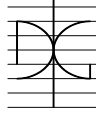



NUEVOS CONGLOMERANTES BASADOS EN CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ

Por:
V́ctor Manuel Ĺpez Toledo

Julio 2013

Autor / Author: V́CTOR MANUEL ĹPEZ TOLEDO		Fecha / Date: JULIO 2013	
T́tulo / Title NUEVOS CONGLOMERANTES BASADOS EN CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ			
Directores del trabajo / Supervisores: MARÍA VICTORIA BORRACHERO ROSADO JOSÉ MARÍA MONZÓ BALBUENA		Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages: 56
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad / University: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA			UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
Palabras clave / Keywords: Cal, yeso, ceniza de cáscara de arroz, cemento, azúcar			
Código Unesco: 3305.05 3305.06			

RESUMEN

En los pactos de 1966 y Derechos Humanos de la "Tercera Generación" se ha proclamado el derecho a una vivienda. En la actualidad existen países en vías que desarrollo donde gran parte de la población no tiene vivienda o el "refugio" donde habita no dispone de las suficientes garantías de estabilidad y durabilidad. Por otra parte en la mayoría de estas naciones el acceso a conglomerantes como el cemento es muy difícil y el precio que tiene hace prohibitivo su uso.

En este trabajo se han estudiado mezclas de diferentes conglomerantes con el fin de reducir la cantidad de cemento e incluso eliminarlo; siendo sustituido por otros como la cal, el yeso o sus mezcla con la ceniza de cáscara de arroz. Son materiales de muy fácil producción por la población con escasos recursos; que además lleva aparejado un menor coste medioambiental con respecto al uso exclusivo de cemento. Dichas mezclas si cumplen con los requisitos necesarios, podrían ser usados en vez de cemento en la fabricación de morteros, elementos prefabricados sin armadura, estabilización de muros y terrenos, etc..

En este estudio se ha observado que la mezcla de cal/yeso /ceniza de cascara de arroz provoca que los tiempos de manipulación de la mezcla sean cortos, por la gran demanda de agua; por ello se utilizó el azúcar como retardante. Dicha sustancia ha demostrado tener excelentes propiedades, retrasando el principio de fraguado, aportando gran trabajabilidad y todo ello sin afectar de manera importante a las reacciones puzolánicas de la cal con la ceniza de cáscara de arroz. Adicionalmente este aditivo, cumple con las premisas del trabajo, al ser un material de bajo coste económico y medioambiental; asó como fácilmente disponible en contextos de subdesarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores María Victoria Borrachero Rosado y José María Monzó Balbuena por su interés, participación y ayuda en la realización de este trabajo. Este agradecimiento es extensible a Jorge Juan Payá Bernabeu y Mercedes Bonilla Salvador que también participo de forma intensiva en este trabajo.

A todo el profesorado que a lo largo de mi docencia desde la más temprana edad me han formado en los más diversos campos del conocimiento.

A Elías, Jesús, Rafa, Lourdes y Noelia por brindarme su apoyo desinteresado, conocimientos, ayuda cuando me ha sido necesaria y su amistad; y muy en especial a Marian por su inestimable ayuda, dedicación, comprensión, forma de ser y estar siempre a mi lado.

A todas aquellas personas que me brindan una amistad sincera cada día y los tengo cerca sin llamarlos.

A toda mi familia, y en especial a mis padres, hermana y cuñado que siempre han estado presentes en mis mejores momentos y en los más difíciles ayudando siempre.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	ASPECTOS HISTÓRICOS DE LOS CONGLOMERANTES.....	5
1.2	ANTECEDENTES.....	7
2.	OBJETIVOS.....	11
3.	MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODO.....	12
3.1	MATERIALES.....	12
3.2	EQUIPOS.....	15
3.3	MÉTODOS.....	20
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
4.1	RESULTADOS.....	23
4.1.1	ESTUDIOS PREVIOS.....	23
4.2	RESULTADOS DE TRABAJABILIDAD.....	24
4.3	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	26
4.3.1	Morteros con base cemento/yeso/ceniza de cáscara de arroz.....	26
4.3.2	Morteros cal/yeso/ceniza de cáscara de arroz.....	28
4.3.3	Influencia de la relación agua/conglomerante.....	30
4.3.4	Influencia de la dosificación Cal/Y/CCA.....	32
4.3.5	Comparativas conjuntas.....	35
4.4	EFEECTO DEL AZÚCAR.....	37
4.5	ESTUDIOS MICROESTRUCTURALES EN PASTAS: TERMOGRAVIMETRÍA.....	42
4.6	ESTUDIOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA (SEM).....	46
4.7	ESTUDIOS DE MICROSCOPIA ÓPTICA.....	51
5.	CONCLUSIONES.....	53
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	55

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ASPECTOS HISTÓRICOS DE LOS CONGLOMERANTES

Hace miles el hombre pasa de ser nómada a sedentario debiéndose preocupar por la búsqueda de refugios sensiblemente estables. En dicho momento comienza a usar materiales aglomerantes; siendo muy difícil saber con exactitud el comienzo de utilización de esta técnica; no obstante se han encontrado vestigios de la utilización de mampuestos y morteros de arcillas alrededor de los años 5600 A.C. en las riberas del río Danubio en Yugoslavia para chozas en un pueblo de la edad de piedra.

Igualmente saber el comienzo del uso de los conglomerantes resulta muy difícil, pero se ha datado hacia el año 2650 A.C. que en las pirámides de GIZET (Cheops, Chefrén y Micerinos), las piezas fueron pegadas con un mortero de yeso calcinado (de baja calidad) y arena.

Posteriormente hacia el año 500 A.C los griegos usaron mezclas de caliza calcinada, agua y arena, para su empleo como morteros y enfoscados en ladrillos no cocidos; pudiendo reconocerse probablemente como el primer hormigón de la historia. Posteriormente la civilización romana realizó obras con este tipo de mortero/hormigón antes del año 300 A.C.

Este tipo de morteros tenía una escasa durabilidad por lo que muchos estudios presuponen la realización de multitud de pruebas empíricas hasta que se descubrió que la adición de ciertas arenas y rocas volcánicas alargaban la durabilidad de los morteros/hormigones, dando una mayor resistencia y siendo el comienzo de los cementos puzolánicos donde se producían las combinaciones químicas de la sílice amorfa con la cal ante ciertas condiciones ambientales. Se sabe que las faldas del Vesubio eran explotadas para la fabricación de un cemento puzolánico.

Se puede decir que en la antigüedad fue la civilización romana la que descubrió todo el potencial de estos materiales como lo demuestra el Panteón de Roma manteniendo el record de ser la mayor construcción de hormigón no armado del mundo.

Con la caída del imperio romano se pierde el uso del hormigón en la construcción de edificios, llegando casi a desaparecer en la edad media y el renacimiento, apreciándose su uso de forma casi esporádica las mezclas de cal y cenizas volcánicas.

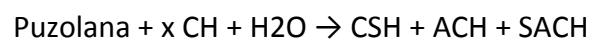
Fue en el siglo XVIII cuando se reconstruyó un faro en el acantilado de Edystone en la costa Cornwall (Inglaterra) por John Smeaton mediante el empleo de piedra unida con un mortero de cal capaz de soportar fuertes vientos y oleaje.

Posteriormente se realizaron numerosos estudios para conseguir conglomerantes hidráulicos hasta la culminación/desarrollo de los cementos actuales.

En 1824 Joseph Aspdin realizó una mezcla de arcilla y caliza que calcinó a elevada temperatura considerándose el origen del cemento actual y cuya fórmula fue mejorada por Isaac Johnson en 1845 mediante la elevación de la temperatura.

Finalmente hacia 1900 cuando Vicat y Le Chatelier lograron producir cemento de calidad uniforme, que pudiera ser usado en la industria de la construcción (1).

Queda por tanto patente que los orígenes del cemento actual pasaron por conglomerantes de actividad puzolánica; entendiéndose por una puzolana una materia esencialmente silicoaluminosa que finamente dividida generalmente no tiene ninguna propiedad conglomerante, pero posee constituyentes (sílice - alúmina) capaces a la temperatura ordinaria, de fijar hidróxido de cal en presencia de humedad para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas.



Hoy en día el uso de las puzolanas en el cemento es algo muy extendido, tanto por las aportaciones tecnológicas que conlleva (aumento de resistencias, aumento de la durabilidad, disminución de la permeabilidad, disminución del calor de hidratación, mejora de la resistencia a la abrasión,...), como por el ahorro energético que se estima, que ronda de un 20 a un 50% dependiendo del tipo de cemento y la cantidad de puzolana añadida (2-3). Se dice que en un futuro será muy raro el empleo de cementos o la fabricación de hormigones sin la adición de materiales puzolánicos. (4).

Las puzolanas que se usan hoy en día son muy diversas dividiéndose en dos tipos:

- Puzolanas naturales
 - Rocas volcánicas, compuestas por un vidrio amorfo producido por enfriamiento brusco de la lava. Como es el caso de las cenizas volcánicas, las tobas,...
 - Rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos como por ejemplo las tierras de diatomeas, arcillas calcinadas por vía natural a partir de un flujo de lava,...
- Puzolanas artificiales
 - Cenizas volantes generadas en la combustión de carbón mineral, principalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
 - Arcillas activadas o calcinadas artificialmente.

- Escorias de fundición procedentes principalmente de la fundición de acero en altos hornos.
- Cenizas de residuos agrícolas como por ejemplo ceniza de cascarilla de arroz, ceniza del bagazo y la paja de la caña de azúcar. Los cuales deben ser quemados a una temperatura controlada para obtener un residuo mineral rico en sílice y alúmina.

Generalmente los materiales puzolánicos presentan un alto contenido de sílice (SiO_2) y/o alúmina (Al_2O_3) en estado vítreo, caracterizado por tanto por su baja cristalinidad.

En el caso de las puzolanas que provienen de desechos de la agricultura (cenizas de la caña de azúcar y el arroz), es fundamental controlar la temperatura de combustión y el tiempo de residencia del material en el horno; así como la forma de su enfriamiento.

1.2 ANTECEDENTES

El estudio de conglomerantes alternativos de fácil producción, bajo coste y donde se pueda realizar la deslocalización de su producción (caso contrario del cemento) (5), podría ser uno de los factores que mejoraría el crecimiento de la infraestructuras y aumento del nivel de vida en países en vías de desarrollo, permitiendo la construcciones de edificaciones estables, durables y donde se podría hacer partícipes a los integrantes de las comunidades; evitando y/o minimizando el uso del cemento que resulta muy caro en este tipo de poblaciones y facilitando su reconstrucción y obras de mantenimiento.

Poner al alcance de la población este tipo de conglomerantes también podría permitir la prefabricación de elementos (ladrillo, bloques, tejas,...) que además permitirían el crecimiento de industrias locales. En pocas palabras sería un enorme avance el pasar de viviendas mínimas aisladas a viviendas múltiples intentando combinar residencia, producción, ocio, infraestructuras,... (6).

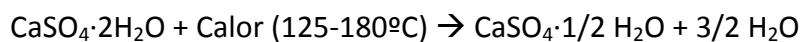
Dentro de esta línea de búsqueda de prefabricados y la minimización del uso de cementos se han realizado otras experiencias como la investigación para la producción de tejas de microcemento en viviendas de interés social (7); estudios para la fabricación de ladrillos ligeros mediante la inclusión de ceniza de cáscara de arroz y poliestireno expandido (8); o los estudios para el empleo de la ceniza de cáscara de arroz en pavimentos de bajo volumen de tránsito (9).

También hay que tener en cuenta, que en construcción aproximadamente un 50% del uso de cemento Portland se utiliza para aplicaciones secundarias tales como rehabilitación y enlucidos donde no se necesitan resistencias elevadas. En este caso los conglomerantes cal/ceniza de cascara de arroz pueden sustituir al cemento Portland en estas aplicaciones. La resistencia de los conglomerantes cal/ceniza de cascarilla depende de la reactividad de la ceniza y de la relación cal/ceniza. Pero algunos autores han determinado que la resistencia de estas mezclas se

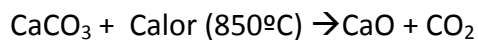
incrementa hasta 28 días pero a mayor edad puede observarse a veces un decrecimiento (10). Este decrecimiento no está totalmente estudiado pero parece atribuirse a un cambio en la morfología y la cristalinidad del gel CSH formado en la reacción puzolánica, a un exceso de sílice cristalina en el producto o a la presencia de inquemados. Es por eso que se han intentado mezclas ternarias, añadiendo otras puzolanas como ceniza volante, metakaolin (11), o catalizador de craqueo catalítico (12).

El presente trabajo considera como base fundamental la mezcla de 3 conglomerantes (cal, yeso y ceniza de cáscara de arroz); aunque inicialmente se introdujeron algunas variantes para el estudio de posibles alternativas. Los motivos de su uso y mezclas han sido:

- 1- El yeso por tener tiempos de principio de fraguado sensiblemente cortos, gran facilidad y economía de producción; ya que a temperaturas comprendidas entre 120-180°C se produce la deshidratación parcial del sulfato cálcico.



- 2- La cal por tener una relativa fácil producción en hornos caseros y aporte de grandes resistencias. Su producción se produce por la descarbonatación de la piedra caliza en temperaturas del orden de 850°C.



- 3- La ceniza de cáscara de arroz (CCA) por ser un compuesto con un elevado contenido de sílice reactiva y muy fácil producción, así como ser una materia prima de fácil adquisición, ya que en muchos países en vías de desarrollo el arroz es un alimento básico.

Este material tiene unas interesantes propiedades al combinarlo con la cal formando un conglomerante puzolánico y de importantes resistencias mecánicas.

Actualmente en el mundo se produce cada año aproximadamente 120 Mt de cáscara de arroz. Teniendo en cuenta que la relación ceniza/cáscara de arroz es del 18%, la producción mundial de CCA podría ser de hasta 21 Mt/año.

De todas formas, hay que tener en cuenta que el origen de la actividad puzolánica de la cascarilla de arroz está precisamente en su composición mineral que, como hemos visto anteriormente, es rica en sílice.

Hay que tener muy en cuenta que el proceso de quemado y posterior enfriamiento influirá de forma determinante en las características de la ceniza obtenida, es decir, las variaciones en las condiciones de incineración van a dar como resultados cenizas totalmente distintas.

Por ejemplo, si la temperatura resulta muy baja no se consumiría por completo la parte orgánica de la cascarilla; si por el contrario, resulta excesiva se corre el riesgo de que la sílice sufra un proceso de cristalización; ambas condiciones supondrían una disminución de la reactividad, pudiendo incluso llegar a convertirla en totalmente inerte. Varias investigaciones precedentes señalan que las condiciones idóneas se presentan con un quemado entre 500 y 700° C. Algunas van más allá indicando los valores exactos de temperatura, tiempo y método de enfriamiento, demostrando que la ceniza con mejores características se obtiene con un quemado a 500 °C durante 12 horas, seguido de un enfriamiento rápido (el enfriamiento puede hacerse dentro del horno, considerado enfriamiento lento, o extrayendo la ceniza inmediatamente al exterior, lo que sería el enfriamiento rápido). Evidentemente, estos valores corresponden al tipo de cascarilla con el que se ensayó. Debido a la gran variedad de cascarillas existentes no resulta adecuado establecer estos resultados como únicos, pero sí nos pueden dar una idea de los márgenes en que deberíamos movernos (13).

Por otro lado no solo el control de la temperatura y el tiempo de combustión es importante, ya que otras experiencias han demostrado que una correcta molienda pueden hacer de este material una puzolana muy reactiva superando incluso al humo de sílice (14). De todas formas, hay que tener en cuenta que el origen de la actividad puzolánica de la cascarilla de arroz está precisamente en su composición mineral que, como hemos visto anteriormente, es rica en sílice.

- 4- Como alternativas a la combinación de conglomerantes anteriores se ha realizado otros ensayos sustituyendo la cal por cemento tipo CEM I 52,5R.

La elección de este tipo de cemento viene condicionada con el fin de evitar interferencias de adiciones puzolánicas (que puedan venir como adiciones), así como intentar estudiar expansiones por la formación de ettringita.

En la actualidad se han realizados numerosos estudios de mezclas de sistemas binarios y ternarios de conglomerantes en la búsqueda de determinadas propiedades o la compatibilidad entre ellos, como por ejemplo mezclas de yeso-cemento-puzolanas donde se ha determinado que la inclusión de puzolanas en las mezclas mejoran notablemente la resistencia a la humedad, a los ciclos hielo deshielo y al agua (15-16-17) o las mezclas de yeso-cemento-humo de sílice donde una inclusión óptima de humo de sílice evita la formación de taumasita y ettringita (18). Igualmente en sistemas binarios de morteros de cal y puzolana se dificulta o anula la formación de taumasita (19).

Igualmente se ha estudiado que la reacción álcali-sílice con mezclas de cementos de distintos tipos (sin adiciones, con filler y puzolánico) y cenizas de cáscara de arroz natural y molida por Batic, O.R., Giaccio, G. y Zerbino, R e Isaia (20) donde se muestran expansiones para ambos tipos de cenizas siendo mucho más acusados para la ceniza natural. En el caso de la ceniza natural, las

expansiones se produjeron en todos los tipos de cementos siendo los cementos puzolánicos los de menor cuantía mientras que los adicionados con filler las expansiones superaron el límite del 0,1%, sin detectarse en ningún caso reacciones álcali-silice. Este estudio también concluyó que la ceniza molida tenía mucho mejor comportamiento desde el punto de vista de las resistencias mecánicas.

Si sabemos que el uso de yeso o la demanda de agua que presenta la ceniza de cáscara de arroz debido a su carácter poroso puede hacer que estas mezclas presenten una difícil manejabilidad en estado fresco. Para ello se ha investigado en este trabajo el uso de distintos aditivos naturales que mejoren dicha manejabilidad, de manera que retarde lo suficiente el fraguado de la mezcla y nos permita no utilizar relaciones agua/conglomerante muy altas. En este sentido, existen distintos trabajos en morteros de cal, donde se usan aditivos para este hecho u otros.

En este caso y debido al empleo de proporciones importantes de yeso los tiempos de manipulación son excesivamente cortos por lo que se estudió el uso de retardadores/plastificantes de bajo coste (ácido cítrico y azúcar) y alta solubilidad (en ambos casos de 1.330g por litro de agua), con el fin de lograr hacer compatibles dichas mezclas con la producción de elementos prefabricados, morteros para la unión de piezas, enfoscados (se ha demostrado la mejora de la adherencia de los morteros cemento con sustituciones del 5% de Clinker por ceniza de cáscara de arroz (21), estabilización de suelos,... para ello no solo se ha considerado lograr unas resistencias mínimas, sino también la búsqueda de una trabajabilidad aceptable, tiempos razonables de manipulación y nulas o bajas expansiones a largo plazo.

Tras las pruebas iniciales se ha optado por el azúcar como elemento de fácil obtención, alargando los tiempos de principio de fraguado y mejorando la trabajabilidad no impidiendo la reacción puzolánica (aunque la ralentiza).

Dentro de esta línea en la búsqueda de retardantes y/o plastificantes destacan estudios con mortero de cal de A. Izaguirre, J. Lanás, J.I. Álvarez (22-23) donde se demuestra que la inclusión de almidón de bajo peso molecular en distintas dosis pueden permitir obtener matrices más coherentes que derivan en una mayor resistencia y durabilidad, mientras que por el contrario los de alto peso molecular producen un espesamiento del mortero fresco derivando en una mayor porosidad. Igualmente el oleato de sodio (24), ha demostrado ser un importante reductor de los huecos atrapados en morteros.

Otros estudios de A. Izaguirre, J. Lanás, J.I. Álvarez (25), han demostrado que el hidroxipropil de metilcelulosa se adsorbe sobre el hidróxido de calcio reduciendo el entrelazamiento de las cadenas y su viscosidad en pro una mayor trabajabilidad; por ello y tras un análisis con sistemas ternarios se decidió sustituir el yeso por filler calizo con el fin de estudiar la afección del azúcar en las reacciones puzolánicas.

2. OBJETIVOS

En este trabajo se han estudiado mezclas ternarias cemento Portland/yeso/ceniza de cáscara de arroz, y cal/yeso/ceniza de cascara de arroz, buscando la compatibilidad de los materiales ; así como la obtención de un conglomerante con resistencias mecánicas adecuadas a corto y medio plazo, y cuya manejabilidad en estado fresco sea adecuada, con vistas a futuras aplicaciones en contextos de subdesarrollo, con un bajo coste económico y medioambiental.

En las mezclas estudiadas se ha empleado siempre una proporción de cal/puzolana 1/1,5 con el fin de lograr la combinación completa de la cal formando silicatos cálcicos hidratados que aporten resistencias mecánicas. Relaciones similares ya han sido estudiadas en otras investigaciones (26) para el uso de la ceniza de cáscara de arroz en construcciones de bajo coste, tratando de reducir el contenido en cal, que es el material con mayor coste económico y medioambiental, frente a la ceniza de cáscara de arroz (que es un material residual).

Para la obtención de un tiempo de fraguado adecuado se ha valorado la utilización de aditivos naturales como ácido cítrico y azúcar.

3. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODO

3.1 MATERIALES

Yeso

El yeso utilizado es de la marca IBERPLAST del tipo B1/5/2 fabricado por PLACO. Se trata de un producto sin aditivos con un coeficiente de conductividad térmica de $\lambda = 0,30 \text{ W/mK}$, factor de resistencia a la difusión del vapor de agua de 6 y un índice de pureza mayor del 75%.

Cal

La cal empleada para el presente estudio es del tipo CL90-S y de la casa comercial Cales Pascual, en su formato de cal apagada (hidróxido cálcico Ca(OH)_2), con un índice de pureza del 90%.

Ceniza de cáscara de arroz (CCA)

La ceniza de cascarilla de arroz empleada ha sido, proporcionada por la empresa Maicerías Españolas DACSA S.A., procedente de un proceso de incineración industrial.

Previa a su utilización ha sido molida, obteniendo un tamaño medio de partícula de $17\mu\text{m}$ para incrementar su reactividad y reducir la demanda de agua.

Observada al microscopio óptico se puede distinguir una mayoría de zonas oscuras salpicada por zonas más blancas que corresponderían a fragmentos de cáscara sin quemar. También se advierte que en la gran mayoría de las partículas se mantiene la estructura física original de la cascarilla.

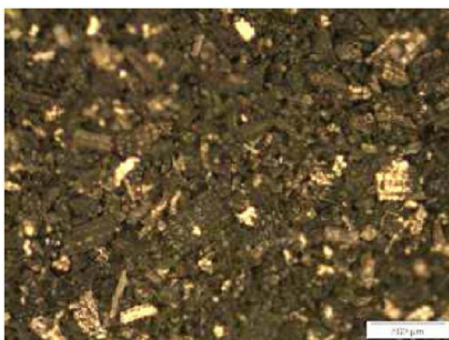


Imagen 3.1- Micrografía óptica ceniza DACSA

Las siguientes imágenes muestran fotografías tomadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) donde puede apreciarse una estructura característica de la CCA, en la que se observan zonas angulosas junto con otras redondeadas. Se constata la existencia de sílice que se mantienen después del proceso de combustión de la cascarilla.

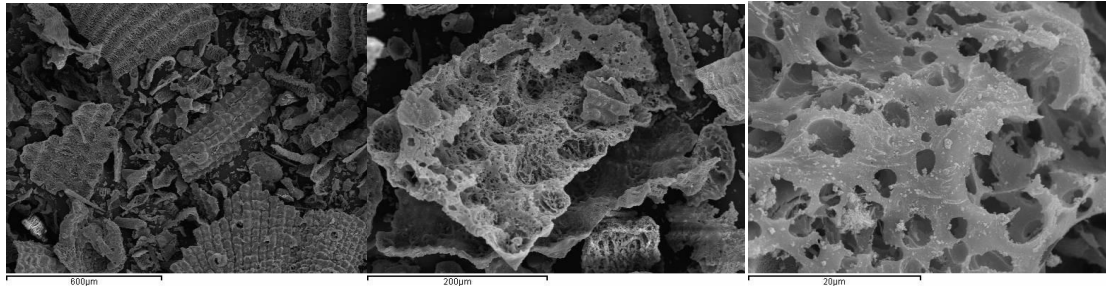
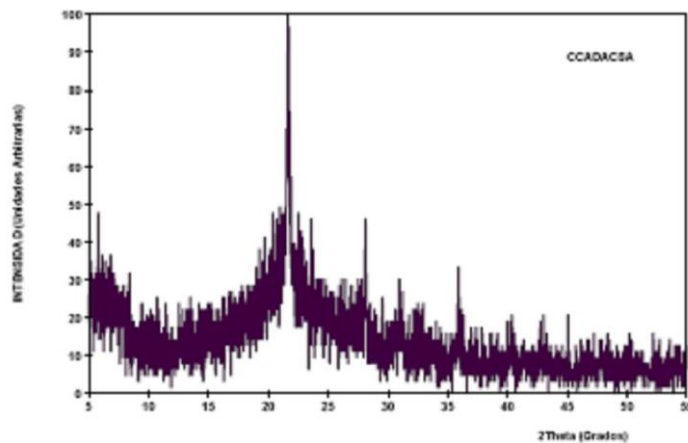


Imagen 3.2 – Microscopía electrónica (SEM) Ceniza de cascarilla de arroz DACSA

Un análisis por energías dispersivas de rayos X demostró que el elemento predominante en esta ceniza es el Si, y presenta porcentajes menores de K, Ca y Na.

Silicio y oxígeno coinciden espacialmente lo que corrobora la presencia de sílice (SiO_2), este hecho se confirma con la difracción de rayos X, cuyos resultados se muestran en la gráfica 3.1. El difractograma pone de manifiesto la presencia de Sílice en forma de Cristobalita mayoritariamente y en menor proporción Tridimita y Cuarzo. La desviación de la línea para valores de 2θ comprendidos entre 15 y 30 da una idea de la predominancia de sílice amorfa.



Gráfica 3.1 - Difractograma ceniza DACSA

Cemento

Se ha utilizado cemento Pórtland gris tipo CEM I-52,5R suministrado por empresa Cemex (Buñol-Valencia).

La composición química en porcentaje de dicho cemento, facilitada por el fabricante es la siguiente:

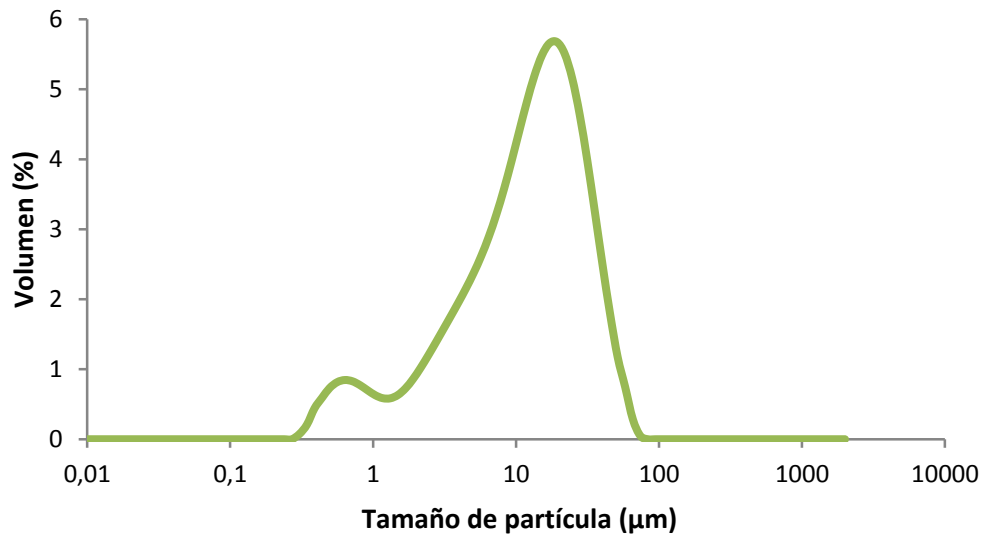
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P.F*	R.I**
19,90	5,38	3,62	63,69	2,14	3,66	1,17	0,10	2,02	0,90

* P.F pérdida al fuego

** R.I residuo insoluble

Tabla 3.1 –Composición de cemento

El diámetro medio de partícula de este cemento es de 16,698 μm y su curva granulométrica es la siguiente:



Gráfica 3.2 -. Curva granulométrica del cemento utilizado

Agua

Para la preparación de pastas y morteros se utilizó el agua suministrada por la red de agua potable de la Universidad Politécnica de Valencia. Con las siguientes características:

Cloruros	93 mg/l
Calcio y Magnesio	480mg/l
Sulfatos	298 mg/l
pH	7,88
Conductividad	939 $\mu\text{S}/\text{cm}$

3.2 EQUIPOS

Amasadora

La amasadora utilizada es de la casa IBERTEST y cumple con la norma UNE- EN 196-1.



Imagen 3.3 – Amasadora Ibertest

Dicha amasadora consta principalmente de un vaso de acero inoxidable que se fija a la base por presión y lo mantiene fijo durante el amasado; una pala con movimiento planetario que produce el amasado o agitación de la pasta y que permite su desmontaje para facilitar su limpieza, una tolva de vertido automático de áridos y un cuerpo principal donde se aloja el motor y el cuadro de control interno.

Moldes

Se utilizaron moldes de acero para la fabricación de probetas de mortero de 4x4x16 cm; pudiendo realizar con cada molde 3 probetas.

El molde es de acero y está compuesto de varias piezas que cumple con la norma y su diseño facilita las labores de desmoldeado de las probetas sin dañarlas.



Imagen 3.4 – Molde para fabricación de probetas de morteros (4x4x16 cm)

Para la compactación se ha utilizado una compactadora modelo CIB 801 de la marca IBERTEST. El funcionamiento está basado en una leva que levanta el conjunto móvil de brazos, mesa y molde y lo deja caer desde una altura de 15mm a una velocidad de 60 rpm.



Imagen 3.5 – Compactadora

Mesa de sacudidas

La medida de la trabajabilidad en morteros se realizó utilizando una mesa de sacudidas, siguiendo el procedimiento expuesto en la norma UNE 83-811-92.

El molde usado es troncocónico de latón. El llenado se realiza en dos fases, mediante una compactación manual de 10 golpes de pisón, realizando 15 golpes por segundo y posteriormente se retira el molde y se mide el diámetro del cono resultante.



Imagen 3.6 – Mesa de sacudidas

Cámara húmeda

Consiste en un habitáculo donde se mantienen unas condiciones de humedad y temperatura constantes (20° C. y 98% humedad relativa).

Análisis termogravimétrico

El equipo utilizado es el TGA 850 Mettler- Toledo, que permite la medida simultánea de la curva termogravimétrica y la curva de análisis térmico-diferencial (DTA); donde se registra la variación de masa a lo largo del tiempo en función del incremento de temperatura en una atmósfera controlada.

La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica.

El equipo cuenta con una electrobalanza horizontal, un horno y sensores de temperatura que están en comunicación con un ordenador, donde se registran y se procesan los datos. La microbalanza tiene una resolución de 0,1 μg .

Para ser analizadas, las muestras se colocaron dentro de crisoles de aluminio de 100 μl con tapa sellable. Dicha tapa cuenta con un micro-orificio, el cual facilita la obtención de una atmósfera autogenerada, por lo que la muestra permanece por un mayor tiempo en equilibrio con su fase gaseosa, dando como resultado una mejor separación de los procesos de pérdida de masa consecutivos, con el consecuente desplazamiento de picos hacia temperaturas superiores.

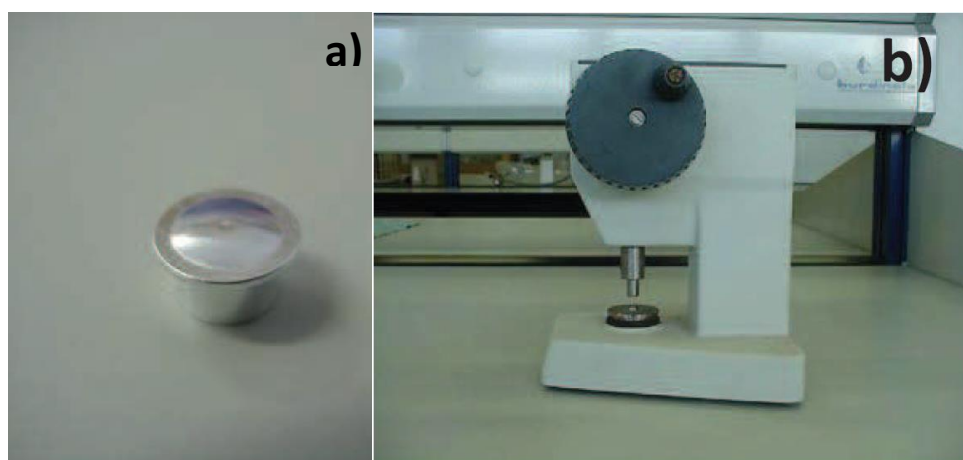


Imagen 3.7 – a) Crisoles de aluminio de 100 μL ; b) Prensa para sellar crisoles de aluminio.

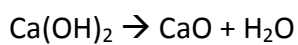
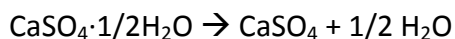
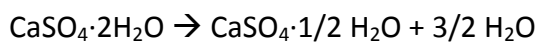
Las condiciones de ensayo aplicadas en este trabajo fueron las mismas, utilizadas por trabajos realizados anteriormente por el grupo de investigación. Para identificar y cuantificar los procesos de deshidratación de los conglomerantes, el ensayo fue realizado en un intervalo de temperatura entre 35°C y 600°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min en atmósfera de nitrógeno (flujo de 75mL/min).

Antes de ser ensayadas, las muestras deben de ser molidas en un mortero de ágata con acetona con el objetivo de detener los procesos de hidratación de la pasta. A continuación se filtra la muestra con la ayuda de una bomba de vacío y se lleva la muestra a estufa durante 30 min a 60°C.

Para finalizar la etapa de preparación de las muestras, se tamiza la muestra en un tamiz de 125 μm y el material pasante es la muestra que se utiliza en el análisis termogravimétrico.

En el estudio de las combinaciones de cemento/puzolana y de cal/puzolana la utilización de esta técnica es muy útil, porque permite observar la pérdida de masa debida a reacciones de deshidratación. Igualmente es muy útil para el estudio de las reacciones de deshidratación de los yesos.

Las reacciones de deshidratación que normalmente se observan son las siguientes:



La cuantificación de los saltos en el termograma permite determinar la variación en la masa de la muestra y por tanto estudiar la composición del material objeto de estudio.

Por otro lado la derivada de la curva TG nos proporciona información sobre la velocidad de pérdida o ganancia de masa con la temperatura o con el tiempo. Esta representación permite identificar con mayor facilidad las variaciones de masa, especialmente cuando las pérdidas son muy pequeñas o bien cuando existen varios procesos con temperaturas de activación muy cercanas.



Imagen 3.8 – Equipo de termogravimetría

Ensayos mecánicos a flexión y compresión

Para la realización de los presentes ensayos se ha utilizado un pórtico de flexión PEF-150-MDA de la marca IBERTEST con capacidad máxima 150 kN, con control electrónico y capaz de cumplir con

las exigencias de la normativa actual para este tipo de ensayos en función del material. Sobre esta máquina se han acoplado las capillas de flexión y compresión para la realización de los diversos ensayos. Las velocidades empleadas han sido de 0,1 kN/s en flexión y 1 kN/s en compresión.



Imagen 3.9 – Equipo para ensayos de flexión y compresión

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En muchos campos de la química, ciencia de materiales, geología y biología, está siendo cada vez más importante el conocimiento detallado de la naturaleza física y de la naturaleza química de las superficies de los sólidos a escala submicrométrica, obteniéndose básicamente con dos técnicas, la microscopía de barrido de electrones (SEM) y el microanálisis con sonda de electrones (EMPA). Los microscopios electrónicos comerciales más modernos están diseñados para llevar a cabo ambos tipos de mediciones.

Para obtener una imagen por microscopía electrónica, la superficie de una muestra sólida es barrida según un modelo raster con un haz de electrones muy fino.

Un raster es un modelo de barrido similar al utilizado en un tubo de rayos catódicos, en el que un haz de electrones barre la superficie en línea recta, vuelve a la posición inicial y es desplazado hacia abajo una distancia establecida.

En este estudio se utilizó un equipo de microscopía electrónica modelo JEOL JSM6300, aplicando a la muestra un voltaje de 20 KV para la obtención de imágenes.



Imagen 3.10 – Equipo de microscopía electrónica

Se realizaron estudios sobre pastas para para tratar de caracterizar los productos de hidratación.

Las muestras deben ser metalizadas para facilitar la conductividad eléctrica de las mismas. El recubrimiento de dichas muestras se realizó con oro, porque se obtienen imágenes más nítidas que con carbono. El recubrimiento con oro se realizó utilizando el equipo BALTEC SCD 005. El tiempo de exposición de la muestra fue de 90 segundos, a una intensidad de 40 mA y una distancia de trabajo de 5mm. La presión a la que se realizó el proceso de recubrimiento fue de $2,4 \cdot 10^{-2}$ mbar. El microanálisis se realizó con un equipo OXFORD INSTRUMENTS modelo Link-Isis. El programa de adquisición de rayos X fue X-Ray analysis y el programa para cuantificar el SEM Quant que utiliza el método ZAF. Finalmente, la adquisición de imágenes se realizó mediante el programa Autobeam.

3.3 MÉTODOS

Amasado

Para el amasado de morteros y pastas se han seguido las normas Normas: EN 196-1(Nov. 2005), ASTM C-305, EN 196-3 (Nov. 2005) y UNE-EN 1015-2/98.

El amasado de morteros para estudios de resistencia mecánica se realizó mediante el procedimiento siguiente:

- Se diluye el azúcar en el agua de amasado antes de colocarlo en el vaso de la amasadora
- Se añade la mezcla de los distintos conglomerantes y se mezcla durante 30 segundos a velocidad lenta
- Posteriormente y sin parar el amasado se añade el árido durante otros 30 segundos
- Tras el vertido del árido continua el amasado otros 30 segundos a velocidad rápida
- Se deja reposar el mezcla durante 90 segundos; tiempo durante el cual se procede al rascado de las paredes del vaso, para la decantación del mortero adherido con deficiente amasado
- Se realiza un amado final durante 60 segundos a velocidad rápida

Posteriormente se realizó el llenado de moldes en la compactadora mediante el llenado en dos fases (mitad del molde en cada fase), con una compactación de 60 golpes en cada fase.

Pasado un tiempo mínimo de 24 horas para poder proceder al desmoldeado, se introdujeron en la cámara húmeda protegidos del contacto directo del agua (tanto de aspersion como de ascension capilar).

Posteriormente se realizaron ensayos a compresión a 7, 28 y 60 días de curado.

Dosificaciones estudiadas

Tras una primera fase de estudios previos de principios de fraguado (cuyos valores aparecen en el apartado de resultados – estudios previos) se decidió fabricar los morteros siguientes para los distintos estudios:

DOSIFICACIONES PARA ESTUDIO DE PRINCIPIO DE FRAGUADO

Relación conglomerantes	A/B	Azúcar
Cal/Y/CCA - 20/50/30	0,6	0,10%
Cal/Y/CCA - 20/50/30	0,6	0,20%
Cal/Y/CCA - 20/50/30	0,5	0,20%
Cal/Y/CCA - 24/40/36	0,6	0,20%
Cal/Y/CCA - 24/40/36	0,6	0,30%

Tabla 3.2 – Dosificaciones para estudios de principio de fraguado

DOSIFICACIONES PARA ESTUDIOS DE RESISTENCIA MECÁNICA

Morteros con base Cemento/Yeso/Ceniza de cáscara de arroz (C/Y/CCA)

Nombre	Relación C/Y/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	Observaciones
Familia 1	20/50/30	0,6	Ácido cítrico 1,50%	
Familia 2	20/50/30	0,6	Ácido cítrico 2,00%	

Morteros con base Cal/Yeso/Ceniza de cáscara de arroz (Cal/Y/CCA)

Nombre	Relación Cal/Y/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	Observaciones
Familia 3	20/50/30	0,6	Sin	
Familia 4	20/50/30	0,6	Azúcar 0,10%	
Familia 5	20/50/30	0,6	Azúcar 0,20%	
Familia 6	20/50/30	0,5	Azúcar 0,20%	Difíciles de compactar
Familia 7	24/40/36	0,6	Azúcar 0,20%	
Familia 8	24/40/36	0,6	Azúcar 0,30%	
Familia 9	28/30/42	0,6	Azúcar 0,20%	
Familia 10	28/30/42	0,6	Azúcar 0,30%	

Morteros con base Cal/filler calizo/Ceniza de cáscara de arroz (Cal/FC/CCA)

Nombre	Relación Cal/FC/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	Observaciones
Familia 11	20/50/30	0,6	Sin	
Familia 12	20/50/30	0,6	Azúcar 0,10%	
Familia 13	20/50/30	0,6	Azúcar 0,20%	
Familia 14	20/50/30	0,6	Azúcar 0,50%	
Familia 15	20/50/30	0,6	Azúcar 1,00%	

Morteros de control Yeso/filler callizo (Y/FC)

Nombre	Relación Y/FC	Relación A/B	Retardante/plastificante	Observaciones
Familia C1	50/50	0,6	Sin	Difíciles de compactar
Familia C2	50/50	0,5	Sin	Difíciles de compactar
Familia C3	40/60	0,6	Sin	Difíciles de compactar
Familia C4	30/70	0,6	Sin	Difíciles de compactar

Tabla 3.3 – Dosificaciones para estudios de resistencia mecánica

DOSIFICACIONES PARA ESTUDIOS DE EXPANSIÓN

Nombre	Relación C/Y/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	Observaciones
Exp 1	20/50/30	0,6	Ácido cítrico 1,00%	

Nombre	Relación Ca/Y/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	Observaciones
Exp 2	20/50/30	0,6	Azúcar 0,20%	

Tabla 3.4 – Dosificaciones para estudios de expansión

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

4.1.1 ESTUDIOS PREVIOS

Con vistas a conocer los tiempos aproximados de manipulación de los morteros y previo a la realización de las dosificaciones estudiadas en morteros, se analizaron una serie de mezclas para conocer su tiempo de principio de fraguado, utilizando el azúcar como retardante. El método utilizado en la medida del inicio de fraguado fue el método del cuchillo, según la norma UNE-EN-13279-2 de medida del tiempo de fraguado de yesos

Los resultados obtenidos han sido:

CEM I 52,5	YESO	CCA
20	50	30
A/B	Azúcar (%)	Tiempo
0,4	0%	ndnd
0,5	0,50%	<3 min
0,5	1,00%	<3 min
0,5	2,00%	5 min
0,6	1,00%	7,5 min
0,6	1,50%	7,5 min
0,6	2,00%	7,5 min
0,6	2,50%	7,5 min
0,6	3,00%	7,5 min
CEM I 52,5	YESO	CCA
20	40	40
A/B	Azúcar (%)	Tiempo
0,6	1,00%	7 min

Tabla 4.1 – Estudios de principio de fraguado con base C/Y/CCAs

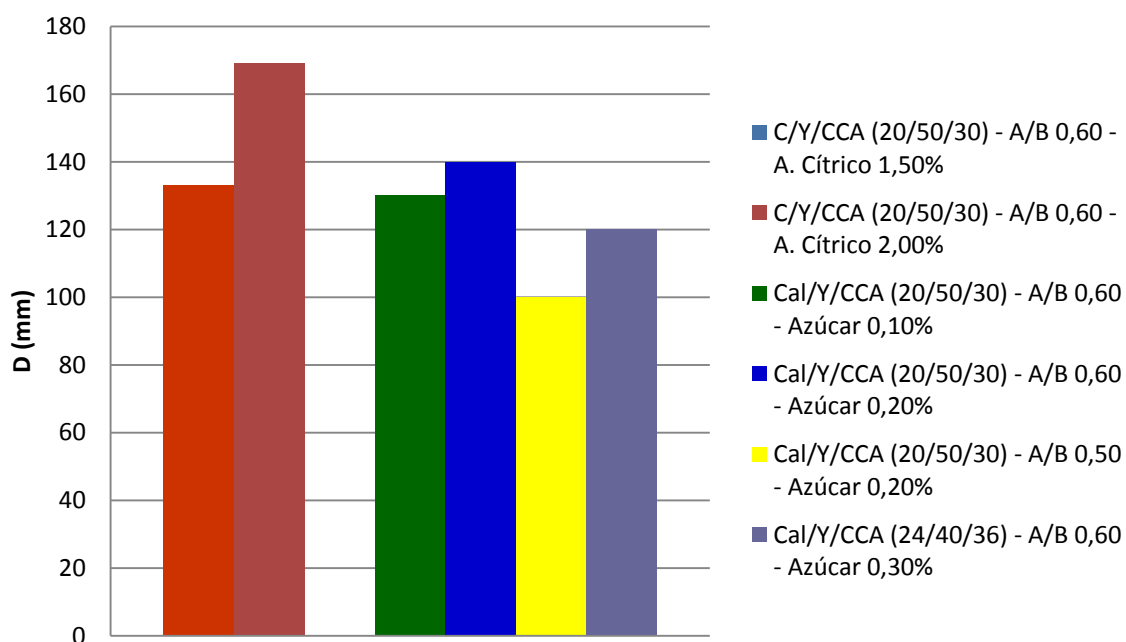
CAL	YESO	CCA
20	50	30
A/B	Azúcar (%)	Tiempo
0,6	0%	9 min
0,6	0,10%	18 min
0,6	0,50%	>2 h
0,6	1,00%	>2 h
CAL	YESO	CCA
20	40	40
A/B	Azúcar (%)	Tiempo
0,6	0%	9,5 min
0,6	0,10%	20 min
CAL	YESO	CCA
10	50	40
A/B	Azúcar (%)	Tiempo
0,6	0,10%	18,5 min

Tabla 4.2 – Estudios de principio de fraguado con base Cal/Y/CCAs

Se observó que en el caso de las mezclas con cemento, el tiempo de inicio de fraguado de las mezclas es muy corto, y además, la presencia de azúcar no tenía influencia en el tiempo de fraguado, ya que como se observa en la tabla 4.2 un aumento del contenido de azúcar en las mezclas no modifica el tiempo de inicio de fraguado.

En el caso de las mezclas con cal, si se observó un aumento importante del tiempo de fraguado al subir levemente la cantidad de azúcar de las mezclas. Por todo ello y una vez consultada la bibliografía se decidió utilizar en la fabricación del resto de especímenes como retardante ácido cítrico en el caso de las mezclas con cemento y azúcar en las mezclas con cal.

4.2 RESULTADOS DE TRABAJABILIDAD



Gráfica 4.1 – Trabajabilidad de diferentes familias de morteros.

En la gráfica 4.1 se ha representado la trabajabilidad medida en la mesa de sacudidas de las distintas mezclas. En ellos podemos observar que se corroboran los resultados obtenidos previamente en la medida de los tiempos de inicio de fraguado de las pastas. En ambos casos se observa un incremento de la trabajabilidad con el incremento de aditivo (ácido cítrico o azúcar).

También lógicamente a igualdad de cantidad de azúcar si disminuye la relación agua/conglomerante la trabajabilidad disminuye de manera importante, haciendo al mortero de cal/Y/CCA prácticamente no realizable (ver gráfica 4.1 y tabla 4.3).

A pesar que en los morteros de cal la relación cal/CCA es la misma, al aumentar la cantidad de CCA (familia 5 frente a familia 8), la trabajabilidad del mortero disminuye debido a que la mayor cantidad de CCA, requiere una mayor demanda de agua.

RESULTADOS DE TRABAJABILIDAD

Nombre	Relación conglomerantes	Relación A/B	Retardante/plastificante	Trabajabilidad
Morteros con C/Y/CCA				
Familia 1	20/50/30	0,6	Ácido cítrico 1,50%	133
Familia 2	20/50/30	0,6	Ácido cítrico 2,00%	169
Morteros con Cal/Y/CCA				
Familia 4	20/50/30	0,6	Azúcar 0,10%	130
Familia 5	20/50/30	0,6	Azúcar 0,20%	140
Familia 6	20/50/30	0,5	Azúcar 0,20%	100
Familia 8	24/40/36	0,6	Azúcar 0,30%	120

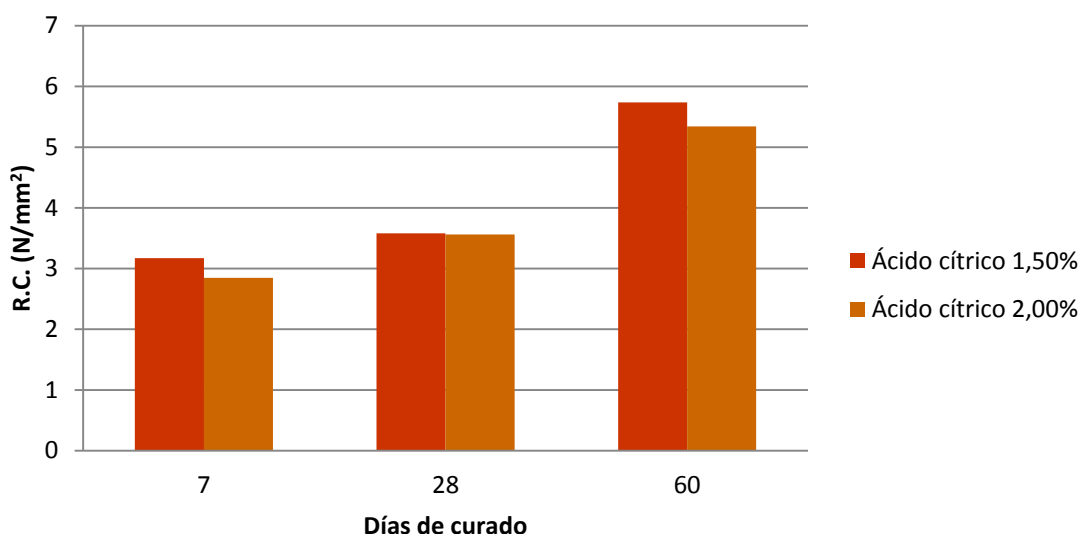
Tabla 4.3 – Resultados de trabajabilidad de morteros

4.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

4.3.1 Morteros con base cemento/yeso/ceniza de cáscara de arroz

En cuanto a morteros con mezcla de cemento (CP), yeso (Y) y ceniza de cáscara de arroz (CCA) se han preparado 2 series de probetas (1 y 2), en ambos casos con una dosificación de 20/50/30 (CP/Y/CCA) y agua/binder de 0,6; variando la cantidad de retardante (ácido cítrico) para comprobar su influencia.

Los resultados obtenidos son:



Familia	C/Y/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	7 días	28 días	60 días
1	20/50/30	0,6	Ácido cítrico 1,50%	3,171 (0,08)	3,581 (0,15)	5,737 (0,80)
2	20/50/30	0,6	Ácido cítrico 2,00%	2,847 (0,11)	3,561 (0,15)	5,341 (0,33)

Gráfica 4.2 – Influencia el ácido cítrico - Resultados de resistencia a compresión y desviación estándar

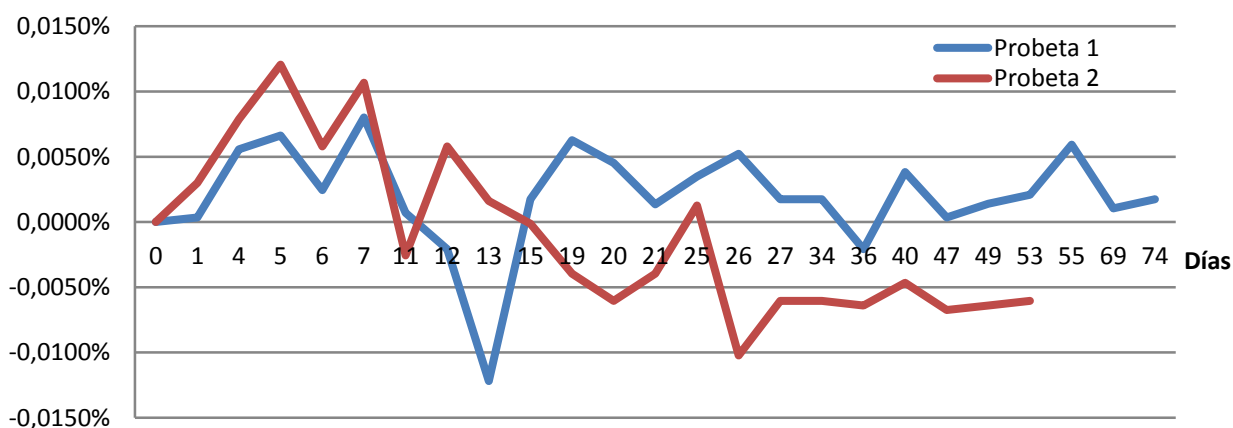
Como podemos observar, los valores de resistencia a compresión de las probetas son muy pequeños, lo que nos hace pensar, que el ácido cítrico retarda el fraguado de la fracción de cemento presente e impide además la reacción puzolánica de la mezcla con la CCA. Además no parece haber una influencia significativa en los valores de resistencia a compresión a medida que aumentamos el porcentaje de ácido cítrico del 1.5 al 2%,

Los valores de resistencia a compresión evolucionan con el tiempo de curado, alcanzándose aproximadamente entre 5-6 N/mm² a 60 días de curado.

También se realizaron medidas de expansión en estos sistemas, fabricando 4 probetas de 25x25x287 mm, en cuyos extremos existe un orificio donde se insertan unos vástagos de teflón donde realizar las mediciones, según la norma UNE 80-113-86 y 80-112-89.

Tras el desmoldeado las probetas han sido envueltas en film de polietileno de forma que se permita su curado y facilite su manipulación. La medición es en base al procedimiento marcado en la norma UNE 80-113, siendo el comienzo de las mediciones (día cero) a los 2 días de su fabricación. Las probetas fabricadas tenían la dosificación 20/50/30 CP/Y/CCA, con relación agua/conglomerante de 0.6 y un 1% de ácido cítrico.

En la gráfica 4.3 se representan los valores de expansión en porcentaje frente al tiempo de curado, para dos probetas diferentes (líneas roja y azul). Los resultados ponen de manifiesto, valores de expansión bajos, lo que sorprende teniendo en cuenta que el conglomerante está formado por un 20% de cemento portland y un 50% de yeso. Este hecho es probablemente debido a dos fenómenos. En primer lugar a la fijación de la portlandita por la ceniza de cáscara de arroz, mediante la reacción puzolánica, reduciendo por tanto la formación de etringita. En segundo lugar hay que tener en cuenta que la ceniza de cáscara de arroz, como se ha indicado en el apartado 3.1, no contiene alúmina reactiva capaz de reaccionar con los sulfatos y la portlandita para formar cantidades adicionales de etringita que implicarían un aumento de la expansión. En otros sistemas similares en los que se ha utilizado ceniza volante (CV) en lugar de CCA (27) si se observan expansiones debido a la presencia de alúmina reactiva en la CV que sí generan etringita.



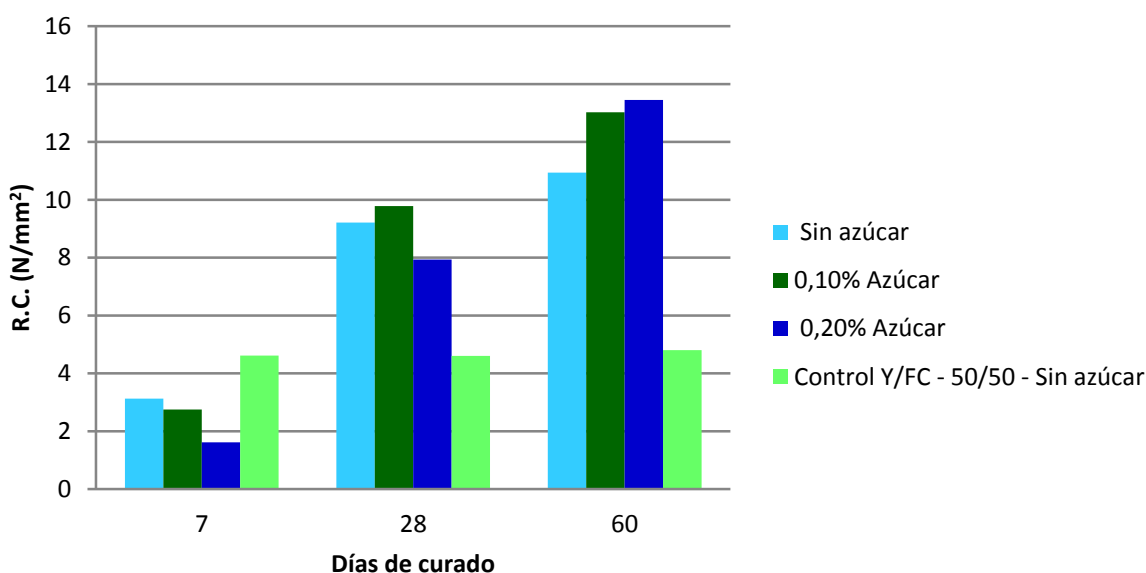
Gráfica 4.3 – Expansiones en morteros C/Y/CCA (20/50/30) – A/B 0,60 – Ácido cítrico 1,00%

A la vista de los resultados obtenidos, se abandonó el estudio de estos sistemas y se optó en este trabajo, por profundizar en el estudio de las mezclas cal/ yeso/ ceniza de cáscara de arroz.

4.3.2 Morteros cal/yeso/ceniza de cáscara de arroz

Se han realizado mezclas con la misma dosificación (20/50/30) pero sustituyendo el cemento por cal apagada (CAL/Y/CCA). La relación agua/conglomerante fué 0,60; y en este caso el retardante utilizado ha sido el azúcar (con cantidades de 0%, 0,10% y 0,20%).

Igualmente para estudiar la influencia del yeso se ha realizado un mortero de control sustituyendo la cal y la ceniza de cáscara de arroz por un inerte (filler calizo). Los resultados obtenidos son:



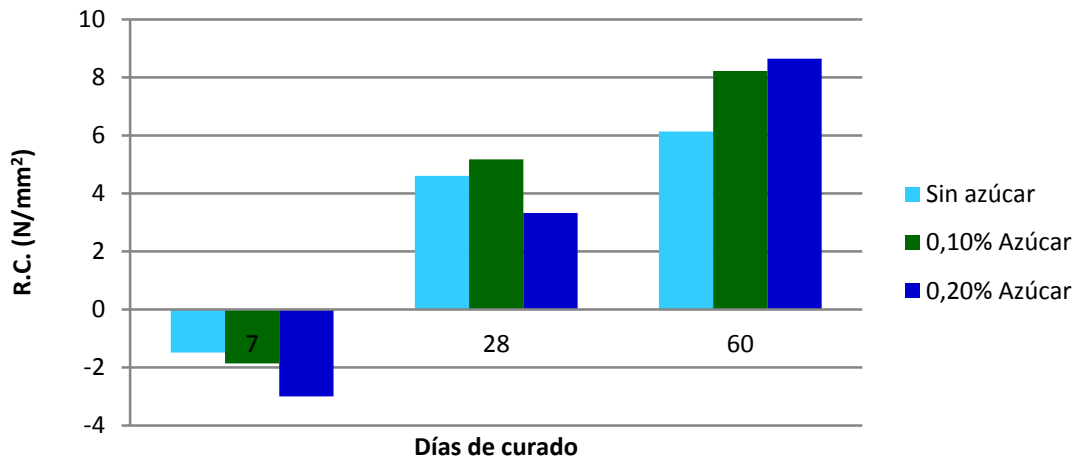
Familia	C/Y/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	7 días	28 días	60 días
3	20/50/30	0,6	Sin	3,127 (0,06)	9,215 (0,11)	10,937 (0,22)
4	20/50/30	0,6	Azúcar 0,10%	2,752 (0,20)	9,782 (0,09)	13,025 (0,52)
5	20/50/30	0,6	Azúcar 0,20%	1,616 (0,07)	7,937 (0,27)	13,449 (0,17)
C1	50/50	0,6	Sin	4,615 (0,22)	4,607 (0,17)	4,802 (0,21)

Gráfica 4.4 – Influencia del azúcar - Resultados de resistencia a compresión y desviación estándar.

En la gráfica podemos observar a 7 días que los valores de resistencia a compresión de las probetas 20/50/30, son menores que el control de yeso/filler, y además dichos valores disminuyen conforme aumenta el contenido de azúcar en las mezclas. Esto puede ser debido sobre todo a que la presencia de azúcar produzca un retraso en el fraguado del yeso, y además en la posible reacción puzolánica entre la cal y la CCA, originando una disminución de resistencia a tiempos cortos de curado.

Sin embargo, al aumentar la edad de curado el control con yeso, permanece lógicamente con la misma resistencia que es la aportada por el yeso, mientras que las probetas con cal y CCA presentan resistencias mayores que el control y detectándose que el contenido en azúcar no parece tener una influencia significativa en dichos valores, pues no disminuye conforme el contenido de azúcar en las mezclas es mayor. A 60 días de curado este efecto es más importante alcanzándose para las probetas 20/50/30 con el 0.2% de azúcar una resistencia que supera los 13 N/mm².

Asumiendo que la resistencia del mortero yeso/filler sería similar a lo largo del tiempo, se ha estudiado la resistencia aportada por la reacción puzolánica mediante la resta de la resistencia a compresión de los distintos morteros y el mortero de control (ver grafica 4.5).

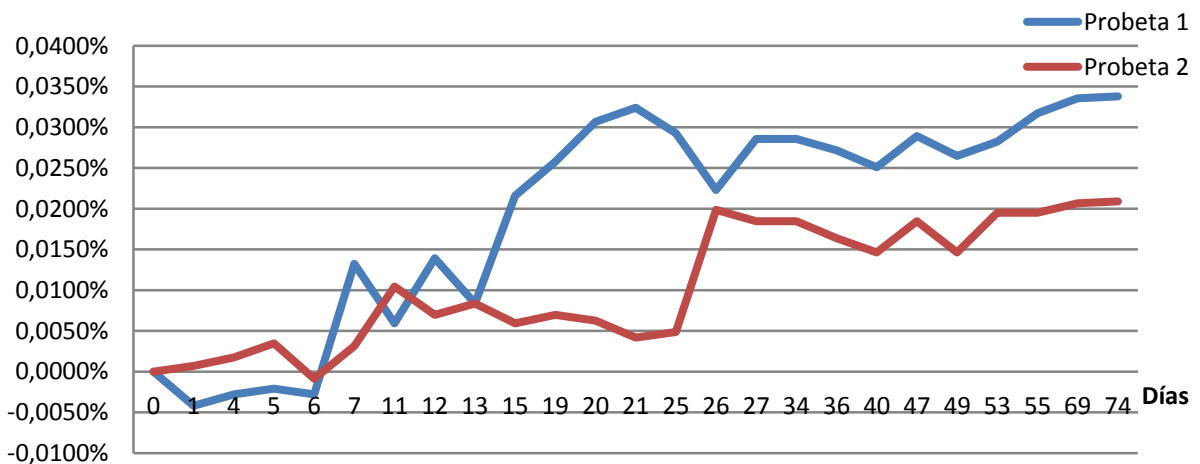


Gráfica 4.5 – Aporte de resistencia a compresión de la reacción puzolánica - Cal/Y/CCA (20/50/30) y relación A/B 0,60

En la gráfica anterior se observa que a tiempos cortos las diferencias entre todos los morteros y el mortero de control (Yeso/filler) son negativas, lo que implica que a tiempos cortos de curado, existe un retardo en la hidratación, no detectándose ningún efecto puzolánico ni efecto partícula por parte de la CCA y de la cal.

A tiempos más largos la contribución de la reacción puzolánica de la CCA con cal, es cada vez importante con el tiempo de curado.

Igualmente se ha estudiado posibles expansiones a largo plazo en los sistemas ternarios de Cal/Y/CCA. En la gráfica 4.6 se muestran los valores de expansión de dos de dichas probetas; observando que como de esperar estos dichos sistemas no presentan expansiones significativas.



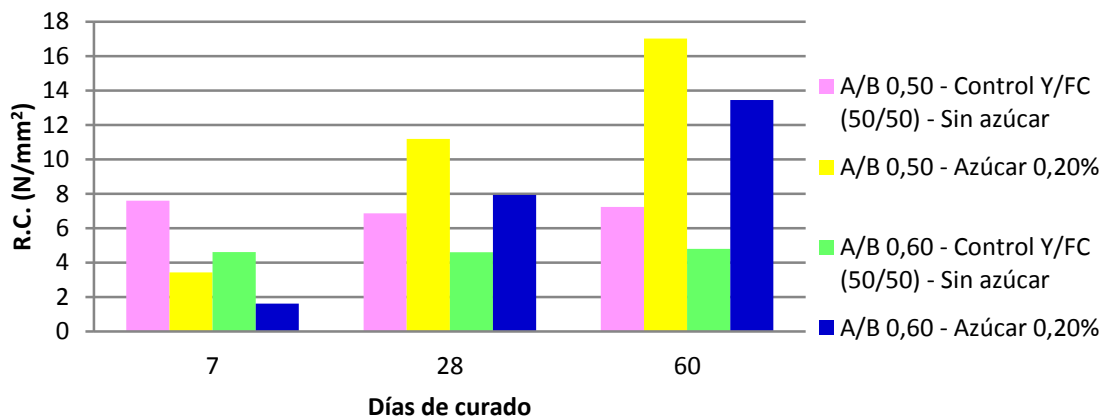
Gráfica 4.6 – Expansiones en morteros Cal/Y/CCA (20/50/30) – A/B 0,60 –Azúcar 0,20%

4.3.3 Influencia de la relación agua/conglomerante.

Se han analizado los resultados de morteros con dosificaciones 25/50/30 (CAL/Y/CCA) y distintas relaciones agua/conglomerante 0,50 y 0,60; manteniendo constante la cantidad de azúcar (0,20%).

Igualmente para estudiar la influencia del yeso se han realizado morteros control sustituyendo la cal y la ceniza de cáscara de arroz por un inerte (filler calizo) en ambos casos también se han variado las relaciones agua/binder 0,50 y 0,60.

Los resultados obtenidos se muestran en el gráfico siguiente:



Familia	C/Y/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	7 días	28 días	60 días
C2	50/50	0,5	Sin	7,599 (0,19)	6,862 (0,18)	7,236 (0,20)
6	20/50/30	0,5	Azúcar 0,20%	3,431 (0,53)	11,184 (0,23)	17,02 (0,38)
C1	50/50	0,6	Sin	4,615 (0,22)	4,607 (0,17)	4,802 (0,21)
5	20/50/30	0,6	Azúcar 0,20%	1,616 (0,07)	7,937 (0,27)	13,449 (0,17)

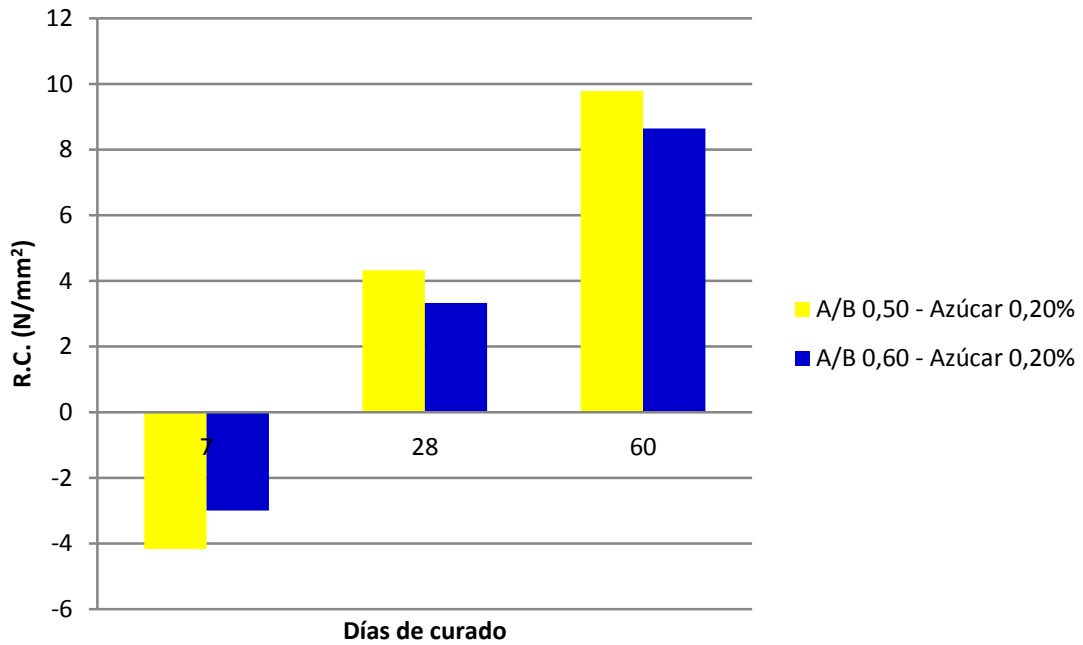
Gráfica 4.7 –Influencia de la relación A/B - Resultados de resistencia a compresión y desviación estándar

En primer lugar se detecta lógicamente una disminución de la resistencia a compresión de los morteros conforme aumenta la cantidad de agua de amasado.

Respecto al comportamiento frente a los morteros control con yeso/filler, se observa el mismo patrón comentado en el apartado anterior ya que a tiempos cortos de curado (7 días) el azúcar actúa como retardante y la resistencia a compresión de las mezclas es menor que la de los morteros de control (yeso/filler). Sin embargo a 28 días, la reacción puzolánica se ve incrementada (ver gráfica 4.8).

La disminución de agua en el mortero produce un aumento notable de la resistencia a compresión en los morteros 20/50/30, superando los 16 N/mm² a 60 días de curado.

Se observa también de manera análoga al caso anterior que los morteros control formados por yeso y filler calizo no modifican su resistencia inicial obtenida a los 7 días de curado y que se mantiene durante todo el periodo medido.



Gráfica 4.8 – Aporte de resistencia de la reacción puzolánica - Cal/Y/CCA (20/50/30) y distintas relaciones A/B

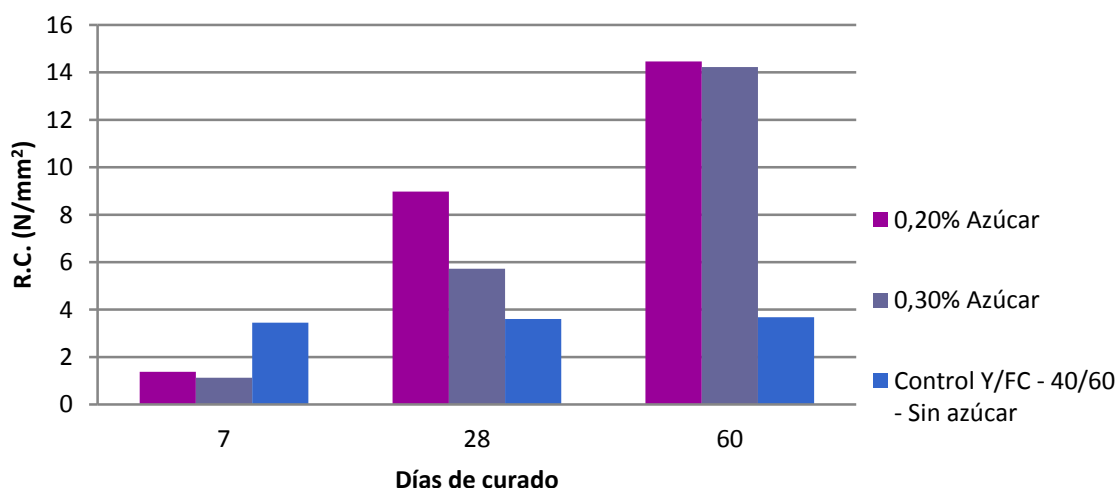
4.3.4 Influencia de la dosificación Cal/Y/CCA

Para estudiar la influencia del contenido en yeso en dichos morteros, se han estudiado las mezclas disminuyendo el contenido de yeso y aumentando los porcentajes de cal y CCA, pero de manera que la relación cal/CCA 1/1,5 se mantuviera constante en la dosificación.

En primer lugar se fabricaron morteros con la dosificación 24/40/36 (CAL/Y/CCA) y relación agua/binder 0,60 variando las cantidades de azúcar (0,20% y 0,30%). Dicha dosificación sin azúcar y con 0.1% de azúcar no se pudieron fabricar, debido a su falta de trabajabilidad que impedía la fabricación de probetas y su compactación.

También y para ver la influencia del yeso se ha realizado un mortero control, sustituyendo la cal y la ceniza de cáscara de arroz por filler calizo.

Los resultados obtenidos son:



Familia	C/Y/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	7 días	28 días	60 días
7	24/40/36	0,6	Azúcar 0,20%	1,377 (0,07)	8,975 (0,32)	14,459 (0,33)
8	24/40/36	0,6	Azúcar 0,30%	1,131 (0,04)	5,723 (0,29)	14,228 (0,51)
C3	40/60	0,6	Sin	3,447 (0,14)	3,604 (0,06)	3,681 (0,16)

Gráfica 4.9 – Influencia de la dosificación - Resultados de resistencia a compresión y desviación estándar

A tiempos muy cortos de curado, se observa el mismo comportamiento anterior. El azúcar retarda el fraguado del yeso y la resistencia a compresión de los morteros es menor que su correspondiente control.

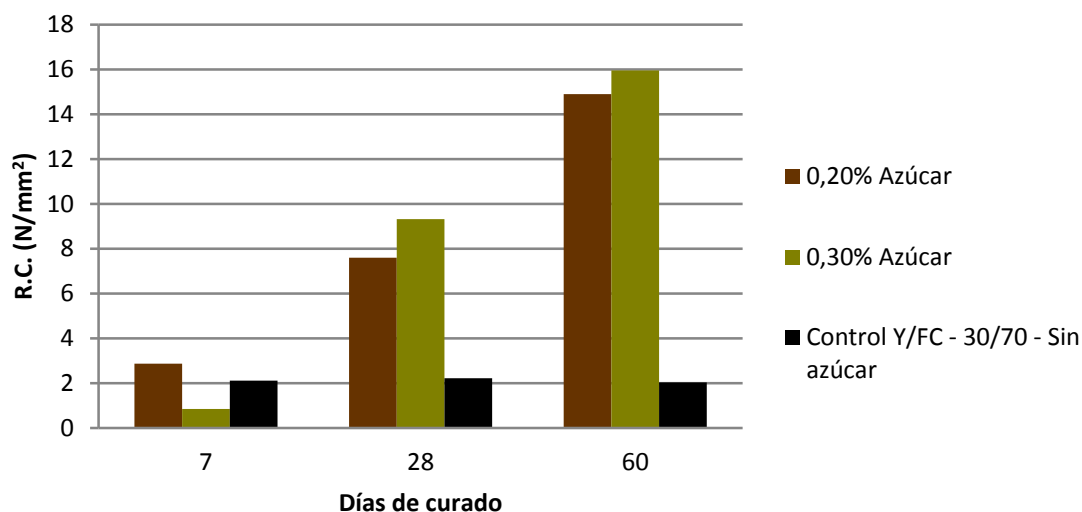
A 28 días de curado, sin embargo las resistencias aumentan, siendo mayores que las del mortero con filler. A su vez se observa una dependencia de dicho valor con el contenido en azúcar, ya que es mayor la del mortero con 0.2% de azúcar.

A 60 días, las resistencias de los morteros son elevadas alcanzándose en ambos casos (con 0.2 y 0.3% de azúcar) los 14 N/mm², por lo que parece que para tiempos largos de curado el azúcar no va a tener influencia.

Por otra parte, posteriormente se volvió a disminuir la cantidad de yeso en el mortero, aumentando la cantidad de cal y CCA de manera que se mantenga la relación cal/CCA anterior. Así se fabricaron morteros con la dosificación 28/30/42 (CAL/Y/CCA) y relación agua/binder 0,60; pero variando las cantidades de azúcar (0,20% y 0,30%).

Igualmente para estudiar la influencia del yeso se han realizado morteros control sustituyendo la cal y la ceniza de cáscara de arroz por un inerte (filler calizo).

Los resultados obtenidos son:



Familia	C/Y/CCA	Relación A/B	Retardante/plastificante	7 días	28 días	60 días
9	28/30/42	0,6	Azúcar 0,20%	2,873 (0,05)	7,598 (0,44)	14,901 (0,30)
10	28/30/42	0,6	Azúcar 0,30%	0,846 (0,05)	9,318 (0,34)	15,957 (0,65)
C4	30/70	0,6	Sin	2,117 (0,14)	2,221 (0,11)	2,033 (0,11)

Gráfica 4.10– Influencia de la dosificación - Resultados de resistencia a compresión y desviación estándar

A la vista de los resultados recogidos en el grafico 4.10 se puede constatar el mismo comportamiento observado en las dos dosificaciones anteriores; a tiempos cortos de curado, los morteros cal/Y/CCA presentan muy bajas resistencias a compresión, menores o similares que el mortero de control, debido a que el azúcar retrasa el fraguado de la mezcla.

A 28 días, se produce el comportamiento contrario, siendo las resistencias de los morteros con puzolana mucho mayores que el mortero yeso/filler, y curiosamente siendo ligeramente mayor, la

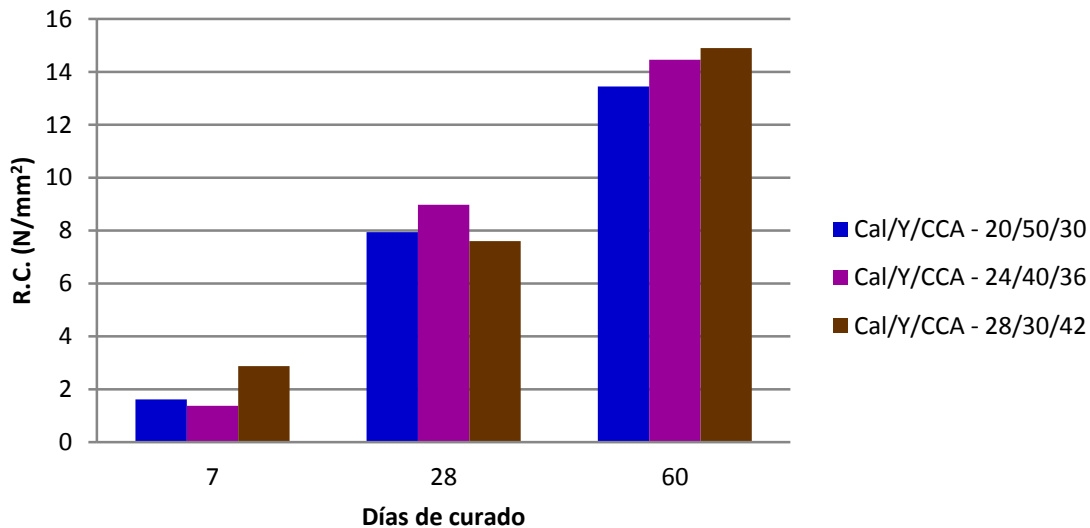
resistencia a compresión, cuanto mayor es el contenido en azúcar, probablemente debido a la mejor compactación del mortero, repitiéndose este hecho a 60 días de curado.

En este caso, la mayor resistencia del mortero con 0.3% de azúcar, podría justificarse, debido a que la CCA absorbe mucha agua, y al haber mayor cantidad, se necesita una mayor cantidad de azúcar para darle una mayor fluidez al mortero y que se compacte mejor.

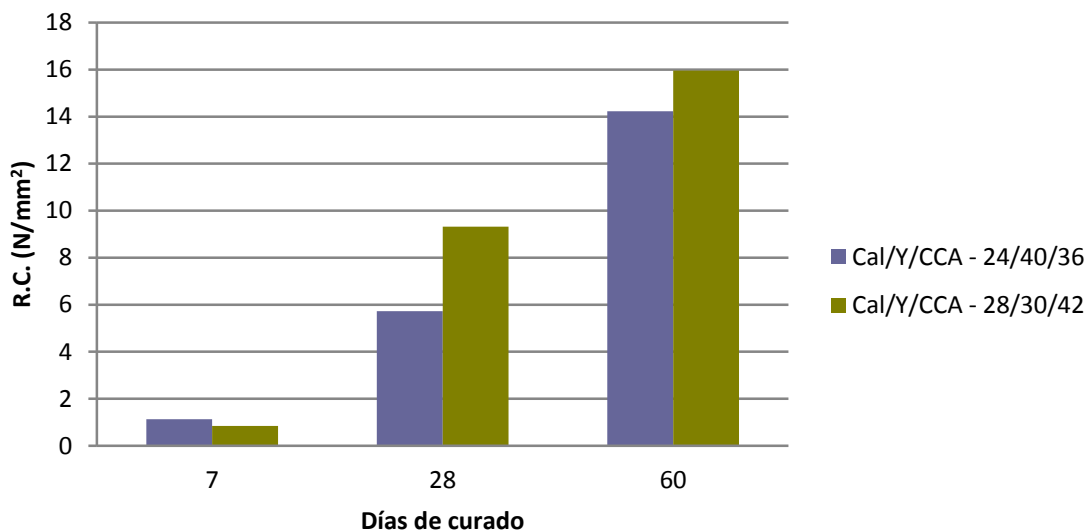
4.3.5 Comparativas conjuntas

En este apartado vamos a tratar de comparar y hallar correlaciones entre las distintas dosificaciones.

Los resultados obtenidos son:



Gráfica 4.11– Influencia de la relación Cal/Y/CCA -Resultados de resistencia a compresión y desviación estándar.
A/B 0,60 – Azúcar 0,20%



Gráfica 4.12– Influencia de la relación Cal/Y/CCA -Resultados de resistencia a compresión y desviación estándar.
A/B 0,60 – Azúcar 0,30%

Podemos observar, que para una misma edad de curado, las resistencias a compresión en función de la cantidad de yeso son todas muy similares; este hecho nos debería indicar que en estos casos los valores de la resistencia a compresión dependen fundamentalmente de la relación cal/CCA, que se mantiene constante en todas las dosificaciones y no del contenido de yeso de los morteros.

No obstante, cuando el tiempo de curado es suficientemente largo (60 días) para que se desarrolle la reacción puzolánica, se observa un aumento de la resistencia conforme aumenta el contenido en Cal-CCA en el conglomerante (como cabría esperar).

En el caso de la adición del 0.3% de azúcar, vemos que ocurriendo el mismo comportamiento anterior, se observa una diferencia a 28 días, ya que a esta edad la resistencia a compresión del mortero con mayor contenido en CCA (28/30/42), es casi un 43% mayor que la del mortero con el 36% de CCA. Este hecho, puede ser debido a la mejor compactación del mortero, debido a que la CCA absorbe mucha agua, y esta mejor compactación hace que a 28 días el comportamiento sea mejor, mientras que a mayores edades de curado, ambos valores de resistencia se igualan (ver gráficas 4.11 y 4.12)

4.4 EFECTO DEL AZÚCAR

De los estudios anteriores, se puede concluir que el azúcar parece comportarse en las mezclas cal/Y/CCA, como un agente retardante del fraguado del yeso dando al mismo tiempo una mayor fluidez a las mezclas

Se ha considerado conveniente intentar corroborar si el azúcar también tiene un efecto retardante en la reacción puzolánica.. Para ello, se han fabricado morteros con cal/Y/CCA y morteros cal/FC/CCA con la misma dosificación y cantidades de azúcar variables. Las dosificaciones empleadas se muestran en la tabla 4.4.

Relación conglomerantes	Relación A/B	Azúcar
Cal/Y/CCA		
20/50/30	0,6	0,00%
20/50/30	0,6	0,10%
20/50/30	0,6	0,20%
20/50/30	0,6	0,50%
20/50/30	0,6	1,00%
Cal/FC/CCA		
20/50/30	0,6	0,00%
20/50/30	0,6	0,10%
20/50/30	0,6	0,20%
20/50/30	0,6	0,50%
20/50/30	0,6	1,00%

Tabla4.4 – Dosificaciones analizadas

En la fabricación de los morteros se ha detectado que desde el punto de vista de la trabajabilidad parece existir un porcentaje óptimo de azúcar, ya que superado dicho porcentaje de azúcar se podría producir la inhibición del fraguado de las mezclas, ya que no se podían desmoldear hasta al menos 15 días de su fabricación. Tanto para Cal/Y/CCA como para cal/FC/CCA.



Imagen 4.1 – Mortero Cal/FC/CCA (20/50/30) – A/B 0,60 – 0% azúcar



Imagen 4.2 – Mortero Cal/FC/CCA (20/50/30) – A/B 0,60 – 0,10% azúcar



Imagen 4.3 – Mortero Cal/FC/CCA (20/50/30) – A/B 0,60 – 0,20% azúcar



Imagen 4.4 – Mortero Cal/FC/CCA (20/50/30) – A/B 0,60 – 0,50% azúcar



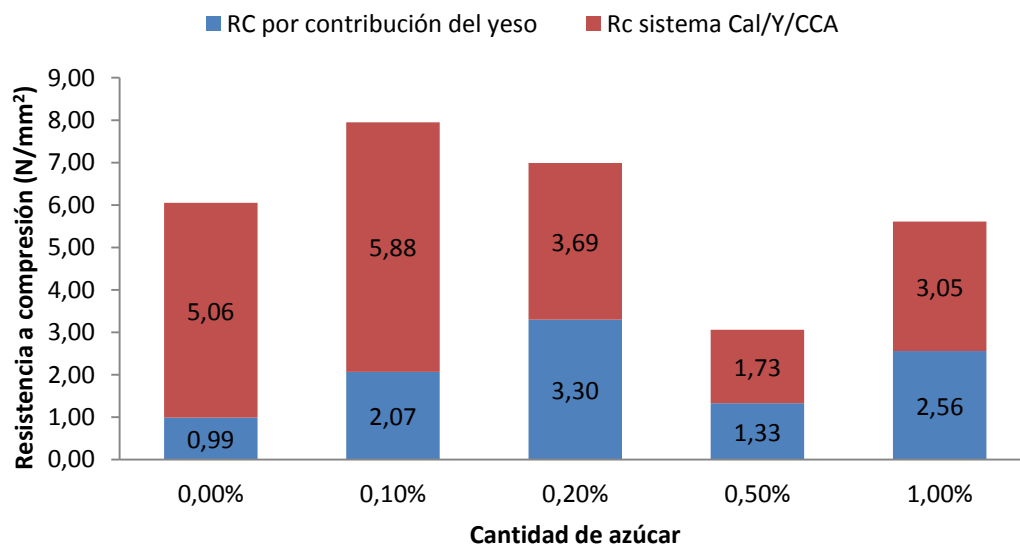
Imagen 4.5 – Mortero Cal/FC/CCA (20/50/30) – A/B 0,60 – 1,00% azúcar

De las anteriores probetas se ha detectado que los tiempos de desmoldeado con seguridad de las probetas de la imagen 4.1, 4.2 y 4.5 son similares (2-3 días); mientras que las probetas de la imagen 4.3 y 4.4 rondan los 15 días.

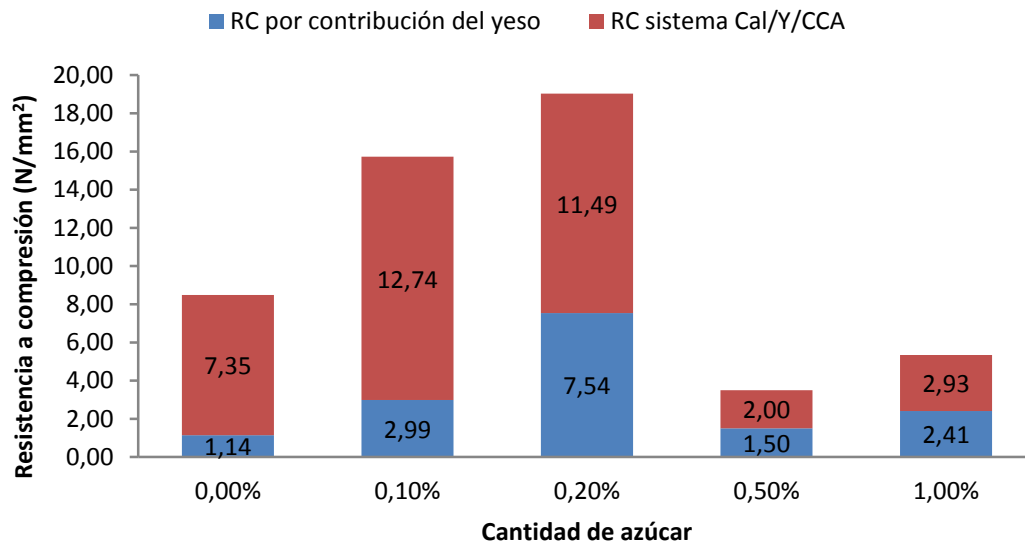
Lo resultados de resistencia a compresión de dichas probetas son:

Relación conglomerantes	Relación A/B	Azúcar	7 días	15 días	28 días	60 días	90 días
Cal/Y/CCA							
20/50/30	0,6	0,00%	2,14		5,06	7,35	10,21
20/50/30	0,6	0,10%	1,83		5,88	12,74	16,13
20/50/30	0,6	0,20%	1,74		3,69	11,49	16,0
20/50/30	0,6	0,50%	1,54		1,73	2,00	6,91
20/50/30	0,6	1,00%	2,68		3,05	2,93	3,42
Relación conglomerantes	Relación A/B	Azúcar	7 días	15 días	28 días	60 días	90 días
Cal/FC/CCA							
20/50/30	0,6	0,00%		1,60	4,07	6,21	8,94
20/50/30	0,6	0,10%		0,79	3,81	9,75	12,49
20/50/30	0,6	0,20%		0,31	0,39	3,95	11,01
20/50/30	0,6	0,50%		0,29	0,40	0,50	0,75
20/50/30	0,6	1,00%		0,42	0,49	0,52	0,66

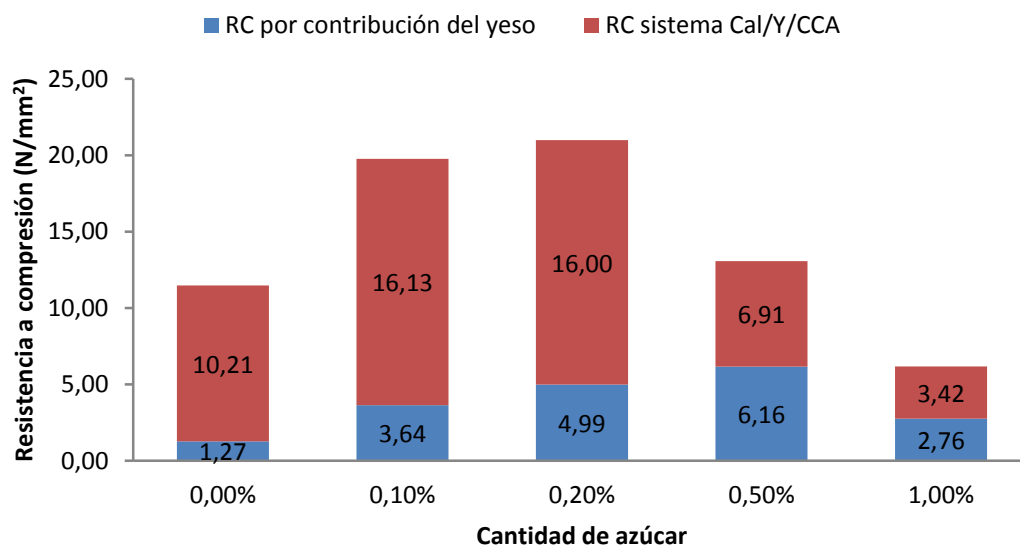
Tabla 4.5 – Resultados a compresión de morteros



Gráfica 4.13 – Resultados a compresión a 28 días de morteros Cal/Y/CCA (20/50/30) y contribución del yeso



Gráfica 4.14 – Resultados a compresión a 60 días de morteros Cal/Y/CCA (20/50/30) y contribución del yeso



Gráfica 4.15 – Resultados a compresión a 90 días de morteros Cal/Y/CCA (20/50/30) y contribución del yeso

Tras un análisis inicial se observa:

-A nivel de fabricación de probetas, el azúcar afecta a los endurecimientos iniciales de principio de fraguado. De forma que a bajas (0,10%) y altas cantidades (>0,50%) se puede producir el desmoldeado en 24 horas.

-El azúcar afecta a las resistencias aportadas por las reacciones puzolánicas y por el yeso, produciéndose una recuperación a medio y largo plazo; quedando por comprobar a un mayor plazo (>90 días) si se produce un aumento de resistencia probablemente debido a una mejor compactación.

-En todos los casos la eliminación del yeso produce una bajada de resistencias; salvo en las familias sin azúcar. Probablemente debido a la dificultad de llenado y compactación de moldes en el caso de incorporar yeso en la mezcla.

Como conclusión se puede pensar que cantidades moderadas de azúcar, ayudan a la trabajabilidad, facilitan el llenado de piezas con tiempos razonables de desmoldeado, facilita la compactación dando mayores resistencias a largo plazo, consiguiendo resistencia a compresión suficiente para la industria de prefabricación y morteros de albañilería.

4.5 ESTUDIOS MICROESTRUCTURALES EN PASTAS: TERMOGRAVIMETRÍA

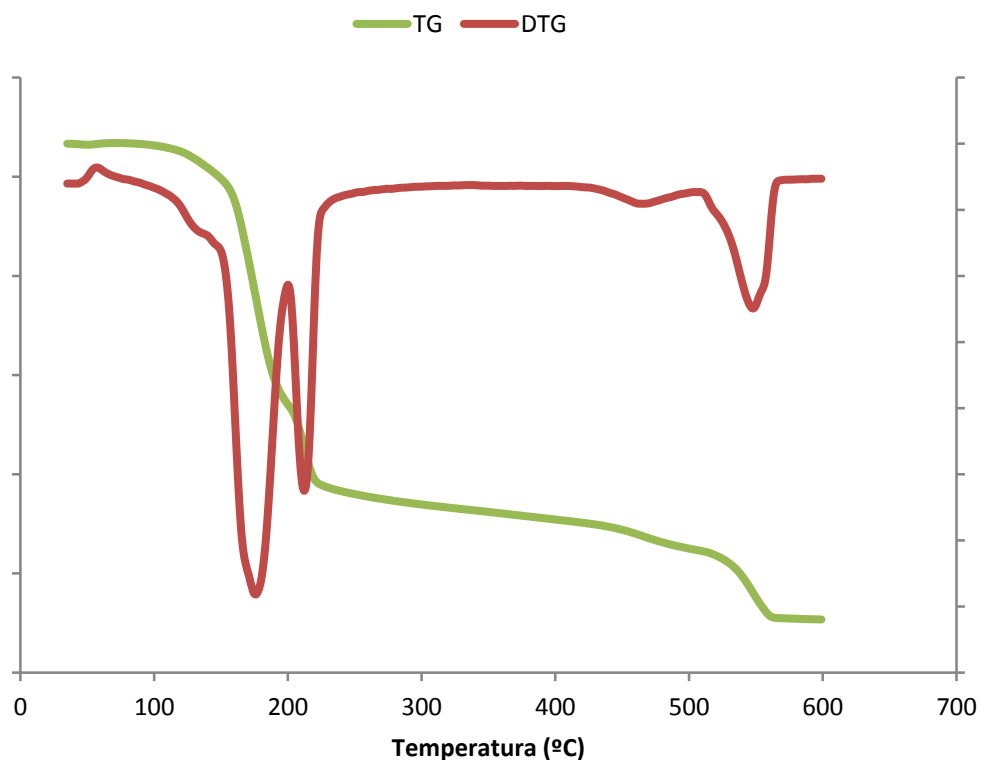
Para conocer la actividad puzolánica de la CCA en presencia de yeso y analizar los posibles compuestos formados durante el fraguado y endurecimiento de las pastas se realizaron estudios termogravimétricos sobre pastas formadas por Cal/Y/CCA y Cal/FC/CCA; de proporciones 20/50/30.

Esta experiencia se dividio en dos estudios para cada una de las relaciones a 7 y 28 días guardadas en cámara húmeda.

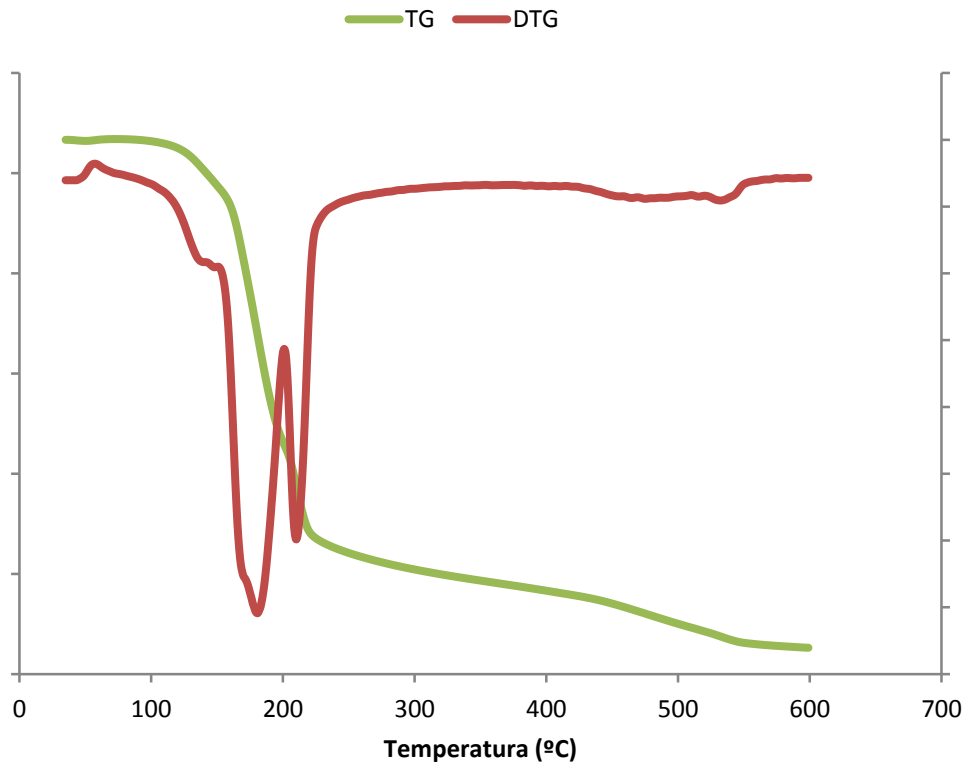
La reacción del hidróxido cálcico con la sílice vítrea presente en la CCA da lugar a la formación de silicatos cálcicos hidratados por reacción puzolánica.

El uso del análisis termogravimétrico es útil para identificar productos de reacción y en nuestro caso, para conocer el porcentaje de fijación de cal y así poder conocer la reactividad puzolánica.

Se eligió dicho intervalo de temperaturas, debido a que los procesos de deshidratación de los hidratos formados, así como de deshidroxilación de la cal que queda disponible se encuentran en este intervalo.



Gráfica 4.16 – Curvas TG y DTG en familias de morteros de base Cal/Y/CCA (20/50/30)- A/B 0,60 - 7 días T^a ambiente



Gráfica 4.17 – Curvas TG y DTG en familias de morteros de base Cal/Y/CCA(20/50/30) – A/B 0,60 - 28 días Tª ambiente

En la gráfica 4.16 y 4.17 se muestran las curvas TG y las curvas derivadas DTG de las mezclas cal/Y/CCA a 7 y 28 días de curado. Podemos distinguir, varios procesos de pérdida de masa, habiéndose marcados sobre la gráfica.

- El primer pico en el intervalo 100-200°C tiene un hombro, solapado con un pico centrado a 178°C. Probablemente el hombro de la curva DTG corresponde a la deshidratación de los silicatos cálcicos hidratados, y se encuentra solapado con el pico correspondiente a la deshidratación parcial del sulfato cálcico dihidrato a hemihidrato.
- En el intervalo 200-220°C se observa en la curva TG una segunda pérdida de masa que se manifiesta en la curva DTG por un segundo pico debido a la segunda deshidratación del yeso en su conversión de hemihidrato a anhidrita
- Por último en la zona de 500-660°C es posible observar la presencia en la mezcla de hidróxido cálcico mediante la pérdida de peso, que en la curva DTG se muestra como el pico 3, debido a la deshidratación de la portlandita presente. En la tabla 4.6 podemos resumir los datos más importantes de pérdida de masa de las pastas preparadas.

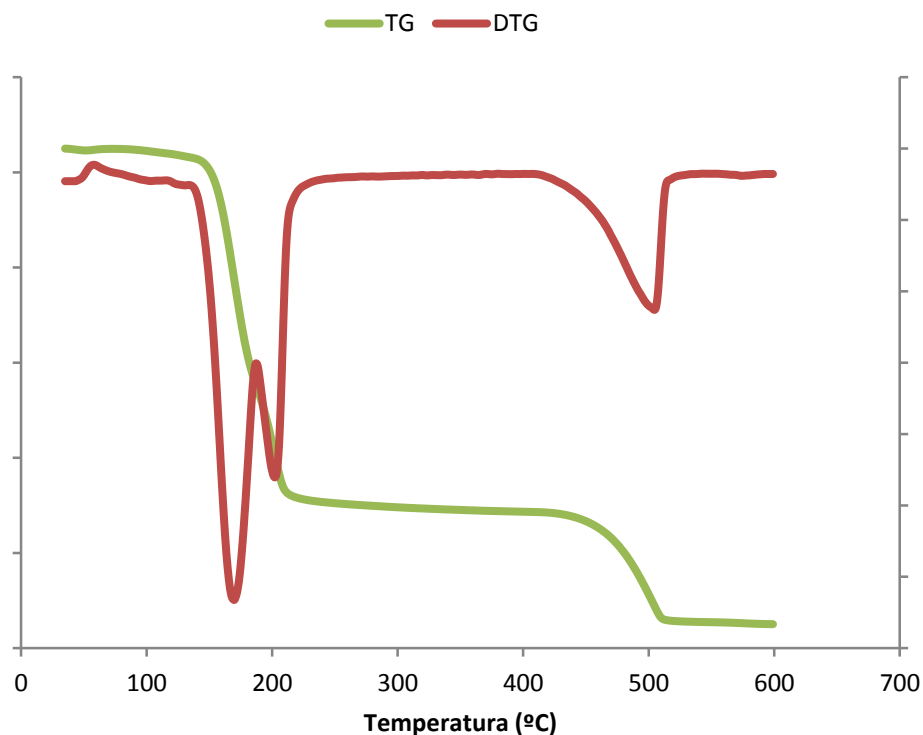
En la tabla 4.6 podemos resumir los datos más importantes de pérdida de masa de las pastas preparadas.

Muestra	PT	Pérdida de masa teórica del yeso (90%)	P(100-300°C)	P (500-600°C)	Cal presente	Cal fijada (80%)
CAL/Y/CCA (7d)	14.35	9.42	12.31 (2.89% sería la pérdida asociada a los SCH formados)	2.04	8.39	47.60%
Cal/Y/CCA (28días)	15.20	9.42	13.88 (4.46% sería la pérdida asociada a los SCH formados)	1.32	5.42	66.11%
Cal/Y/FC (7 días)	13.31	9.42	10.18	3.53	14.51	9.25%
Cal/Y/FC (28días)	15.72	9.42	12.15	3.57	14.67	8.22%

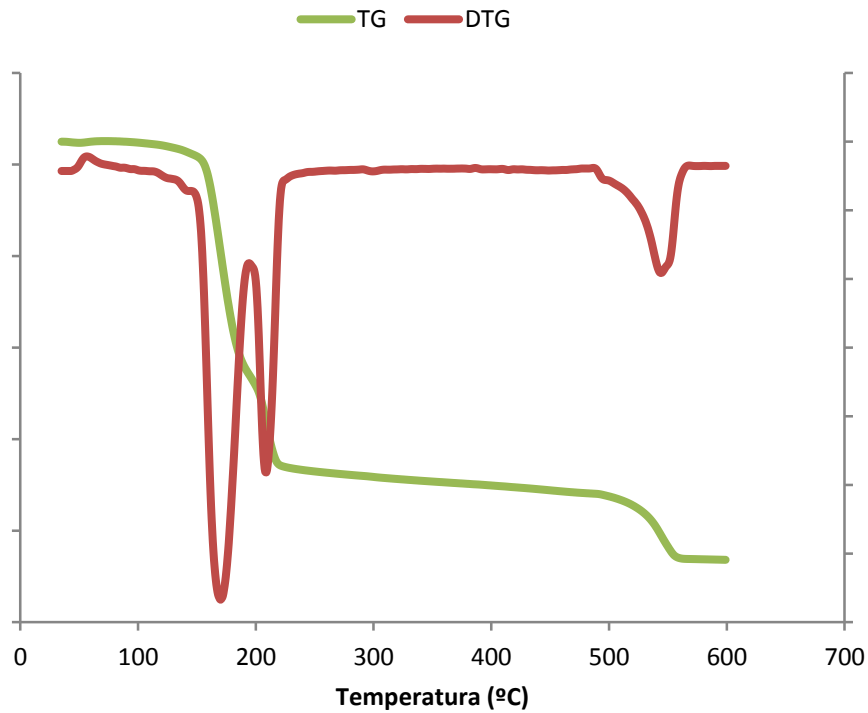
Tabla 4.6 – Resultados de pérdidas de masa en TG

También podemos observar que para las curvas con CCA existe un hombro en la zona entre 100-150°C, que es mucho más acentuado a 28 días, lo que indica la mayor presencia de SCH debido a la reacción puzolánica. Este hecho se corrobora con la mayor cantidad de cal fijada por la pasta a 28 días respecto a 7 días de curado.

Este hombro no se observa en las pastas con filler (ver gráfica 4.18 y 4.19) ya que en este caso, al ser un material inerte no se produce reacción puzolánica. También se corrobora, porque la cantidad de cal presente en ambas pastas es similar a 7 y 28 días y mucho mayor que la que se detecta en las pastas con CCA.



Gráfica 4.18 – Curvas TG y DTG en familias de morteros de base Cal/FC/CCA (20/50/30) – A/B 0,60 - 7 días Tª ambiente



Gráfica 4.19 – Curvas TG y DTG en familias de morteros de base Cal/FC/CCA (20/50/30 –A/B 0,60– 28 días Tª ambiente

A la vista de los resultados obtenidos, nos parece interesante en un futuro realizar estudios más profundos de termogravimetría sobre este tipo de pastas y mezclas, ampliando este estudio a pastas con presencia de azúcar y a mayores tiempos de curado.

4.6 ESTUDIOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA (SEM)

Se realizó un estudio completo por microscopía electrónica sobre las mismas pastas que se utilizaron para los análisis por termogravimetría, para las edades de 7 y 28 días, en muestras curadas a temperatura ambiente.

Previamente a su análisis por SEM, las muestras deben ser tratadas con acetona para detener el proceso de hidratación. Los trozos de las muestras se colocan en un vial con acetona durante al menos una hora, transcurrido este tiempo se secan en la estufa a 60°C durante una hora y se guardan en un vial totalmente cerrado para evitar su carbonatación.

Las muestras fueron recubiertas en oro para obtener una mejor calidad de imagen en las micrografías. En general para todas las pastas se aprecian grandes cristales de yeso y elevada porosidad.

En las pastas con CCA se encontraron además de abundantes cristales de yeso, productos de hidratación amorfos y poco cristalinos que se asignan a silicatos cálcicos hidratados (ver imagen 4.6). También en las pastas a 7 días se detectaron algunas agrupaciones poco cristalinas que al analizar por FRX resultaron ser portlandita sin reaccionar.

En las pastas de filler, solamente se han detectado pequeñas agrupaciones de cal sobre todo en las pastas a 7 días, pero principalmente cristales de yeso y agrupaciones de carbonato cálcico, debido a la presencia del filler calizo.

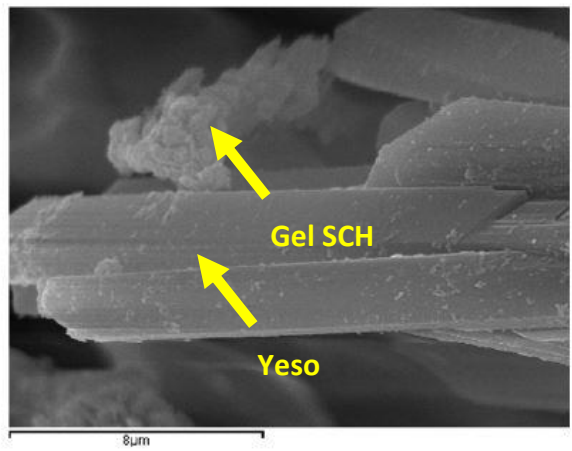
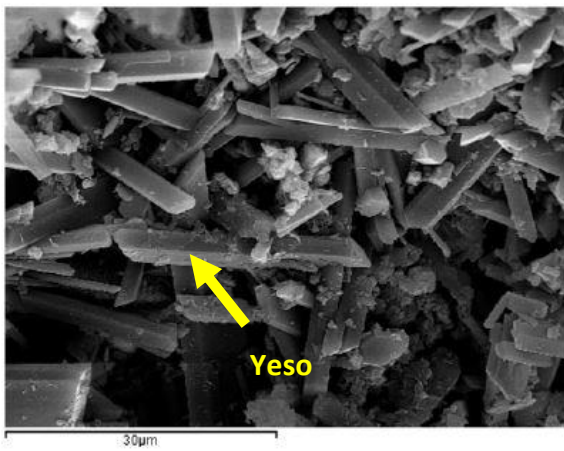
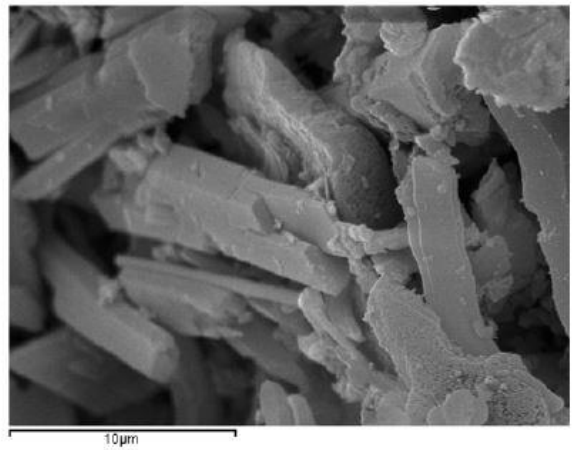
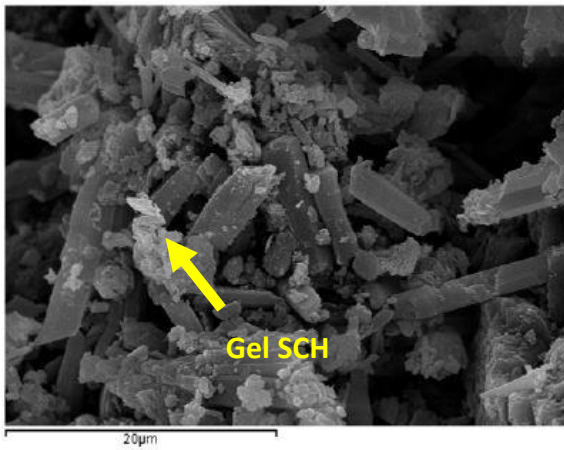
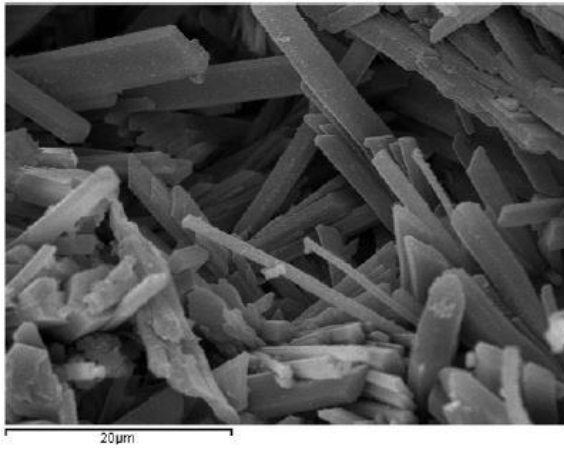


Imagen 4.6 –Pasta CAL/Y/FC – A/B 0,60 –7 días

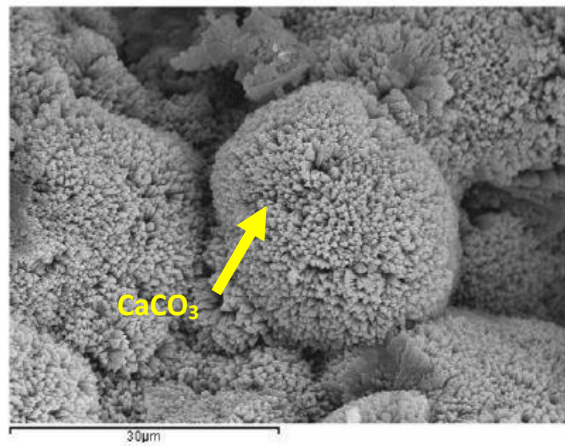
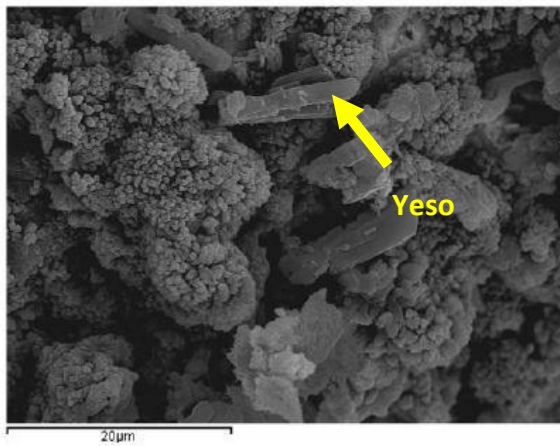
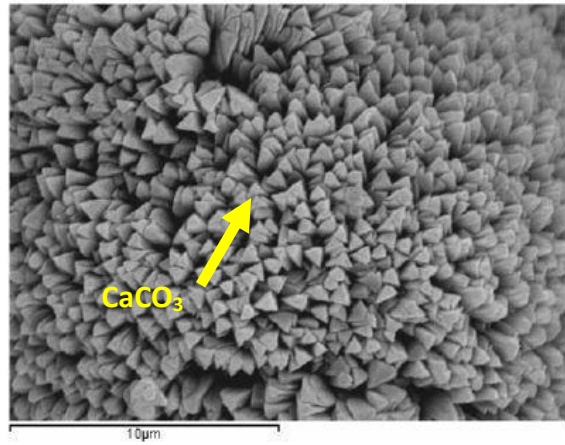
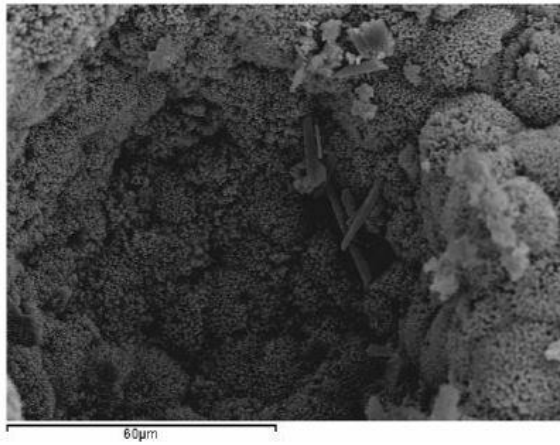
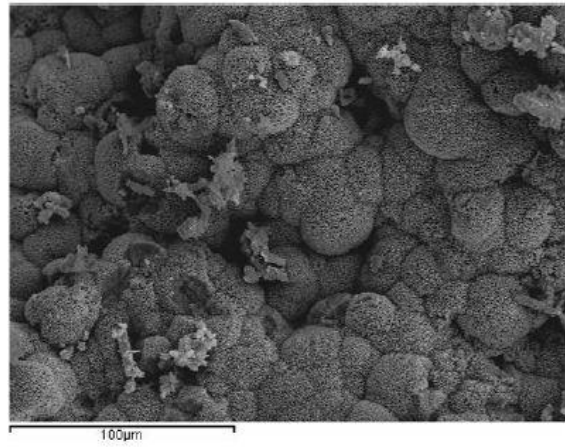


Imagen 4.7 –Pasta CAL/Y/FC – A/B 0,60 –28 días

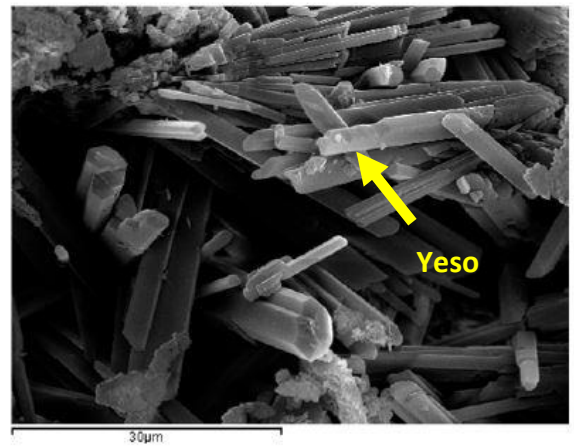
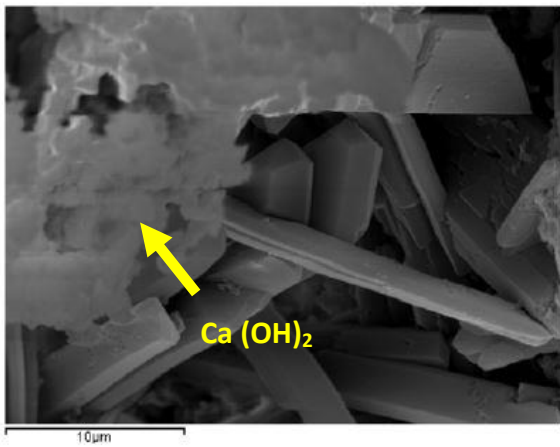
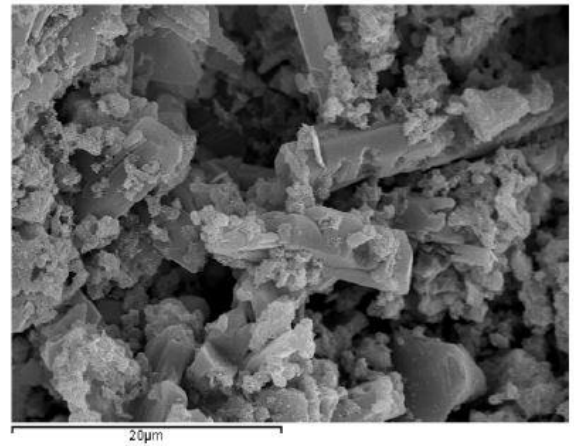
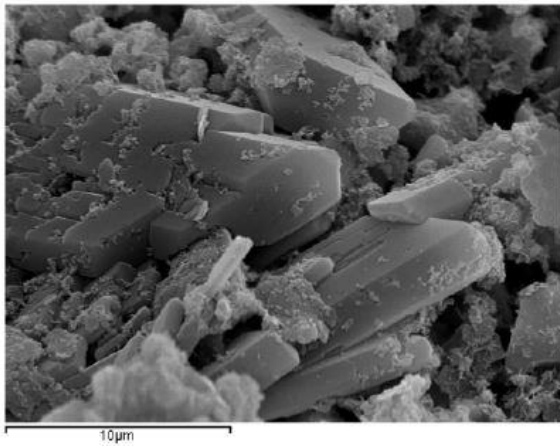
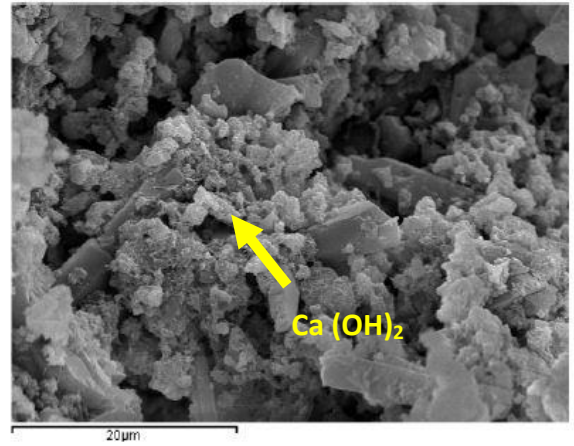
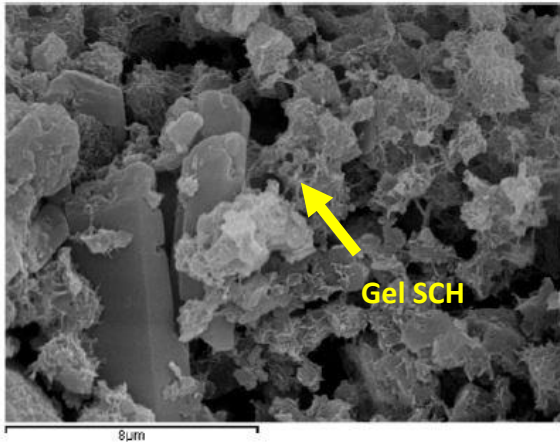


Imagen 4.8 –Pasta CAL/Y/CCA – A/B 0,60 –7 días

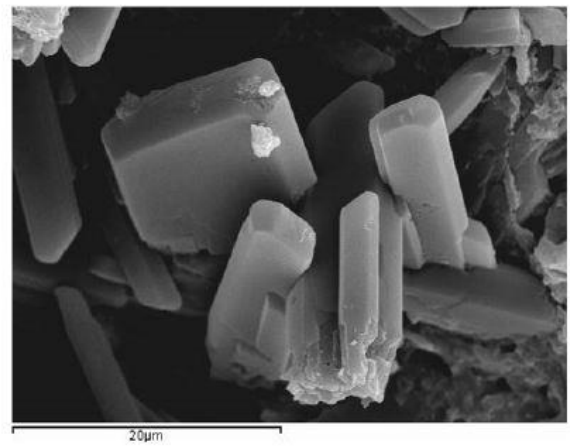
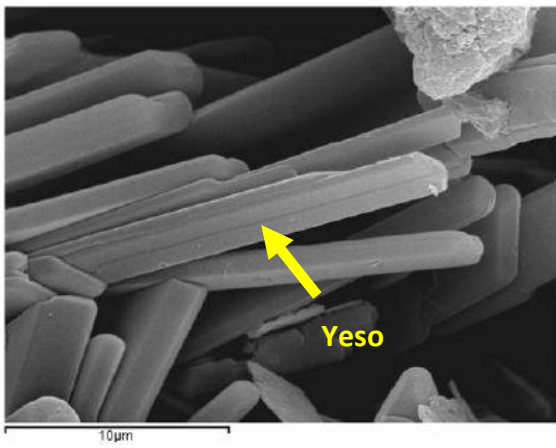
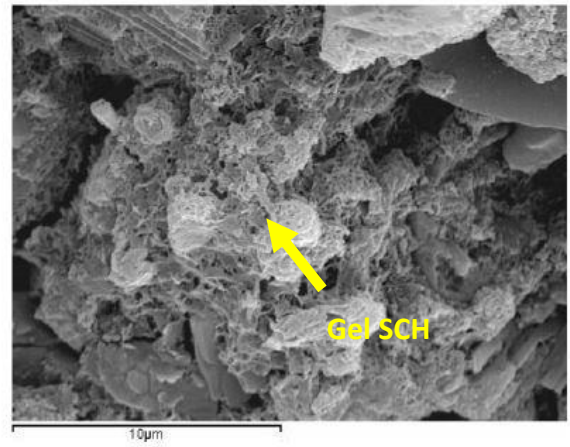
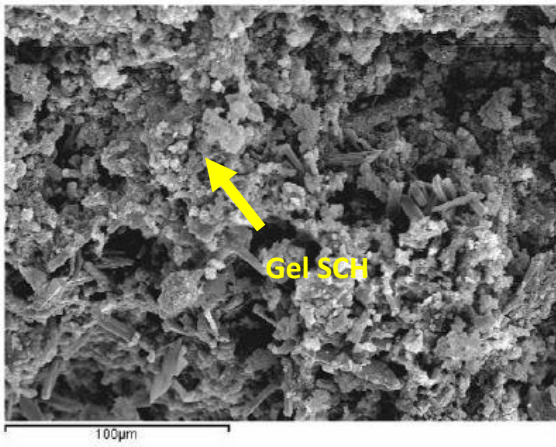
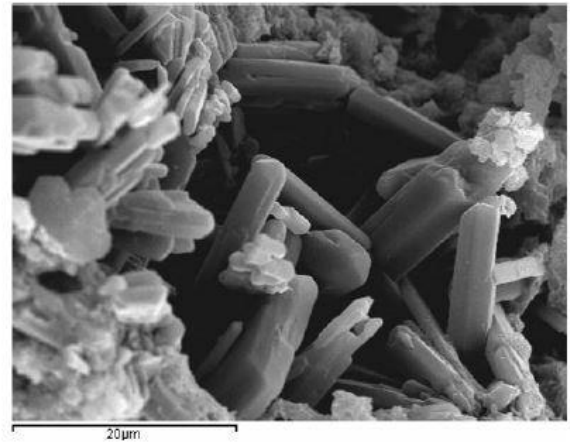
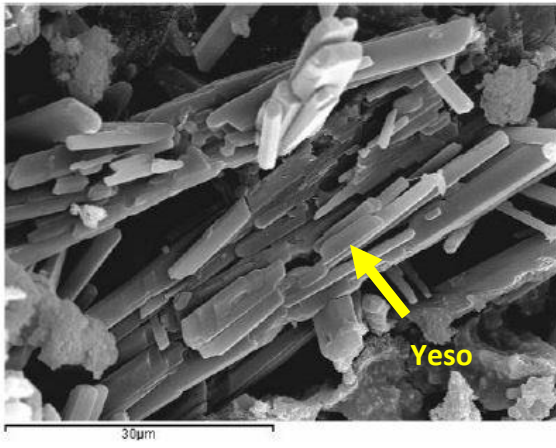


Imagen 4.9 –Pasta CAL/Y/CCA – A/B 0,60 –28 días

4.7 ESTUDIOS DE MICROSCOPIA ÓPTICA

También se han analizado algunos morteros por microscopía óptica, a fin de observar la porosidad y la disgregación de materiales en dichos morteros.

Se observa que en el mortero con filler calizo agrupaciones de yeso que no estaban bien disgregadas en la matriz (foto 1)

MORTEROS Cal/Y/FC (20/50/30) - Agua/binder 0,6 - Sin azúcar

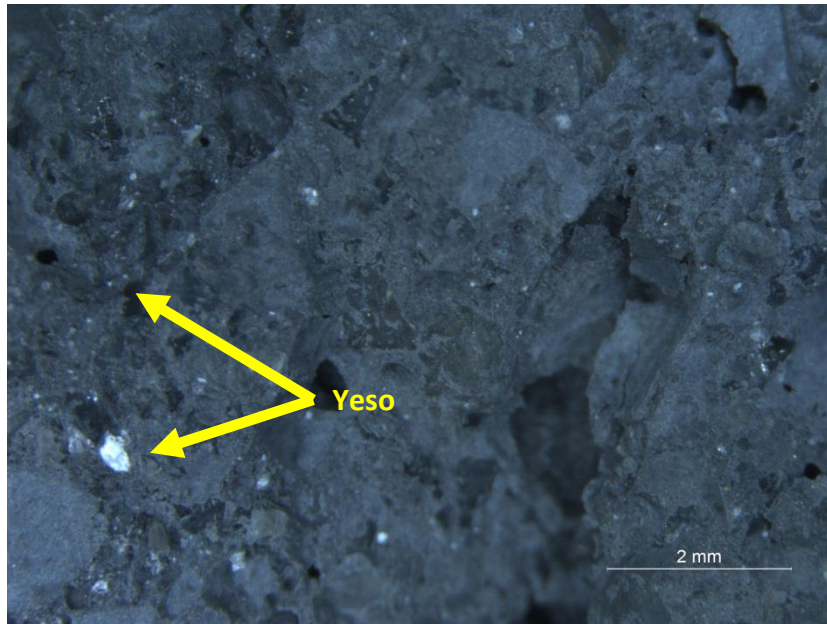


Imagen 4.10 – Ampliación 8X

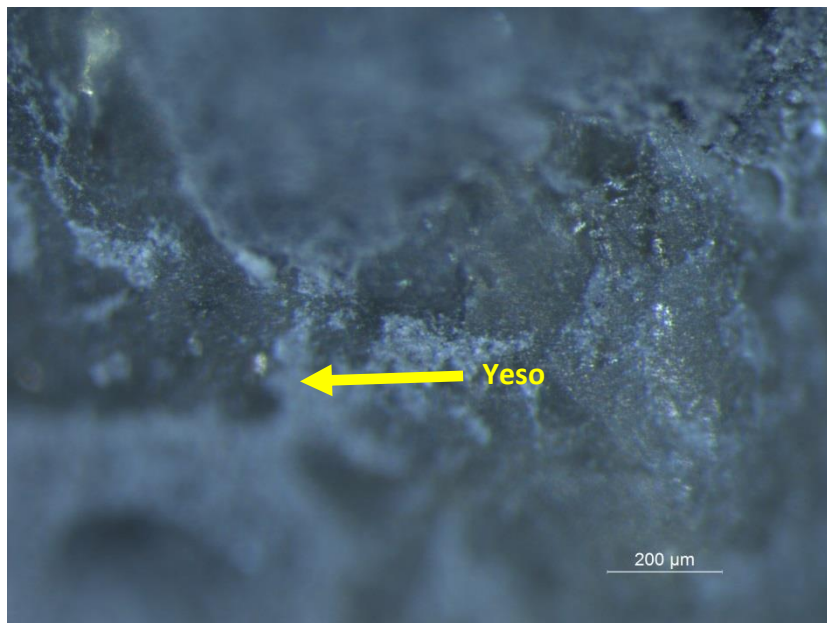


Imagen 4.11 – Ampliación 25X

MORTEROS Cal/Y/FC (20/50/30) - Agua/binder 0,6 - A azúcar 0,20%

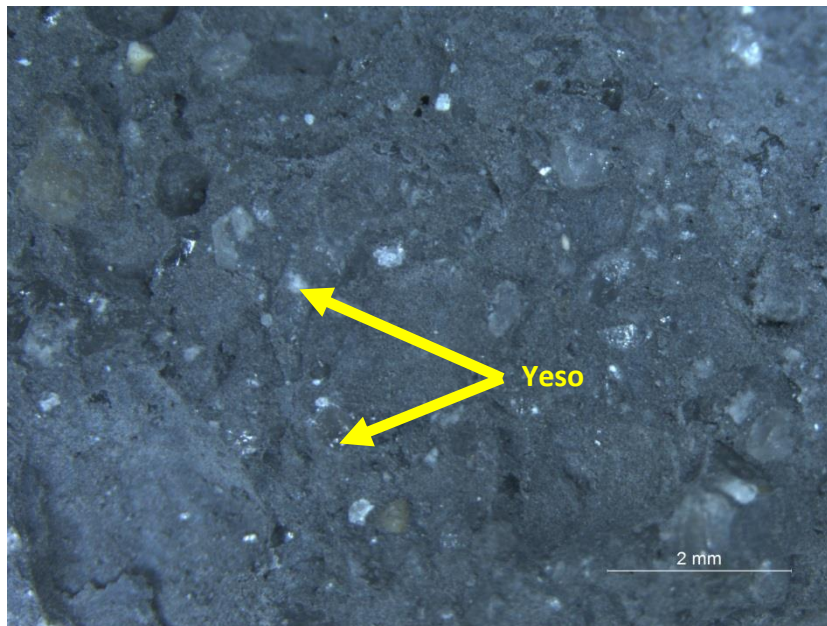


Imagen 4.12 –Ampliación 8X

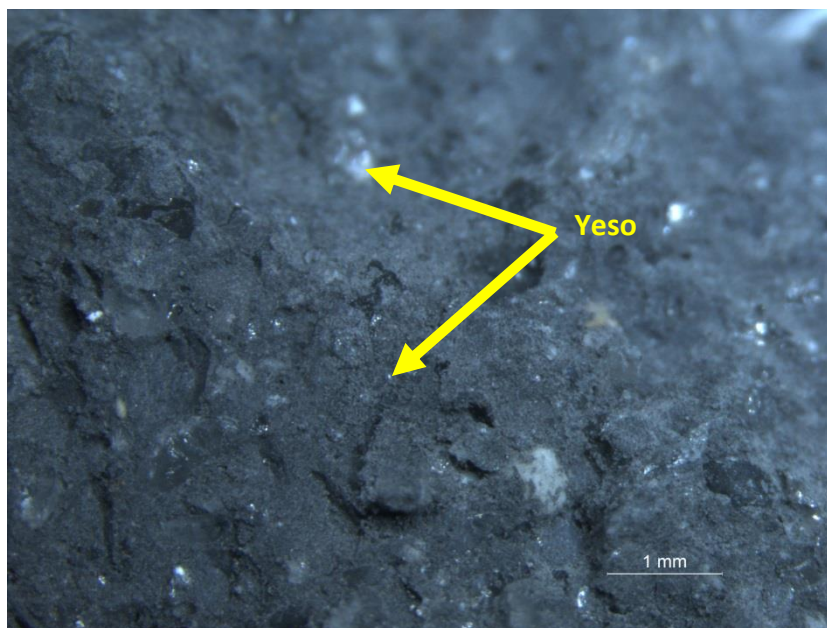


Imagen 4.13 –Ampliación 10X

Analizadas las imágenes se aprecia una distribución homogénea de todos los componentes. La porosidad aparente a simple vista es mayor en las muestras sin azúcar por su dificultad de trabajabilidad incluso comparándolas con otras de relación agua/binder menor.

5. CONCLUSIONES

Tras el análisis de resultados de resistencia a compresión se concluye que:

- El ácido cítrico disminuye considerablemente en la resistencia a compresión del mortero con C/Y/CCA, pudiendo ser debido a la inhibición en la formación de silicatos cálcicos hidratados, pero no impide las reacciones puzolánicas. Las resistencias a compresión finales no son elevadas de la mezcla ternaria C/Y/CCA.
- El aporte del yeso a la resistencia a compresión es constante, dando su máximo a los pocos días. El control de su principio de fraguado es la clave para la obtención de piezas prefabricadas para su desmoldeado y la adquisición de resistencias de manipulación.

La influencia del azúcar es notable comportándose de una forma muy sensible ya que con pequeños incrementos de azúcar se producen grandes diferencias en los tiempos de principio de fraguado y trabajabilidad, así como en la velocidad de obtención de resistencias.

- Las relaciones A/B en este sistema ternario tiene gran influencia en las resistencias a compresión como en cualquier conglomerante. No obstante las mezclas usadas de conglomerantes demandan mucha agua por su reactividad y finura de molido, necesitándose a bajas relaciones de A/B una compactación enérgica.
- De todas las variables analizadas parece razonable pensar que los óptimos se encuentran en las dosificaciones de Cal/Y/CCA 24/40/36 con una relación A/B 0,60 y azúcar del 0,20% y la de Cal/Y/CCA 28/30/42 con una relación A/B 0,60 y azúcar del 0,30%.
- El azúcar funciona como un plastificante retardando los endurecimientos a corto plazo; y mejorando las resistencias a medio y largo plazo. Dicho aumento de resistencias pueden ser debidas a factores como la mejora de la reología de los morteros haciéndolos más trabajables, permitiendo matrices más densas y menos porosas.
- El azúcar no afecta a largo plazo a las reacciones puzolánicas, pero quedan ralentizadas a corto plazo probablemente por adsorción de la misma sobre el hidróxido cálcico.
- Cabe destacar la razonable trabajabilidad en la mayoría de los morteros y el aumento de la misma a medida que se emplea mayor cantidad de azúcar. No obstante existe un punto donde un aumento de la cantidad de azúcar provoca un reducción de los tiempos de principio de fraguado.

- Las mezclas no presentan expansiones a largo plazo al carecer todos los compuesto de alumina que pueda reaccionar con el yeso y formar ettringita secundaria.
- Las dosificaciones estudiadas agotan el Ca(OH)_2 por combinación con la sílice amorfa de la CCA para formar compuestos resistentes (silicatos cálcicos hidratados).

Los resultados del presente trabajo abren la puerta a la posibilidad de uso de conglomerantes ternarios Cal/Yeso/CCA en la construcción de viviendas de bajo coste económico y medioambiental. Si bien las resistencias mecánicas obtenidas serían adecuadas, se requeriría de estudios más completos que pongan de manifiesto la durabilidad de los materiales fabricados a partir de estas mezclas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ¹ <http://www.javeriana.edu.co/blogs/jesuscastano/cemento/historia-de-los-conglomerantes>
- ² FRANCISCO SORIA SANTAMARÍA “Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción” *Materiales de construcción* N.º 190-191 -1983
- ³ RHODES, DANIEL “*Stoneware and Porcelain: The Art of High-Fired Pottery*” Chilton Co., Philadelphia, Pennsylvania (1959), p.7.
- ⁴ JORGE IVÁN TOBON “Puzolanas en los alrededores de Irra”
- ⁵ DAY, R. L. “Pozzolans for use in low- cost housing: a state of the art report”, Research Report CE92-1, University of Calgary, enero 1992.
- ⁶ SALAS, J. “a industrialización posible de la vivienda latinoamericana. Tecnologías para la vivienda de interés social”, ESCALA
- ⁷ ROSANA MÉNDEZ, M^a VICTORIA BORRACHERO, JORDI PAYÁ, JOSÉ MARÍA MONZÓ “Utilización de morteros de base cementicia que contienen puzolanas para la elaboración de tejas de uso en viviendas de interés social”
- ⁸ I.H. LING, D.C.L. TEO “Properties of EPS RHA lightweight concrete bricks under different curing conditions” *Construction and Building Materials* Volume 25, Issue 8 (August 2011) Pages 3648–3655
- ⁹ LEONARDO BEHAK, WASHINGTON PERES NÚÑEZ “Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación” *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 23 No1, (Abril 2008) 34-41
- ¹⁰ Deepa GN, Jagadish KS, Fraaij A. Reactive pozzolanas from rice husk ash: an alternative to cement for rural housing. *Cem Concr Res* 2006;36:1062–71. James J, Rao S. Reaction product of lime and silica from rice husk ash. *Cem Concr Res* 1986;16:67-73
- ¹¹ Payá J., Monzó J., Borrachero M.V. Ordoñez L.M., International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies: Ecological materials and Technologies for Sustainable Building, IC-NOCMAT 2007, Maceió, Brazil, 14th-17th, October, 2007 Improving hydraulic properties of lime–rice husk ash (RHA) binders with metakaolin (MK) Ndigui Billong a,b, U.C. Melo a,b, E. Kamseu a,b, J.M. Kinuthia c, D. Njopwouo b *Construction and Building Materials* 25 (2011) 2157–2161
- ¹² The chemical activation of pozzolanic reaction of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) in lime pastes J. Payá, J. Monzó, M. V. Borrachero* and S. Velázquez, *Advances in Cement Research*, 2007, 19, No. 1, January, 9–16
- ¹³ Payá et al., 2007; Salas et al., 2007; Jauberthiea et al., 2000; Andrea et al., 2007; Nair et al., 2008; Charca et al, 2007; Yalcin et al., 2001
- ¹⁴ DIANA MARICEL RENDÓN, MICHEL ANGELO OSPINA, RUBY MEJÍA DE GUTIÉRREZ” Evaluación de la sílice obtenida de un subproducto industrial en pastas y morteros de cemento portland” *Revista Informador Técnico* 73 (Diciembre 2009) 20-26
- ¹⁵ RAHHAL, V.; DONZA, H.; DELGADO, A.; GUTIÉRREZ, JP.; TALERO, R. “Estudio calorimétrico del cemento Portland con puzolanas naturales españolas y yeso”. *Actas II Jornadas de Investigación en Construcción*. IETCC-CSIC. Madrid, España. 2008. Pag. 1439-1452.
- ¹⁶ COLAK, A. “Physical, mechanical, and durability properties of gypsum–Portland cement–natural pozzolan blends”. *Journal Civil Eng.* 28: 375–382. Canada. 2001.
- ¹⁷ COLAK, A. “The long-term durability performance of gypsum–Portland cement–natural pozzolan blends”. *Cement and Concrete Research*. Vol. 32, No 1, 2002. Pag.: 109-115.
- ¹⁸ KOVLER, K. “Setting and hardening of Gypsum-Portland cement-Silica Fume Blends, Part 1: Temperature and Setting Expansion”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 3, 1998. pp. 423–437.

¹⁹ M. T. BLANCO-VARELA, J. AGUILERA, S. MARTÍNEZ RAMIREZ, A. PALOMO, C. SABBIONI, C. RIONTINO, G. ZAPPIA, K. VAN VALEN, E. E. TOUMBAKARI "Formación de taumasita en morteros hidráulicos mediante la deposición de SO₂ atmosférico" *Materiales de Construcción*, Vol 51, No 263-264 (2001)

²⁰ BATIC, O.R., GIACCIO, G. Y ZERBINO, R E ISAIA 2010 "Las Cenizas de Cáscara de Arroz y la Reacción Álcali Sílice" VI Congreso internacional sobre patología y recuperación de estructuras

²¹ CARLOS ALBERTO MENDES MORAES, AMANDA GONÇALVES KIELINGA, MARCELO OLIVEIRA CAETANOB, LUCIANA PAULO GOMESB "Life cycle analysis (LCA) for the incorporation of rice husk ash in mortar coating" *Construction & building materials* [0950-0618] Madurwar, Mangesh Año:2013 vol.:38 pág.:872 -878

²² A. IZAGUIRRE, J. LANAS, J.I. ÁLVAREZ "Characterization of aerial lime-based mortars modified by the addition of two different water-retaining agents" *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 309–318

²³ A. IZAGUIRRE, J. LANAS, J.I. ÁLVAREZ "Efecto de un polímero natural biodegradable en las propiedades de morteros de cal en estado endurecido" *Materiales de Construcción* Vol. 61, 302, 257-274 abril-junio 2011

²⁴ A. IZAGUIRRE, J. LANAS, J.I. ÁLVAREZ "Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars" *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 1095–1104

²⁵ A. IZAGUIRRE, J. LANAS, J.I. ÁLVAREZ "Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment" *Cement and Concrete Research* 40 (2010) 1081–1095

26 ROSANA MÉNDEZ MUTSCHLER "nuevas mezclas cementantes basadas en cal" Tesis doctoral – Noviembre 2010 - UPV

27 Walter Leopoldo Roldán Latorre " Materiales puzolánicos para uso en conglomerantes especiales basados en yeso "Tesis doctoral – Febrero 2011 - UPV