES.

Ing. Carmen Laura Martínez Pérez ¹, MSc .Ing Alejandro Hernández Hernández ²,

1. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. carmen.martinez@umcc.cu

2 .Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. alejandro.hdez@umcc.cu

Resumen

El consumo de áridos y de cemento en la elaboración de hormigones es hoy día un problema de marcada importancia para el país debido al costo de obtención de estas materias primas y la escases de las mismas, por ende un correcto diseño de mezclas con el mínimo consumo de cemento y áridos posibles y con las propiedades físico mecánicas adecuadas se hace imprescindible. El Estado del Arte muestra la importancia de las Redes Neuronales Artificiales aplicadas a las dosificaciones de hormigón y los diferentes métodos empleados en la predicción de propiedades , dosificación de la materia prima, control de calidad y la validación de modelos todo ello ejemplificado a través de investigaciones realizadas en el campo de la Inteligencia artificial.

Palabras claves: *Redes neuronales, dosificación de hormigón, Inteligencia Artificial*

Introducción

En la actualidad la dosificación de mezclas parece un problema sencillo en el que únicamente intervienen pocos parámetros que se pueden elegir, como los contenidos relativos de cada uno de los componentes principales en la mezcla, en su mayoría estos métodos tradicionales no se han resuelto analíticamente de forma convincente, y la mayoría de los métodos de dosificación usados a nivel mundial se basan en la generalización de experiencias previas y disponibles en formas de tablas o fórmulas empíricas, cuestión esta que propicia que no se escoja la combinación más óptima con proporciones de áridos y cementos mínimas que conlleven a resistencias máximas. El procedimiento propuesto por *O'Reilly* es el más usado en Cuba, una de las principales ventajas de este método es el ahorro de cemento que proporciona comparado con otros métodos como el ACI, el método *O'Reilly* puede llegar a reducir en un 15% o más el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón. Esto tiene una repercusión económica muy importante en la industria de la construcción. Con el objetivo de lograr el máximo ahorro de cemento con las condiciones tecnológicas existentes, sin requerir nuevas inversiones o eventuales importaciones de aditivos químicos para las mezclas de hormigón, *O'Reilly* propone un método de dosificación a partir de la determinación de las características de los áridos a emplear, y en función de ellas se diseña la mezcla, pues según demuestra existe una influencia cuantitativa de la forma de los áridos en el consumo de cemento. El método consiste en determinar experimentalmente la combinación porcentual de áridos gruesos y arena que ofrezca el máximo peso volumétrico (mínimo contenido de vacíos), obteniendo el volumen de la pasta a través del cálculo de los vacíos, y finalmente el contenido de cemento y de agua se determina mediante factores que dependen de la relación a/c y de la consistencia deseada de la mezcla.

La existencia de un modelo de comportamiento basado en redes neuronales sería capaz de procesar un grupo elevado de datos simulando en cierta medida un protocolo de diseño de mezclas racionalizador en gran medida de las cantidad de agregados gruesos finos y de cemento cuestión esta que propicia el ahorro de miles de metros cúbicos de materiales para el país. Hoy en día los volúmenes de materiales dígame áridos gruesos, finos y cementos empleados a escala global constituyen subproductos del sector industrial donde se emiten altas cantidades energía, con un elevado impacto ambiental asociado pues se conoce que las reservas de estos materiales son insuficientes para suplir a largo plazo su creciente demanda, además de que el acceso a estas fuentes está limitado por factores económicos y regionales. En Cuba, la industria del cemento, se ha convertido en la mayor consumidora de recursos energéticos, por esta razón se buscan vías para disminuir las afectaciones que provoca la producción de este material, tanto a la economía como al medio ambiente. La sustitución de un porcentaje del clínquer a partir del empleo de materiales cementicios suplementarios(MSC), ha sido reconocida como la vía más efectiva para reducir las emisiones de CO₂ y los gastos energéticos asociados a la fabricación del cemento, al

mismo tiempo que pueden mejorar o mantener sus propiedades físico mecánicas y químicas.

La Inteligencia Artificial (IA) considerada como una ciencia por varios autores tiene como objetivo el diseño y la construcción de máquinas capaces de imitar el comportamiento inteligente de los seres humanos. (Barber et al., 2002;) Múltiples son las literaturas que reportan que el campo de la IA está conformado por diversos paradigmas como son: Aprendizaje Automático, Ingeniería del Conocimiento, Lógica Difusa, Redes Neuronales Artificiales Sistemas Multi Agentes, Razonamiento Basado en Casos, Sistemas Expertos, Redes Bayesianas, Vida Artificial, Computación Evolutiva o Algoritmos Evolutivos, y la Minería de Datos. Es importante mencionar que los Algoritmos Evolutivos se conforman por Algoritmos Genéticos (AG), Programación Genética (PG) y Estrategias Evolutivas (EE).

La utilización de Redes Neuronales Artificiales, Computación Evolutiva y Lógica Difusa así como en la conformación de aplicaciones híbridas, principalmente de modelos neuronales artificiales y de modelos evolutivos son las áreas o paradigmas más usados en lo que a diseño de mezclas de hormigón se refiere. Estos trabajos se pueden organizar en aplicaciones para predicción de propiedades, optimización de materiales, control de calidad, en la dosificación propia de la materia prima y en la validación de resultados experimentales.

Como se había planteado anteriormente una de las mayores aplicaciones de la IA en el diseño de mezclas de concreto es la predicción de propiedades ya sea en estado fresco o en estado endurecido; centrándose en propiedades reológicas, mecánicas, y en la durabilidad.

Con respecto a la predicción de las propiedades reológicas, las aplicaciones de IA se han enfocado en determinar los valores de la viscosidad y del esfuerzo de cizallamiento, del flujo de asentamiento, del tiempo de asentamiento, y el asentamiento del cono de Abrams.

Las redes neuronales, también llamadas "redes de neuronas artificiales", son modelos bastante simplificados de las redes de neuronas que forman el cerebro. Y, al igual que este, intentan "aprender" a partir de los datos que se le suministran, la capacidad de aprendizaje a partir de la experiencia (entrenamiento) la peculiaridad de ser entrenadas para realizar una determinada tarea sin necesidad de estudiar está a fondo ni programarla usando un lenguaje de programación las mismas pueden volver a entrenarse para ajustarse a nuevas necesidades de la tarea que realizan, sin tenerse que reescribir o revisar el código, su velocidad de respuesta una vez concluido el entrenamiento, su robustez, en el sentido de que el conocimiento adquirido se encuentra repartido por toda la red, de forma que si se lesiona una parte se continúan generando cierto número de respuestas correctas son algunas de las diferencias que tiene con otras técnicas de Inteligencia Artificial.

El aprendizaje en una red neuronal es una de las partes más importantes, ya que a partir de ellas se determina valores precisos de los pesos para todas sus conexiones, que la capacite para la resolución eficiente de un problema dado.

Desarrollo:

Una correcta dosificación de la mezcla de hormigón tendrá incidencia directa positiva en el resultado final del hormigón que se traza, la misma es un elemento determinante en la obtención de las características y propiedades físicas mecánicas esperadas. En la actualidad son múltiples los métodos de dosificación, sin embargo, no todos son objetivos en determinar la combinación óptima que conlleve a hormigones resistentes y durables en el tiempo.

La construcción con hormigón y las exigencias técnicas especificadas para este material las cuales son cada vez más creciente sirvieron de inspiración a diversos investigadores los cuales conjugaron investigación, experiencia y empirismo en la búsqueda de un método para encontrar la dosificación de materiales que garantizaran la obtención de un hormigón con las características que más se ajustasen a la necesidad de cada estructura en particular. Esta búsqueda no ha terminado y no ha llevado a un método único ni por lo menos exacto; sin embargo, si ha definido varios procedimientos, unos más empíricos que otros, que se basan en el ensayo y error para al final, y en el caso de haber usado los datos o la información correcta, recomendar las proporciones del hormigón esperado. (Shakhmento, 2000)

En el diseño de mezcla de hormigón juegan un papel importante un gran número de variables complejas que determinan su comportamiento en servicio, desde su concepción, pasando por su mezclado, fraguado y endurecimiento, hasta su madurez, dichas variables son, entre otras, el costo, la resistencia, la trabajabilidad, la durabilidad y la apariencia.

Las metodologías de dosificación pueden dividirse en dos grupos fundamentales: los que parten como dato principal con la dosificación de cemento y otro formado por los hormigones definidos por sus resistencias mecánicas, especialmente la de compresión. En ambos casos, sin embargo, se deben aportar otros datos como pueden ser la consistencia, tamaño máximo del árido a emplear, tipos de áridos, etc. (Huanca, 2006)

Entre los métodos basados en el contenido de cemento existen el método de Füller y método de Bolomey, entre los métodos basados en la resistencia a compresión existen el método del American Concrete Institute (A.C.I), método De La Peña y método del DIN. Existen también métodos basados en la experimentación, como el de O'Reilly que es uno de los más utilizados en Cuba y otras metodologías basadas en mezclas de prueba y en granulometrías discontinuas.

Método de Füller fue creado en el año 1907 en los EUA, su aplicación está dirigida principalmente para diseños de hormigones con tamaño máximo del árido comprendido

entre 50 ± 20 mm, los áridos son rodados, no existen secciones fuertemente armadas y la cantidad de cemento por metro cúbico es superior a los 300 Kg/m³. Los datos para el diseño de una mezcla de hormigón son: la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón, la consistencia, la granulometría y densidad relativa de los áridos. El mismo se basa en la determinación de la resistencia promedio requerida se selecciona el asentamiento, se determina el contenido de agua, agregados gruesos, finos y aire calculando así la proporción de agua cemento $(c/w)=z$.

Método de Bolomey: Algunos investigadores lo consideran como un perfeccionamiento del método de Füller; los datos para efectuar la dosificación por este método suelen ser los mismos que los utilizados por el método de Füller. La cantidad de agua necesaria por metro cúbico de hormigón se determina utilizando las mismas tablas que en el método de Füller. Solo difieren a la hora de determinar en qué proporción se mezclan las distintas fracciones de árido pues Bolomey utiliza una curva de granulometría variable en función de la consistencia deseada en el hormigón y la forma de los áridos, mientras que Füller considera una curva de granulometría ideal. Para ajustar la curva granulométrica de Bolomey el sistema de tanteos no varía con respecto al utilizado por Füller, pero el basado en los módulos granulométricos si aporta algo nuevo, ya que Bolomey considera el cemento como un árido más. (Bolívar, 2010)

Método del American Concrete Institute (A.C.I.) es, sin lugar a dudas, el método de dosificación más utilizado en todo el mundo, siendo adecuado para cualquier obra realizada con hormigón. En este método se selecciona la f'_{cr} a partir de la f'_c y la desviación estándar, el tamaño máximo nominal del agregado grueso, volumen unitario de agua de diseño, contenido de aire, relación agua cemento, con estos elementos se determina entonces el factor cemento, agregado grueso suma de volúmenes absolutos de cemento, agua de diseño, aire y agregado grueso determinando así el volumen absoluto del agregado fino y de los valores de diseño del cemento, agua, aire y agregado grueso, corrigiendo los valores de diseño por humedad del agregado determinando el peso de diseño y de obra.

- Método De La Peña: Este método de dosificación fue publicado en el año 1955 por C. De La Peña y se basa principalmente en la resistencia media a compresión. “Se aplica en hormigones estructurales de edificios, pavimentos, canales, depósitos de agua, puentes, etc., partiendo de un contenido de 300 kg/m³ de cemento y cuando las condiciones de ejecución puedan estimarse como buenas.” (Anónimo, S.A-f). En este método se fija el tamaño máximo del árido considerando que es la abertura del menor tamiz que retiene menos del 25% de la fracción más gruesa del árido, la cantidad de agua por metro cúbico de hormigón en función de la consistencia, el tipo de árido y su tamaño máximo (tablas de apoyo), se determina además la consistencia deseada proporcionándola como dato u obteniéndola como resultado de los ensayos de asentamiento del cono de Abrams, la relación agua/cemento en peso, la cual está en función de la resistencia media del hormigón a los 28 días y el tipo de árido a utilizar, (apoyo en las tablas). Obteniendo así el peso del cemento en kilogramos para el volumen de agua por metro cúbico de hormigón.

Se determina entonces la proporción en que deben mezclarse los áridos utilizando un gráfico en el que se establece el porcentaje del árido en función del módulo granulométrico y el tamaño máximo del árido dando como resultado el volumen real que hay que repartir entre los áridos utilizando 1.025 para conseguir un metro cúbico de hormigón.

- Método del DIN: El método DIN es una aplicación singularizada del método del Módulo de Finura de la Combinación de Agregados. Parte de la hipótesis que el módulo de finura del agregado integral oscila entre 5.2 y 5.3. En este método una vez se define la relación agua/cemento y se calcula la cantidad de cemento por metro cúbico se determina el módulo de finura del agregado global mediante tanteo de la tabla granulométrica, cuyo valor deberá oscilar entre 5.2 – 5.3, los porcentajes obtenidos serán los porcentajes de incidencia de los agregados y se calcula los pesos secos de los agregados (López, S.A).

Método de O'Reilly constituye una notable contribución al desarrollo de las Ciencias Técnicas, aplicadas en particular al hormigón armado, material que mantiene su vigencia entre los recursos fundamentales para el desarrollo de las construcciones en Cuba y en el mundo. Es un método para dosificar el hormigón o concreto, elaborado científicamente. Está basado en principios que difieren totalmente de los métodos hasta ahora conocidos. El método consiste en determinar experimentalmente la combinación porcentual de áridos gruesos y arena que ofrezca el máximo peso volumétrico (mínimo contenido de vacíos), obteniendo el volumen de la pasta a través del cálculo de los vacíos, y finalmente el contenido de cemento y de agua se determina mediante factores que dependen de la relación agua/cemento y de la consistencia deseada de la mezcla.

La dosificación de las mezclas de concreto (o el diseño de las mezclas) es un problema que ha sido alcanzado por uno de los paradigmas de la Inteligencia Artificial, las redes neuronales las cuales han extrapolado su uso para la solución de problemas de ingeniería civil específicamente en el área estructural los trabajos desarrollados para su aplicación, en temáticas relacionadas con el diseño de mezclas de concreto se basan en aplicaciones para predicción de propiedades, optimización de materiales, control de calidad, en la dosificación propia de la materia prima y en la validación de resultados experimentales .

Según (Anderson, 1995) Una RNA es un modelo computacional inspirado en redes neuronales biológicas que puede ser considerada como un sistema de procesamiento de información, es una estructura distribuida, de procesamiento paralelo, formada de neuronas artificiales (llamados también elementos de procesamiento), interconectados por un gran número de conexiones (sinapsis), los cuales son usados para almacenar conocimiento que está disponible para poder ser usado.

Las redes neuronales simulan funciones computacionales elementales de la red nerviosa del cerebro humano, en base a la interconexión de multitud de elementos de procesamiento llamadas neuronas, las cuales presenta un comportamiento completamente local. Una de las mayores ventajas que poseen las redes neuronales es que pueden modificar su comportamiento como respuesta a su entorno. Dado un conjunto de entradas, las RNA se

ajustan para producir respuestas consistentes lo que evidencia que aprenden de la experiencia. Además una vez que es entrenada la red hasta cierto punto esta es insensible a variaciones pequeñas realizadas en la capa de entrada por lo que se dice que son útiles en el reconocimiento de patrones pues generalizan de ejemplos anteriores a nuevas situaciones. Son capaces también de abstraer información de un conjunto de entradas y de aprender algo que nunca había visto: por ejemplo, en el caso de reconocimiento de patrones, una red puede ser entrenada en una secuencia de patrones distorsionados de una letra. Una vez que la red sea correctamente entrenada será capaz de producir un resultado correcto ante una entrada distorsionada.

Estructura Básica de una Red Neuronal Artificial, PE (process element) elemento procesador el cual tiene varias entradas y las combina, normalmente con una suma básica. La suma de las entradas es modificada por una función de transferencia y el valor de la salida de esta función de transferencia se pasa directamente a la salida del elemento procesador. La salida del PE se puede conectar a las entradas de otras neuronas artificiales (PE) mediante conexiones ponderadas correspondientes a la eficacia de la sinapsis de las conexiones neuronales.

En la red neuronal no solo es importante el modelo de los PE los cuales están conectados de forma concreta sino también las formas en que se conectan estos elementos procesadores, a esta forma de organización de los PE se les nombra niveles o capas pues una red típica consiste en una secuencia de capas con conexiones entre capas adyacentes consecutivas. Se dice que la neurona tiene conexión directa con el mundo exterior en dos momentos fundamentales en la llamada capa o buffer de entrada, donde se presentan los datos a la red, y una capa o buffer de salida que mantiene la respuesta de la red a una entrada. El resto de las capas reciben el nombre de capas ocultas.

Clasificación de las Redes Neuronales Artificiales

Las RNA se pueden clasificar según su arquitectura, el tipo de aprendizaje y según sus aplicaciones. (Charytoniuk. 2000)

Según su Arquitectura.

Las neuronas de una RNA están distribuidas en niveles o capas que están unidas entre sí por conexiones llamadas sinapsis; dependiendo del sentido de sus conexiones pueden ser recurrentes y no recurrentes. (Charytoniuk. 2000)

Con Conexiones hacia Adelante (No Recurrentes o Feedforward) Son aquellas cuyas conexiones las cuales son hacia adelante y unidireccionales Según el número de capas que posean pueden ser Monocapas o Multicapas.

Con Conexiones hacia Atrás (Recurrentes o Feedback)

Se caracterizan por la existencia conexiones de retorno entre neuronas de una determinada capa con otras de capas anteriores, conexiones entre neuronas una misma capa o conexiones de una neurona consigo misma. (Charytoniuk. 2000)

Según Su Aprendizaje

Aprendizaje No Supervisado (Sin Maestro) no tienen una referencia de comparación por lo cual contemplan auto organización y la auto asociación, como procesos de obtención de la salida de la red la cual no requiere ser contrastada con algo específico ya conocido (maestro) pues no requieren influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre sus neuronas.

Aprendizaje Supervisado (con Maestro) estas poseen un supervisor en el entrenamiento de la red donde existe un parámetro de referencia ya conocido (maestro), el cual es comparado con las salidas de la red, este se caracteriza por un entrenamiento controlado por una agente externo que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. El supervisor comprueba la salida de la red y en el caso de que ésta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida obtenida se aproxime a la deseada. (Charytoniuk. 2000)

Según su Aplicación.

En Redes de Reconocimiento de Patrones, los cuales son del tipo no recurrente y con aprendizaje supervisado, Redes de Clasificación, las mismas hacen uso del aprendizaje no supervisado para obtener características de clasificación a base de las entradas del problema, Redes de Predicción, tienen como objetivo modelar una función no lineal y Redes de Mapeo de Características.

Uno de los campos más fértiles en producción de literatura especializada es la aplicación de la IA específicamente las redes neuronales para predecir propiedades mecánicas. Un alto número de trabajos se destacan para predecir la resistencia de diseño a la compresión con los siguientes desarrollos: La elaboración de sendos modelos híbridos (uno de RNA y programación lineal, y otro de diseño de experimentos, RNA y programación lineal) para estimar la resistencia a la compresión, la elaboración de RNA para estimar la resistencia a la compresión en concretos sin reforzamiento con fibra en la matriz cementicia para resistencia normal, alta resistencia y en concretos de alta y baja densidad (pesados y aligerados, respectivamente), la elaboración de una RNA para estimar la resistencia a la compresión en concretos reforzados con fibras metálicas.

Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil referida a Análisis de la resistencia del concreto mediante redes neuronales haciendo uso del agregado de la cantera Santa Rosa Huancavelica en la misma se diseña un modelo de inteligencia artificial (redes neuronales artificiales), que permita predecir la resistencia al esfuerzo de compresión axial del concreto ($f'c$). Para lograr el objetivo del proyecto de investigación el autor se basó en los

resultados obtenidos de 79 probetas de concreto registrando sus resistencias al esfuerzo de compresión axial ($f'c$) las cuales oscilaron entre 70 kg/cm² y 390 kg/cm². Seguido de los ensayos de rotura, se realizó el procesamiento de datos para la construcción del modelo de red neuronal artificial con la siguiente estructura: 11 variables de ingreso, siendo estos: (cantidad de cemento, cantidad de agua, cantidad de agregado fino, humedad del agregado fino, absorción del agregado fino, porcentaje que pasa la malla Nro. 4 de agregado fino, cantidad de agregado grueso, humedad del agregado grueso, absorción del agregado grueso, porcentaje que pasa la malla Nro. 4 de agregado grueso, tamaño máximo de los agregados, el tiempo de curado del concreto) y una variable de salida (resistencia a la compresión axial del concreto); para el entrenamiento se realizó diversas simulaciones haciendo uso de la metodología de propagación inversa (back propagation) y el algoritmo de Levenberg Marquardt, buscando encontrar el error cuadrático medio (MSE). La evaluación se realizó en tres grupos de muestra: el primero de entrenamiento 70 % , el segundo de validación 15% y el tercero de test 15% de los datos obtenidos en laboratorio, usando como herramienta de programación software Python y Matlab (Toolbox). Los resultados obtenidos del proyecto de investigación fueron evaluados mediante el análisis estadístico de error medio cuadrático (MSE), se dividieron en: Entrenamiento (training) ($R^2 = 0.99965$), validación ($R = 0.96004$), test ($R = 0.99413$), obteniéndose un modelo de red neuronal artificial con ($R = 0.99113$); siendo R el coeficiente correlación de Pearson, demostrando de ese modo ser eficaz para predecir la resistencia del concreto con un error menor al 1% ,por lo que se concluye que el modelo de red neuronal artificial sería de gran utilidad para el sector de la construcción pues predice la resistencia a la compresión del hormigón, proponiéndose como alternativa para realizar diseños de mezclas de concreto, que cumplan con las necesidades requeridas en los proyectos de ingeniería en el sector construcción y acorde a lo estipulado en la Norma E-060 (2009) y ASTM C-39.

Aplicación de una red neuronal artificial a la dosificación de hormigones premezclados, en este trabajo se muestra una de las tantas aplicaciones de la temática en cuestión pero esta vez encaminada a la aplicación práctica de una red neuronal artificial al problema de dosificaciones de hormigones en planta, con el fin de lograr el entrenamiento de la red el autor realiza 30 amasadas de prueba teniendo en cuenta en cada una de ellas propiedades tales como la resistencia característica a los 28 días, docilidad y la trabajabilidad medida del asiento del cono de Abrams. La función de activación empleada por el autor en esta red fue la sigmoidea pues esta función no lineal permite manejar con solvencia tanto números grandes como pequeños y son las más adecuadas para extender la potencia de la red. En la arquitectura de la red se emplearon 2 neuronas en la capa de entrada asiento del cono y resistencia característica y en la capa de salida 6 neuronas que ofrecen los 6 componentes básicos cuya mezcla daría como resultado un hormigón con las propiedades deseadas estos valores de salida fueron comparados con las amasadas de referencia evaluando en cada caso los errores en las predicciones lo cuales se sitúan por debajo del 5% por lo que se puede concluir que esta propuesta de trabajo sería útil a dosificaciones de hormigones con propiedades preestablecidas por lo que resulta muy prometedora en el control de la líneas

de producción de plantas que fabrican productos de hormigón utilizando siempre los mismos componentes.

Modelización de la resistencia a la compresión del concreto mediante redes neuronales artificiales

El Grupo de investigación conformado por: Leoncio Luis Acuña Pinaud Investigador de la Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas de la Universidad Nacional de Ingeniería de Perú), Ana Victoria Torre Carrillo (Ing. de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería de Perú), entre otros investigadores de prestigio desarrollaron este trabajo con el soporte del Instituto General de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (Concurso de Proyectos de Investigación Interdisciplinario 2012 – II). Para este estudio se tomaron datos de la cantidad de cemento, la cantidad de agua, el módulo de finura de la arena y la piedra, el Tamaño Máximo Nominal (TNM) de la piedra, densidad de la arena y piedra, el peso específico de la arena y piedra, así como el tipo de cemento con el que estaba fabricada, período de curado y resistencia a la compresión de 409 bloques cilíndricos de concreto procedentes de 44 empresas diferentes. Los ensayos se realizaron en edades entre 3 y 28 días. Se transformaron los datos mediante las funciones `mapstd` y `processpca` de MATLAB que transforman de forma afín y unívoca los datos de entrada al intervalo [0, 1] y realizan un análisis de componentes principales eliminando las variables redundantes dentro del conjunto de entrada.

Redes neuronales artificiales para estimar propiedades en estado fresco y endurecido, para hormigones reforzados con fibras metálicas

El hormigón se elabora con cemento, agua, agregados, aditivos y adiciones minerales. Una de sus propiedades en estado fresco, es el asentamiento. Por su parte, en estado endurecido, sus propiedades mecánicas se alcanzan a una edad de 28 días, después del mezclado de las materias primas. Como material frágil, requiere de la incorporación de fibra para adquirir ductilidad. Tanto sin fibra como con fibras, se ha extendido el uso de redes neuronales artificiales (RNA) para predecir principalmente la resistencia a la compresión, lo cual hace interesante aplicarlo también para otras propiedades mecánicas, así como para el asentamiento. En el presente artículo se reporta la elaboración de RNA, entrenadas con los algoritmos de Levenberg-Maquardt y Gradiente Conjugado Escalonado, usando el software MATLAB, para predecir el asentamiento y las resistencias de diseño a la compresión, a la tensión, a la cortante, y a la flexión, así como la tenacidad flexural en hormigones reforzados con fibras de acero. Los resultados de correlación entre los valores obtenidos y reales, muestran que la herramienta computacional elaborada es confiable para su uso predictivo.

Uso de redes neuronales y ANFIS para predecir la resistencia uniaxial a compresión de hormigones de alta resistencia

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 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, por lo que éste artículo es un paso más hacia la formulación de una relación constitutiva realista válida para hormigones de alta resistencia pues desarrolla una herramienta de software, que permite 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.

Conclusiones

El ejercicio de determinar las cantidades de dicha dosificación se conoce como el diseño de la mezcla, y se realiza a partir de protocolos que conducen a la obtención de la resistencia a la compresión, la cual es la propiedad mecánica en el concreto referida como especificación principal en la ingeniería estructural y de la construcción.

La aplicación de la inteligencia artificial (redes neuronales) en la solución de problemas ingenieriles, el significado y configuración de una red neuronal son conceptos sumamente importantes teniendo en cuenta que su estructura está formada por tres capas principales donde cada neurona posee una información específica que se conecta con las demás lo que significa que la salida de una neurona en una red constituye la entrada de otra.

Bibliografía

ACUÑA, L., TORRE, A., MOROMI, I., GARCÍA, F. *Modelización de la Resistencia a la Compresión del Concreto mediante Redes Neuronales Artificiales*. Lima, Perú: Información Tecnológica. (2012).

ANDERSON, J. *Introducción a las Redes Neuronales*. USA: MIT Press. (1995).

AGUILAR, A *Las Redes Neuronales artificiales como una alternativa complementaria a los métodos de clasificación tradicionales*. Lima: Pontificia universidad católica del Perú. (2008)

BERNACKI, M. Y WODARCZYK, P *Principios de entrenamiento de las Redes Neuronales Multicapa usando backpropagation*. (2004)

BLUM, A. *Redes neuronales: un marco orientado a objetos para construir sistemas conexionistas*. New York: John Wiley & Sons. (1992).

BAYKASOGLU, T. DERELI, AND S. TANIS, *Prediction of cement strength using soft computing techniques*, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 11, pp. 2083–2090, (2004).

Bach. GONZALES GASPAR, *Análisis de la resistencia del concreto mediante redes neuronales haciendo uso del agregado de la cantera santa rosa Huancavelica ,Perú* (2018)

CAUDILL, M. Y BUTLER, CH. *Entendiendo Redes Neuronales*. USA: *Computer Explorations*, M.I.T, Press. (1992)

CHARYTONIUK, *Neural network design for short-term load forecasting* .pp. 8-11. 0.1109/DRPT.2000.855725 (2000)

CHARYTONIUK, W., BOX, E.D., LEE.. *Previsión de la demanda basada en redes neuronales en un entorno desregulado*, *Industry Applications*, IEEE Transactions on, Volumen 36, serie 3, (pp. 893-898). (2000)

GONZALES, L., GUERRERO, A., DELVASTO, S., & ERNESTO, A. *Red neuronal artificial para estimar la resistencia a compresión, en concretos fibro-reforzados con polipropileno*. Palmira: Universidad nacional de Colombia (2012).

NAMYONG, Y. SANGCHUN, AND C. HONGBUM, *Prediction of compressive strength of In-situ concrete based on mixture proportions*, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 9–16, 2004.

PINO, R., GÓMEZ, A. Y ABAJO, N *Introducción a la Inteligencia Artificial: Sistemas Expertos, Redes Neuronales Artificiales y Computación Evolutiva*. España: Universidad de Oviedo. (2001)

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, D *Tecnología del Concreto y del Mortero*. México: Quinta edición. BHANDAR EDITORES LTDA. (2001)

SANCHEZ, F., & TAPIA, R.. *Relación de la resistencia a la compresión de cilindros de Concreto a edades de 3, 7, 14, 28 y 56 días respecto a la Resistencia a la compresión* (2015)

SOLIS CARCAÑO, E., MORENO, J., & CHAN, R. *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. *Materiales de Construcción*, 25. (2003).