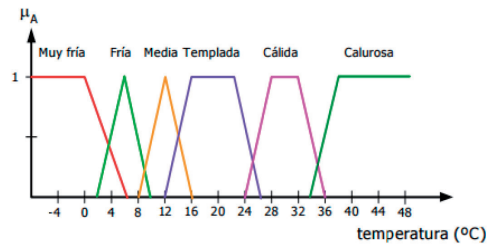


Modelo borroso para el cálculo de dosificaciones de morteros de cemento



Fuzzy model for calculating of cement mortar ratios



Francisco-Javier Gutiérrez-García¹, Silvia Alayón-Miranda², Eduardo González-Díaz¹, Pedro Pérez-Díaz¹

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA. Dpto. de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura¹ y Dpto. de Ingeniería Informática y de Sistemas².
Avda. Ángel Guimerá Jorge, s/n – 38204 La Laguna (Tenerife). Tfno. +34 922 318909

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8406> | Recibido: 06/02/2017 • Evaluado: 08/02/2017 • Aceptado: 12/06/2017

ABSTRACT

- This paper presents a study of the behavior of mortars made with cement and sand. This behavior is tested in the laboratory through experimentation with different ratios. A Fuzzy Rule-Based System is designed with the resulting experimental data to aid in calculating ratios of future mortars. Due to the lack of regulations on mortar ratios, the main goal of this paper is to provide construction professionals with a tool to help prepare mortar. The fuzzy system designed allows the user to know the final characteristic of the mortars in advance. The resulting fuzzy system is validated by comparing its calculated output with real values obtained through new experiments conducted in the laboratory.
- **Keywords:** Mechanical Resistance, Adherence, Cement Mortar, Fuzzy Logic, Mortar Ratio.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio del comportamiento de los morteros confeccionados con cemento y arena, a partir de la dosificación, fabricación y realización de ensayos de los mismos en el laboratorio.

Con los datos empíricos obtenidos se ha diseñado un sistema basado en reglas borrosas que ayuda a la conocer de antemano la dosificación de los morteros a confeccionar. El objetivo es, ante la falta de regulación y control de la fabricación en obra de los morteros, dar al profesional del sector una herramienta de ayuda para la confección de morteros, sabiendo de antemano las características finales de los mismos. El sistema borroso que se obtiene, es validado posteriormente comparando su salida calculada con los valores reales obtenidos en nuevos ensayos realizados en el laboratorio.

Palabras clave: Resistencias Mecánicas, Adherencia, Mortero de Cemento, Lógica Borrosa, Dosificación de Mortero.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización del mortero de cemento y arena, tienen como objetivo principal, aportar características resistentes de los elementos de la estructura portante y la protección exterior de los elementos de la edificación. Los morteros de cemento y arena tienen aplicación en el sector de la edificación, principalmente bajo las especificaciones de CTE DB SE-F y CTE DB HS-1 [1], y en refe-

rencia al control de sus prestaciones, son de aplicación las normas de ensayos normalizados publicados en la Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR [2].

El estudio del comportamiento de los materiales de uso en el sector de la edificación ha sido abordado en la literatura. En [3] se estudia el comportamiento del hormigón frente al agua de mar; en [4] se presentan valores de resistividad eléctrica del hormigón, valorando la hidratación del mismo; el análisis del curado en el hormigón de recubrimiento en [5]. En particular, con relación a los morteros, en [6] se somete a pruebas de envejecimiento acelerado a morteros, y en [7] y [8] se valoran el comportamiento de morteros desde el punto de vista de sus materiales y su dosificación.

En este trabajo se presenta un estudio del comportamiento de los morteros de tres dosificaciones diferentes, en base a ensayos realizados en el laboratorio. Con los datos experimentales recogidos se ha diseñado un sistema informático que modela el comportamiento abordado. El sistema acepta como entrada las características del mortero a diseñar, basadas en el escurrimiento, resistencia mecánica y adherencia requerida para el mortero, y ofrece como salida las proporciones de cada componente para su fabricación. De esta manera se pueden conocer las dosificaciones para confeccionar el mortero resultante deseado sin tener que fabricarlo físicamente antes. Este sistema puede ser utilizado como una herramienta de ayuda por los profesionales del sector.

Para construir el sistema informático se ha utilizado la Teoría de Conjuntos Borrosos desarrollada por Zadeh [9]. La lógica borrosa es una extensión de la lógica clásica que permite modelar problemas complejos, mal definidos o para los cuales no existen modelos matemáticos precisos y es capaz de manejar conocimiento impreciso y modelar situaciones donde existe incertidumbre, ya que su base es el razonamiento aproximado. Los principios de la lógica borrosa se han aplicado con éxito a una amplia gama de problemas en diferentes dominios en los que la incertidumbre y la ambigüedad surgen de diferentes maneras. El modelado borroso [10], el control borroso [11] y la clasificación borrosa [12] son algunas de las aplicaciones más comunes, pero esta técnica también se ha utilizado en el campo de la ingeniería y la construcción [13] y [14].

El sistema borroso utilizado en este trabajo es un *Sistema Borroso Basado en Reglas*. Estos sistemas están compuestos por reglas con antecedentes y consecuentes, del tipo "si-entonces", que recogen el conocimiento experto del problema, modelando las interacciones entre las variables de entrada que dan lugar a los estados posibles de las variables de salida [15]. Las variables de

entrada y salida están representadas matemáticamente por conjuntos borrosos [9], y la inferencia también se implementa con lógica borrosa.

La información recogida sobre los morteros en los ensayos experimentales realizados, se utiliza para definir las variables y ajustar las reglas del sistema borroso propuesto y finalmente, el sistema propuesto se validará comparando su salida con los valores reales obtenidos en nuevos ensayos realizados en el laboratorio, cuando se introducen en el sistema las entradas que representan la composición cemento-arena del mortero fabricado en estos ensayos.

Aunque existan algunas publicaciones anteriores sobre el comportamiento de elementos constructivos [13] y sobre el comportamiento de materiales [16], los autores del presente trabajo no han encontrado ninguno que específicamente aplique un sistema de cálculo basado en reglas borrosas sobre el comportamiento de los morteros, y cuya base de conocimiento y de reglas se haya elaborado con datos experimentales de laboratorio. Lo más común en otros trabajos de cálculo con sistemas borrosos es que los parámetros del sistema se elaboren con el asesoramiento profesional de uno o varios expertos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El objetivo de este trabajo es el diseño de un sistema borroso que modele el comportamiento de los morteros de cemento y arena fabricados en obra en la Comunidad Canaria. Para ello, se han desarrollado experimentos en el laboratorio, y se han utilizado los resultados encontrados en el ajuste del sistema borroso. En esta sección se ofrece una descripción de los ensayos llevados a cabo, y una breve explicación de la teoría básica de la lógica borrosa aplicada en el sistema propuesto.

2.1. ENSAYOS DE MORTEROS

Los materiales empleados en la elaboración de los morteros en los ensayos realizados en este trabajo son:

- Cemento, puzolánico CEM IV (P) 32,5 N. La utilización de este cemento en el ámbito de la Comunidad Canaria, es de uso reconocido en el sector de la edificación para la confección de morteros y hormigones. El empleo de este cemento en la confección de los morteros para este trabajo, intenta reproducir el mortero utilizado en la práctica real del sector de la construcción en Canarias.
- Arena comercial procedentes de extracción local. El análisis petrográfico realizado (UNE-EN 12407:2001), clasifica a la misma como una arena de basaltos y traquibasaltos. El objetivo final del presente trabajo es diseñar un sistema de cálculo para la fabricación real de morteros. Por lo que en todos los ensayos desarrollados se ha utilizado arena de extracción local.
- Agua potable. El agua utilizada en este trabajo, no presenta valores de rechazo para su uso como agua de amasado y curado.

La proporción de agua utilizada atiende al resultado de unos ensayos de laboratorio previos a los presentados en este artículo. En estos ensayos previos se fabricaron varios morteros con diferentes proporciones de cemento-agua. En base al ensayo de consistencia del mortero fresco, se determinó la cantidad de agua óptima.

Se han fabricado tres dosificaciones diferentes: Dosificación 1 (1:5:1,25), Dosificación 2 (1:4:1,25) y Dosificación 3 (1:3:1,25).

Estas dosificaciones han sido sometidas a ensayos normalizados relevantes, que ayudan a determinar el comportamiento del mismo. Para cada dosificación se han realizado los ensayos correspondientes a cuatro tiempos de curado diferentes (0, 1, 3, y 7 días).

Los ensayos realizados en este trabajo para análisis del comportamiento del mortero son:

1. Consistencia (UNE-EN 1015-3).
2. Resistencias mecánicas del mortero (UNE-EN 1015-11)
3. Adherencia (UNE-EN 1015-12).

Estos ensayos han sido adaptados para los morteros utilizados en este trabajo, con el objetivo de obtener datos representativos de la realidad de fabricación en obra de los mismos.

2.2. LA LÓGICA BORROSA

2.2.1. La teoría de conjuntos borrosos y las reglas borrosas

En el razonamiento humano se describen objetos o situaciones en términos imprecisos: grande, joven, frío, etc.

El razonamiento basado en estos términos no puede ser exacto, ya que normalmente representan impresiones subjetivas, quizá probables pero no exactas. Por ello, la Teoría de Conjuntos Borrosos se presenta más adecuada que la lógica clásica para representar el conocimiento humano, ya que permite que los fenómenos y observaciones tengan más de dos estados lógicos. Esta teoría no es probabilista, sino que su base son las llamadas funciones de pertenencia de los elementos, que gradúan la pertenencia o no entre ellos.

En un conjunto clásico se asigna el valor 0 o 1 a cada elemento para indicar la pertenencia o no a dicho conjunto. Pero en la lógica borrosa un elemento puede pertenecer a varios conjuntos a la vez, con distintos grados de pertenencia. La *función de pertenencia* μ_A que define a un *conjunto borroso* A, asigna un valor de pertenencia entre 0 y 1 del objeto x al conjunto borroso A.

El primer paso para modelar un sistema con lógica borrosa consiste en definir las variables del sistema como *variables lingüísticas*. Las variables lingüísticas son variables cuyos posibles valores se representan mediante *términos lingüísticos*, y cada término lingüístico tiene asociado un conjunto borroso. Por ejemplo, supongamos que la temperatura es una variable del sistema que queremos modelar. La "temperatura" será una variable lingüística, y sus posibles valores vienen definidos por etiquetas lingüísticas: muy fría, fría, media, etc. Cada etiqueta representa un conjunto borroso, tal y como se muestra en la Figura 1. Se puede observar que estos conjuntos borrosos tienen capacidad para expresar y trabajar con observaciones y medidas de incertidumbre y proporcionan una transición gradual entre estados.

Una regla borrosa del tipo "si-entonces", tiene la siguiente forma: "Si x es A entonces y es B", donde A y B son etiquetas lingüísticas de sendas variables lingüísticas. El término "x es A" se denomina *antecedente*, mientras que el término "y es B" se denomina *consecuente*. Un ejemplo podrá ser: "Si la temperatura es alta, entonces hace calor".

2.2.2. El razonamiento aproximado

El razonamiento borroso, también conocido como razonamiento aproximado, es un procedimiento de inferencia que deriva conclusiones desde un conjunto de reglas borrosas si-entonces, y hechos conocidos. La regla de inferencia clásica es el *Modus Ponens*, que permite inferir la verdad de la proposición B ("hace calor"), a partir de la verdad de la proposición A ("la temperatura

es alta”) y de la implicación $A \rightarrow B$ (“si la temperatura es alta, entonces hace calor”):

Premisa 1 (Regla): si x es A entonces y es B
 Premisa 2 (Hecho): si x es A
 Consecuencia (conclusión): y es B (1)

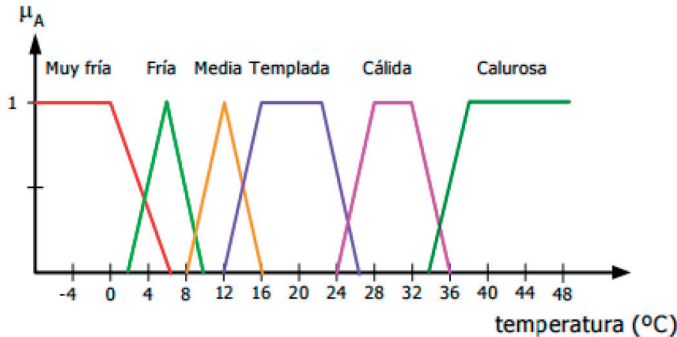


Fig. (1): Definición de la variable lingüística “temperatura” y sus etiquetas lingüísticas (muy fría, fría, media, templada, cálida y calurosa), expresadas como conjuntos borrosos diferentes (forma triangular y trapezoidal)

Sin embargo, en muchos razonamientos humanos, el *modus ponens* se utiliza de una forma aproximada. Por ejemplo, si para la misma regla de implicación $A \rightarrow B$ (“si la temperatura es alta, entonces hace calor”) se sabe que “la temperatura es más o menos alta” (x es A'), entonces podemos inferir que “hace más o menos calor” (y es B'), que se podría esquematizar de la siguiente manera:

Premisa 1 (Regla): si x es A entonces y es B
 Premisa 2 (Hecho): si x es A'
 Consecuencia (conclusión): y es B' (2)

donde A' es “más o menos” A , y B' es “más o menos” B . Este tipo de razonamiento es el razonamiento borroso, siendo A , B , A' y B' conjuntos borrosos del universo del discurso correspondientes. A esta regla de inferencia también se le conoce como *Modus Ponens Generalizado* (GMP). Por lo tanto, el razonamiento borroso nos permite obtener conclusiones a partir de reglas borrosas de tipo si-entonces y de hechos conocidos.

En este trabajo la inferencia borrosa se lleva a cabo tal y como se explica gráficamente en la Figura 2. Para cada regla del sistema borroso, se analiza cada antecedente y se calcula la intersección entre los conjuntos borrosos del antecedente de la regla y del hecho, esto es: $\mu_A(x) \cup \mu_{A'}(x)$, $\mu_B(x) \cup \mu_{B'}(x)$... Se elige el valor mínimo, y este valor se usa para activar la parte proporcional del conjunto borroso que representa al consecuente. Este tipo de inferencia es la inferencia Mamdani [17], [18]. Una vez que se han obtenido las partes activadas de los consecuentes de cada regla, se calcula la salida del sistema como la unión de todas estas partes activadas (conjunto borroso C' final en la Figura 2).

El conjunto obtenido C' es un conjunto borroso que se convierte posteriormente en un valor numérico por medio del proceso de desborrosificación. El objetivo de este proceso es extraer el valor numérico que mejor represente el conjunto borroso resultante. En este trabajo se ha utilizado el centroide del área del conjunto borroso de salida.

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Se exponen los resultados experimentales obtenidos, según las dosificaciones y ensayos realizados en el laboratorio. En la Tabla

1 se presentan el valor de escurrimiento en milímetros del ensayo de consistencia de cada lote de amasada de cada una de las tres dosificaciones realizadas en este trabajo, así como los valores de las resistencias mecánicas según la edad de curado a la que ha sido sometido cada dosificación.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de adherencia y tipo, de las dosificaciones realizadas y según las diferentes edades de curado.

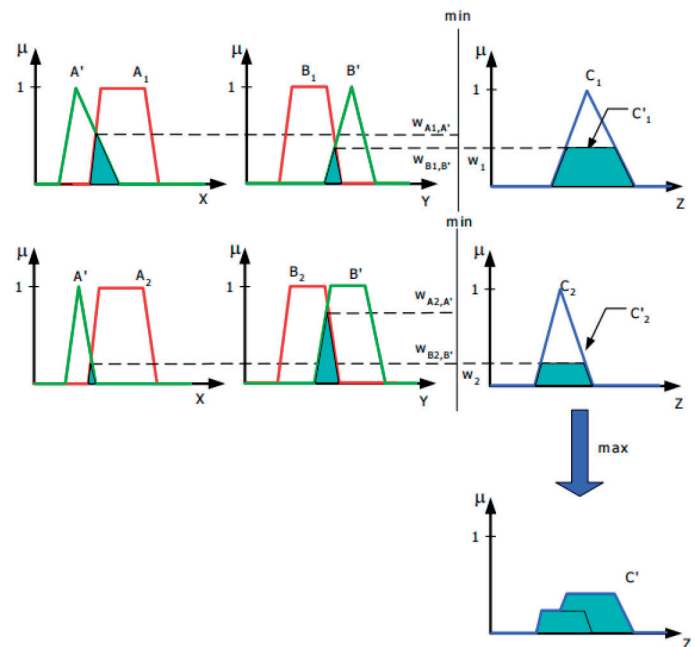


Fig. (2): Interpretación gráfica del Modus Ponens Generalizado en un sistema con dos reglas, cada una con múltiples antecedentes, utilizando el implicador borroso de Mamdani (mínimo) y el operador composicional max-min

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y COMPORTAMIENTO DEL MORTERO

Para identificar los factores que influyen en el comportamiento de los morteros se han estudiado los valores de escurrimiento, la resistencia mecánica y la adherencia.

Los valores de **escurrimiento** de los morteros dosificados en este trabajo, se encuentran entre valores mínimo y máximo de escurrimiento de 159,47 mm y 182,07 mm respectivamente. Se distinguen dos grupos en función de los valores obtenidos. Un primer grupo de valores corresponde a la dosificación de menor cantidad de cemento, es decir la dosificación 1, cuyos valores de

Dosificación	Escurrecimiento (mm)	Ensayo de resistencias mecánicas	
		Curado (Días)	Media Compresión (N/mm ²)
1	159,47	0	11,37
		1	12,18
		3	12,45
		7	14,37
2	182,07	0	11,92
		1	12,53
		3	14,27
		7	15,47
3	177,50	0	18,55
		1	23,13
		3	24,33
		7	26,70

Tabla 1: Resultados de Escurrecimiento y Resistencias Mecánicas

escurrimiento no superan 167,02 mm. Y un segundo grupo de valores que se corresponden con las dosificaciones 2 y 3 realizadas, y cuyos valores se encuentran dentro de un mínimo de 166,65 mm y un máximo de 182,07 mm.

El comportamiento de los dos grupos distinguidos, atiende a las relaciones de cemento/arena, de las tres dosificaciones. En las dosificaciones de relación cemento:arena 1:5, los valores de escurrimientos son inferiores, resultando consistencias de carácter más

Los valores representativos de resistencia a compresión, se pueden dividir en tres rangos de comportamiento. "Rango 1", cuyos valores de resistencia se corresponden con los morteros de dosificación 1 y 2, comprendidos entre 11 y 13 N/mm² aproximadamente. "Rango 2", cuyos valores de resistencias se corresponden con los morteros de dosificación 1, 2 y 3, comprendidos entre 13 y 19 N/mm² aproximadamente. Y por último, "Rango 3" cuyos valores se corresponden con los morteros de dosificación 2 y 3,

Dosificación	Curado (Días)	Adherencia (N/mm ² x 10 ⁻²)	Adherencia (N/mm ² x 10 ⁻²)	Dosificación	Curado (Días)	Adherencia (N/mm ² x 10 ⁻²)	Adherencia (N/mm ² x 10 ⁻²)	Dosificación	Curado (Días)	Adherencia (N/mm ² x 10 ⁻²)	Adherencia (N/mm ² x 10 ⁻²)
1	0	0,0483	B	2	0	0,0024	A	3	0	0,0624	B
		0,038	A			0,0515	B			0,0385	A
		0,0354	A			0,0736	B			0,0574	B
		0,0447	A			0,0213	A			0,0711	B
	1	0,0344	B		1	0,055	B		1	0,093	B
		0,0407	B			0,0461	A			0,0299	A
		0,0234	B			0,0451	B			0,0855	B
		0,0445	B			0,0404	B			0,0771	B
	3	0,0328	A		3	0,0343	A		3	0,0576	A
		0,05	B			0,0289	A			0,0437	A
		0,0453	B			0,0513	C			0,0511	A
		0,0407	B			0,0355	C			0,039	A
	7	0,078	A		7	0,0601	A		7	0,0708	A
		0,0768	A			0,058	B			0,0787	A
		0,0999	C			0,0648	B			0,0843	A
		0,0707	A			0,0524	B			0,0539	A

Tabla 2: Resultados de adherencia y tipo

seca, identificada como "Consistencia 1", y en las dosificaciones de relación cemento:arena, 1:4 y 1:3 los valores de escurrimiento se encuentran en el mismo rango de valores, resultando una consistencia menos seca que la anterior, identificada como "Consistencia 2".

Los resultados de **resistencias mecánicas** a compresión obtenidas, muestran un doble comportamiento del mortero. Por un lado, la evolución de los valores, en cuanto a la cantidad de cemento de cada dosificación realizada, y por otro lado, en cuanto al curado de las mismas realizado. La cantidad de cemento en cada dosificación, es proporcional al incremento del valor de las resistencias obtenidas, y el curado del mortero también incrementa el valor de dichas resistencias aunque no en una proporción directa según sea la cantidad de cemento presente en el mortero. Así es por ejemplo, las resistencias de los morteros de dosificación 1:5 de cemento y arena obtenidos, en los morteros sometidos a un curado de tres días, resulta 12,45 N/mm². En las de dosificación 1:4 de cemento y arena, y para el mismo periodo de curado, resulta 14,27 N/mm². Y en las de dosificación 1:3 de cemento y arena, y para el mismo periodo, resulta 24,33 N/mm². Este incremento según la cantidad de cemento de la dosificación se mantiene en todos según los morteros analizados.

El periodo de curado, muestra una ganancia de las resistencias del mortero que depende de la cantidad de cemento de la dosificación. Las ganancias de las resistencias no son las mismas en cada dosificación. Los morteros dosificados tienen una ganancia en las resistencias aproximadas del 26% al 43% en aquellas probetas sometidas a un curado, con respecto de las que no.

comprendidos entre 19 y 27 N/mm² aproximadamente.

El comportamiento de los morteros en el ensayo de adherencia, es variable y depende de los periodos de curado a los que ha estado sometida cada dosificación. En la dosificación 1, los valores adoptan dos grupos diferenciados, unos valores altos para las probetas con edades de curado a siete días, identificados como de adherencia "Alta", con valores comprendidos en el intervalo 0,0733-0,0998 x 10⁻² N/mm² y otros valores bajos para las otras edades de curado, identificados como de adherencia "Baja" con valores comprendidos en el intervalo 0,0325-0,0478 x 10⁻² N/mm². En la dosificación 2 los valores de adherencia, se encuentran prácticamente por debajo del grupo identificado como adherencia "Alta", cubriendo un rango de valores por debajo incluso, de los identificados como los de adherencia "Baja". Los valores que se encuentran entre el grupo de valores de adherencia "Alto" y "Bajo", se han identificado como valores de adherencia "Medio". En la dosificación 3, los valores de adherencia que se han obtenido, se encuentran en los tres grupos descritos y que son variables según el curado realizado.

5. DISEÑO DEL SISTEMA BORROSO BASADO EN REGLAS (SBBR)

El diseño general de un SBBR incluye:

1. Identificar las variables del sistema que se quiere modelar. Definir esas variables como variables lingüísticas y asignarles las etiquetas lingüísticas que sean necesarias. Como estas etiquetas se representan con conjuntos borrosos, es

necesario definir la forma y situación de estos conjuntos borrosos en el universo de discurso.

2. Construir la base de reglas: relacionar las variables de entrada y salida mediante reglas si-entonces.
3. Construir el sistema de inferencia borroso.

En muchos sistemas borrosos estas etapas se realizan conjuntamente con un experto del dominio. Definir las variables, las etiquetas, cómo deben ser los conjuntos borrosos, su forma, etc... no es una tarea trivial. En este trabajo, el conocimiento necesario para elegir adecuadamente las variables y las etiquetas, y ajustar bien la base de reglas, se extrae de los datos obtenidos empíricamente con los ensayos de morteros realizados en el laboratorio.

Por lo tanto, para llevar a cabo la etapa 1, una vez seleccionadas las variables relevantes que determinan el comportamiento del mortero, se definen estas variables como variables lingüísticas, y se les asignan las etiquetas lingüísticas que representan el problema a modelar. En nuestro caso, las variables lingüísticas de entrada son *Escurecimiento*, *Resistencia* y *Adherencia*, y la de salida es *Dosificación*. Las etiquetas asignadas a cada variable se muestran en la Tabla 3. Por ejemplo, para la variable *escurecimiento*, son "seco" y "bueno"; para la variable *resistencia* son "baja", "media" y "alta", etc. Con respecto a la variable de salida, *dosificación*, la etiqueta "Dosificación 1" se corresponde a la relación Cemento/arena/agua: 1/5/1,25, la "Dosificación 2" es la relación Cemento/arena/agua: 1/4/1,25, y la "Dosificación 3" la relación Cemento/arena/agua: 1/3/1,25.

Una vez identificadas las variables y sus etiquetas, es necesario asignar conjuntos borrosos. Se han elegido funciones de per-

tenencia gaussianas para todos los conjuntos borrosos porque la forma suave de esta función, permite representar mejor la transición gradual entre etiquetas. Los rangos donde se deben colocar las funciones de pertenencia de cada etiqueta se extraen de los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. El universo de discurso de cada variable de entrada se ha normalizado al rango [0,1]. Un ejemplo de esta asignación se puede ver de forma sencilla, en las etiquetas de Resistencia mecánica a compresión. El universo de discurso es el rango de valores de las resistencias mecánicas a compresión obtenidas, desde 11,37 N/mm² hasta 26,70 N/mm². Siguiendo la segunda parte de la Tabla 3, asignaremos el primer tramo de resistencias, correspondientes a Resistencia "Baja", un valor de 1.16 N/mm², resultando un 7,5% sobre el universo de discurso total, redondeando a un rango de 0-0,10. Para el segundo tramo de Resistencia "Media", un valor de 6,02 N/mm², resultando el 39,26 %, redondeando a un rango de 0,10-0,50. Por último, al tramo de Resistencia "Alta", un valor de 8,15 N/mm², resultando un 53,16% del universo de discurso, redondeando aun rango restante de 0,50-1,00.

La base de reglas del diseño del SBBR (etapa 2) se ha elaborado en función de los datos experimentales obtenidos de laboratorio que reflejan el comportamiento de los morteros analizados. Para este trabajo se han diseñado 10 reglas, como se muestra en la Tabla 4. La primera regla se interpreta así: Si "Escurecimiento" es "seco", "Resistencia" es "baja" y "Adherencia" es "Pobre" ENTONCES "Dosificación" es "Dosificación 1". Las demás reglas se interpretan de modo similar.

Por último, en la etapa 3 se selecciona un sistema de inferencia borroso. En nuestro caso ha sido el de Mamdani [18], explicado

Relación entre los valores de los ensayos y la variables lingüísticas							
Entradas							Salida
Escurecimiento (mm)		Resistencia Mecánica a Compresión (N/mm ²)			Adherencia (N/mm ²)		Dosificación
Seco	Bueno	Baja	Media	Alta	Pobre	Normal	
159-167		11,37			0,0351-0,0478		
159-167		12,18			0.0341-0.0443		
159-167		12,45			0.0325-0.0499		
159-167			14,37			0.0702-0.0733	0.0733-0.0998
	167-182	11,92				0.0500-0.0733	
	167-182	12,53			0.0402-0.0500	0.0500-0.0550	
	167-182		14,27		0.0285-0.0500		
	167-182		15,47			0.0519-0.0646	
	167-182		18,55		0.0381-0.0500	0.0500-0.0707	
	167-182			23,13			0.0763-0.0926
	167-182			24,33	0.0387-0.0500	0.0500-0.0575	
	167-182			26,70		0.0534-0.0733	0.0733-0.0998
Distribución final de los conjuntos borrosos							
Entradas							
Escurecimiento (mm)		Resistencia Mecánica a Compresión (N/mm ²)			Adherencia (N/mm ²)		
Seco	Bueno	Baja	Media	Alta	Pobre	Normal	Extra
0,00-0,35	0,35-1,00	0,00-0,10	0,10-0,50	0,50-1,00	0,00-0,31	0,31-0,62	0,62-1,00
Salida							
Dosificación 1		Dosificación 2		Dosificación 3			
0,00-0,35		0,35-0,50		0,50-1,00			

Tabla 3: Valores experimentales asignados a cada conjunto borroso y particiones obtenidas del universo de discurso normalizado

en el apartado 2.2.2. La herramienta utilizada para el diseño y construcción del sistema ha sido la librería de Lógica Borrosa de Matlab [19].

6. EVALUACIÓN DEL SISTEMA

En una primera fase de evaluación se han introducido varias entradas al SBBR diseñado que coinciden con los valores utilizados en los ensayos de laboratorio utilizados en el ajuste del sistema borroso, de manera que se pueda comprobar el ajuste correcto del sistema.

Prueba 1: Se ha confeccionado un mortero de dosificación 1:3:1,25, sometido a un curado de 7 días. El valor de escurrimiento obtenido resulta por encima de 177,5 mm, las resistencias mecánicas a compresión a los 28 días, del orden de 26-27 N/mm², y la adherencia media de los valores obtenidos es de 0,0719 N/mm². Según la categorización de la Tabla 3, el mortero confeccionado en esta prueba se corresponde con una "Dosificación 3".

Para proceder a la validación, se transforman los valores reales en valores de entrada del sistema borroso propuesto. Los valores de entrada transformados a etiquetas lingüísticas de entrada se

corresponden a Escurrimiento "Bueno": Rango (0,35-1,00); Resistencia "Alta": Rango (0,50-1,00); Adherencia "Normal": Rango (0,31-0,62). Introduciendo estas entradas en el sistema borroso, la salida obtenida es 0,304. Como se puede observar en la figura 3 y en la Tabla 5, el valor de salida se encuentra dentro del rango propuesto para la etiqueta "Dosificación 3", y la regla más activada es la número 8.

Prueba 2: Se ha confeccionado un mortero de dosificación 1:5:1,25, curado de 3 días. El valor de escurrimiento obtenido, resulta 159,47 mm, las resistencias mecánicas a compresión a los 28 días, del orden de 12,45 N/mm², y adherencia 0,0453 N/mm². Según la categorización de la Tabla 3, el mortero confeccionado en esta prueba se corresponde con una "Dosificación 1".

De igual manera que en la prueba anterior, se transforman los valores reales en valores de entrada del sistema borroso. Los valores de entrada transformados a etiquetas lingüísticas de entrada se corresponden a Escurrimiento "Seco": Rango (0,00-0,35); Resistencia "Baja": Rango (0,00-0,10); Adherencia "Pobre": Rango (0,00-0,31). Introduciendo estas entradas en el sistema borroso, la salida obtenida es 0,304. Como se puede observar en la Tabla 3, este valor se encuentra dentro del rango propuesto para la etiqueta "Dosificación 1" tal y como se muestra en la Tabla 5.

Se puede observar en esta primera fase de la validación, que en función de las entradas realizadas, las salidas del sistema en estas dos pruebas coinciden con los resultados encontrados en el laboratorio, y por lo tanto concluir que el SBBR está bien diseñado.

En la siguiente fase de evaluación del sistema, el objetivo es validar el sistema diseñado con nuevas dosificaciones, para comprobar si dicho sistema es de aplicación general. En las pruebas realizadas en esta fase, no se realizó el ensayo a adherencia, estimando valores esperados para su validación, como se muestra en la Tabla 5.

Id	Escurrimiento	Resistencia	Adherencia	Dosificación
1	Seco	Baja	Pobre	Dosificación 1
2	Bueno	Alta	Extra	Dosificación 3
3	Bueno	Media	Pobre	Dosificación 2 y 3
4	Seco	Media	Extra	Dosificación 1
5	Bueno	Media	Normal	Dosificación 2 y 3
6	Bueno	Baja	Normal	Dosificación 2
7	-	Baja	Pobre	Dosificación 1 y 2
8	Bueno	-	Extras	Dosificación 3
9	Seco	-	Normal	Dosificación 1
10	Bueno	Baja	Pobre	Dosificación 2

Tabla 4: Base de reglas

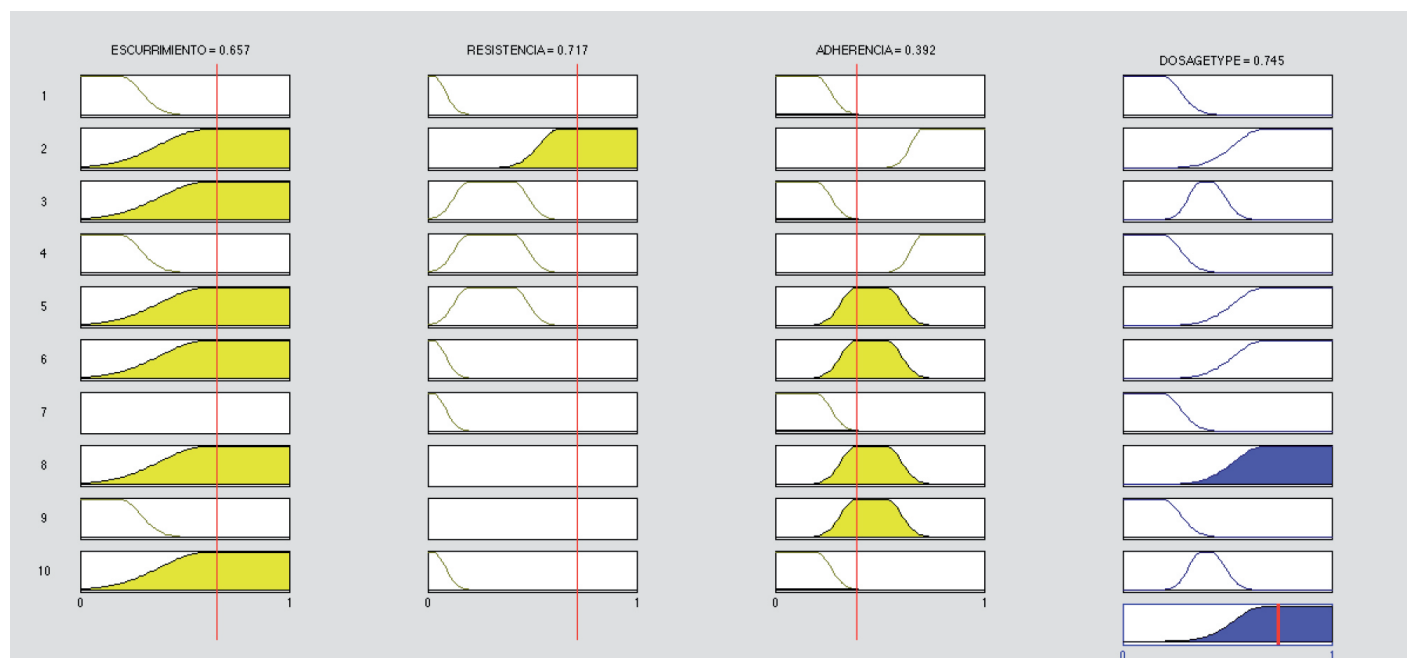


Fig. (3): Resultado de la evaluación del SBBR propuesto en la prueba 1

Prueba 3: Se ha dosificado un mortero de cemento y arena, 1:5:1,25, sometido a curado a 0 días. Se han obtenido unas resistencias mecánicas a compresión, a los 28 días de 9,04 N/mm². Los valores de escurrimiento por debajo de 159 mm. Según la categorización de la Tabla 3, se corresponde con una "Dosificación 1".

Como entradas al sistema borroso, en este caso se consideran valores de Escurrimiento "Seco" y Resistencia "Baja". El valor de salida obtenido es 0,24, valor que se encuentra dentro del rango propuesto para la etiqueta "Dosificación 1" (Tabla 5).

Prueba 4: Se ha dosificado un mortero de cemento y arena, 1:5:1,25, sometido a curado a 7 días. Se han obtenido unas resistencias mecánicas a compresión, a los 28 días de 17,88 N/mm². Los valores de escurrimiento por debajo de 159 mm. Según la categorización de los morteros expuesta en la Tabla 3, el mortero confeccionado en esta prueba se corresponde con una "Dosificación 1".

Como entradas al sistema se consideran los valores de entrada transformados de Escurrimiento "Seco" y Resistencia "Media". La salida obtenida es 0,26, que se encuentra dentro del rango propuesto para la etiqueta "Dosificación 1" (Tabla 5).

Prueba 5: Se ha dosificado un mortero de cemento y arena, 1:3:1, sometido a 0 días de curado. Se ha obtenido unas resistencias mecánicas a compresión, a los 28 días de 16,72 N/mm². Los valores de escurrimiento están por encima de 167 mm. Según la categorización de la Tabla 3, se corresponde con una "Dosificación 3".

Como entradas al sistema se consideran los valores de entrada transformados de Escurrimiento "Bueno", Resistencia "Media". Introduciendo estas entradas en el sistema borroso, la salida obtenida es 0,744, valor que se encuentra dentro del rango propuesto para la etiqueta "Dosificación 3" (Tabla 5).

Prueba 6: Se ha dosificado un mortero de cemento y arena, 1:3:1, sometido a 28 días de curado. Se han obtenido unas resistencias mecánicas a compresión, a los 28 días de 32,67 N/mm². Los valores de escurrimiento están por encima de 167 mm. Según la Tabla 3, se corresponde con una "Dosificación 3".

Como entradas al sistema se consideran los valores de entrada transformados de Escurrimiento "Bueno" y resistencia "Alta" para la segunda. La salida obtenida es 0,732, valor correspondiente a la etiqueta "Dosificación 3" (Tabla 5).

Se puede observar en esta segunda fase de la validación, que con las nuevas pruebas realizadas, las salidas del sistema coinciden con los resultados encontrados en el laboratorio, y por lo tanto, concluir que el sistema funciona correctamente ante situaciones diferentes a las contempladas en su diseño.

7. CONCLUSIONES

Se presenta un estudio sobre el comportamiento de los morteros, identificando de los factores más influyentes que lo determinan. Por un lado la dosificación y por otro lado la edad de curado de los morteros. Estos factores influyen en las características de los morteros de forma relevante, modificando su capacidad de empleo en el periodo de trabajo, las resistencias mecánicas a compresión y los valores de adherencia. El estudio de la relación entre las variables que definen el comportamiento de los morteros, permite modelar el problema y deducir la composición del mortero en un entorno real.

El sistema de lógica borrosa propuesto, modela la compleja relación entre las variables de entrada (caracterizado físicamente por el comportamiento de los morteros: escurrimiento, resistencia mecánica y adherencia) y las variables de salida (dosificación del mortero). El sistema borroso diseñado permite al usuario saber de antemano la composición del mortero requerido con ciertas características, antes de su fabricación. Se aporta una herramienta al profesional del sector interesante, que ayuda a la preparación de los morteros elaborados en obra conociendo la dosificación deseada, sin necesidad de realizar pruebas preliminares desechables.

Se propone un Sistema Borroso Basado en Reglas (SBBR). El sistema es apropiado para modelar el problema, debido principalmente a tres aspectos:

1. Los parámetros de trabajo se pueden representar por conjuntos borroso. La naturaleza borrosa del sistema que se plantea, permite manejar la diversificación de las variables de entrada que influyen en el comportamiento de los morteros.
2. Las cantidades utilizadas en la elaboración de los morteros y la calidad de los morteros resultantes dependen en gran medida de interpretaciones humanas. El SBBR permite trabajar con definiciones y evaluaciones "aproximadas", cercanas a las empleadas en el razonamiento humano.
3. La información disponible, obtenida a través de ensayos de laboratorio, permite ajustar las reglas de un modo eficiente.

Fase	ID Prueba	E. Lingüística Rango	ESCURRIMIENTO	RESISTENCIA	ADHERENCIA	Rango de salida	DOSIFICACIÓN ASIGNADA
1	1	E. Lingüística Rango	BUENA 0,657	ALTA 0,717	NORMAL 0,392	0,745	3
1	2	E. Lingüística Rango	SECA 0,12	BAJA 0,072	POBRE 0,281	0,304	1
2	3	E. Lingüística Rango	SECA 0,274	BAJA 0,052	-- 0,214	0,240	1
2	4	E. Lingüística Rango	SECA 0,150	MEDIA 0,332	-- 0,395	0,264	1
2	5	E. Lingüística Rango	BUENA 0,563	MEDIA 0,351	-- 0,395	0,744	3
2	6	E. Lingüística Rango	BUENA 0,476	ALTA 0,678	-- 0,510	0,732	3

Tabla 5: Resultados numéricos de las pruebas de validación del sistema

El sistema SBBR ha sido validado comparando las salidas calculadas del sistema con datos reales de nuevos ensayos de laboratorio realizados. El sistema ha demostrado que es capaz de dar como salida de dosificación de mortero en situaciones no consideradas durante el proceso de diseño.

En futuros trabajos de investigación se desarrollarán nuevos ensayos con dosificaciones de morteros diferentes, para determinar otros factores de comportamiento que permitan mejorar el sistema borroso propuesto. Asimismo, se planea implementar una interfaz cómoda para la gestión del sistema borroso, como por ejemplo una aplicación móvil, que facilite el uso del sistema a los profesionales del sector.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CSIC para la Dirección General de Arquitectura, "CTE Código Técnico de la Edificación". [En línea]. Disponible en Web: < <http://www.codigotecnico.org/> > [último acceso 03/04/2017].
- [2] Asociación Española de Normalización y Certificación, "AENOR". [En línea]. Disponible en Web: < <http://www.aenor.es> > [último acceso 03/04/2017].
- [3] Gaspar-Tebar D, Sagrera-Moreno JL. "Durabilidad del hormigón frente al agua de mar. Estudio de 2 cementos portland.", INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN, 1977. Vol. 30-291, p. 49-74. ISSN 1988-3234 [último acceso 10 abril 2017] DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1977.v30.i291.2661>
- [4] González-Díaz E, Sánchez-Luis P, Gutiérrez-García FJ. "Guía de buenas prácticas: Fabricación y validación de un equipo para la medida de la resistividad eléctrica en el hormigón. Aplicación en el control del curado", DYNA, vol. 89-4, p. 422-430. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7070>
- [5] Fernandez-Luco L, "Importancia del curado en la calidad del hormigón de recubrimiento. Parte II: métodos experimentales para identificar o prevenir el curado deficiente", CEMENTO-HORMIGON, 2009. Vol.80-926, p. 30-40. ISSN: 0008-8919
- [6] Martínez-Ramírez S, Puertas-Maroto F, Blanco Varela MT, "Morteros de reparación basados en cal. Ensayos de envejecimiento acelerado", MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, 1995. Vol. 45-238, p. 35-45. ISSN 1988-3226 [último acceso 10 abril 2017] DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.1995.v45.i238.559>
- [7] Carrete J C, "Observaciones de la dosificación de cemento en morteros y hormigones fraguados", INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN, 1965. Vol. 18-173, p. 101-109, ISSN 1988-3234 [último acceso 10 abril 2017] DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1965.v18.i173.4344>
- [8] Valdehita-Rosello MT, "Estudio de la trabajabilidad de algunos morteros de cemento para la albañilería", INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN, 1977. Vol. 29-288, p. 89-98. ISSN 1988-3234 [último acceso 10 abril 2017] DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1977.v29.i288.2689>.
- [9] Zadeh LA, "Fuzzy sets", INFORMATION AND CONTROL, vol. 8-3, p. 338-353. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [10] Pedrycz W. Fuzzy modelling: paradigms and practice. Canada: Kluwer Academic Publishers, 1996. 397p. ISBN: 978-1-4612-8589-2
- [11] Driankov D. Hellendoorn H. Reinfrank M. An introduction to Fuzzy Control. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 307p. ISBN: 978-3-662-11133-8
- [12] Chi Z. Yan H. Pham T. Fuzzy Algorithms: With Applications to Image Processing and Pattern Recognition. USA: Word Scientific Publishing, 1996. 227p. ISBN: 978-981-02-2697-8
- [13] Macías-Bernal JM, Calama-Rodríguez JM, Chávez-de Diego MJ, "Modelo de predicción de la vida útil de la edificación patrimonial a partir de la lógica difusa", INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN, vol. 66-533, e006. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.107>
- [14] Demir F, "A new way of prediction elastic modulus of normal and high strength concrete-fuzzy logic", CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, vol. 35-8, p. 1531-1538. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.01.001>
- [15] Bardossy A Duckstein L. Fuzzy Rule-Based Modeling with Application to Geophysical, Biological and Engineering Systems. USA: CRC Press, 1995. 256p. ISBN: 978-0-8493-7833-1
- [16] Akkurt S, Tayfur G, Can S, "Fuzzy logic model for the prediction of cement compressive strength", CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, vol. 34-8, p. 1429-1433. DOI:10.1016/j.cemconres.2004.01.020
- [17] Jang J, Sun C, Mizutani E, Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. 1997. New York: Prentice Hall, 1997. 640p. ISBN: 0-13-0261066-3
- [18] Mamdani E, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, vol. 121-12, p. 1585-1588. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/piee.1974.0328>
- [19] Matlab, "The MathWorks, Inc". [En línea]. Disponible en Web: <http://www.mathworks.com> [último acceso 03/04/2017]