

POSIBILIDADES ESTRUCTURALES DE MATERIALES A BASE DE CAL COMO CONGLOMERANTE: PRIMEROS RESULTADOS

(STRUCTURAL POSSIBILITIES FROM LIME AS BINDING MATERIAL: FIRST RESULTS)

Enrique Estrada y José Miguel Barbero, Arquitectos
Equipo Viviendas de Muy Bajo Coste, IETcc - CSIC

619-3

RESUMEN

La cal es un material abundante y cuya producción suma a una tecnología muy accesible la ventaja de poder materializarse en pequeñas plantas dispersas, para poder reducir al mínimo la componente de costo debida al transporte.

En el presente trabajo se ha planteado la posibilidad de obtener hormigones con fines estructurales, para viviendas de baja altura y que sean de fácil obtención, a base de cal y cenizas volantes o cenizas de cáscara de arroz, variando sus proporciones, grados de finura y estudiando la influencia de distintos factores en la resistencia inicial y final.

Se han obtenido buenos resultados, principalmente con ceniza de cáscara de arroz y cal con resistencias a 60 días superiores a los 15 MPa.

SUMMARY

Lime is a plentiful material which production combine a very accessible technology with the advantage that it must be prepared in little disperse plants, so that the transport charges can be reduced to the minimum.

This work expound the possibility to obtain concretes with structural purposes, for housing of scarce height, of easy obtention, basically from flying ashes or rice husk ashes, varying its proportions and fineness degree and studying the initial and final resistance.

Good results have been obtained mainly with rice husk ashes and lime, with 60 days resistance higher than 15 Mpa.

1. INTRODUCCION

Este trabajo se centra en encontrar distintas alternativas para la utilización de hormigones a base de cal (cal más adiciones) que pudieran utilizarse con fines estructurales en viviendas de baja altura.

Ante la cuestión de por qué hormigones a base de cal, cuando la diferencia de costos cal/cemento no es sustancial y la primera presenta desventajas claras, en cuanto a resistencia inicial, hay que tener en cuenta que el presente trabajo se realiza en el marco del Proyecto «Materiales, Tecnologías y Prototipos de Viviendas de Muy Bajo Coste» y que sus resultados pueden ser aplicables en países en vías de desarrollo en los que el precio de un saco de cemento importado puede llegar a multiplicarse por diez respecto al precio en su país de origen, cambiando el equilibrio antes aludido entre cemento y cal. Por otra parte, la tecnología necesaria para asumir la producción de cemento es alta y exige inversiones importantes (aproximadamente 1.000.000 de \$ para una producción de 10 t/día) (1) para la realización de grandes

plantas cementeras que, centralizando la producción, hacen que el factor transporte tome un protagonismo desproporcionado en países con poca o nula infraestructura viaria.

En contrapartida, la producción de cal requiere una tecnología muy apropiada a la que a una pequeña inversión, habría que añadir la ventaja de poder materializarse en pequeñas plantas dispersas; con lo que la componente de costos de transporte, se puede reducir al mínimo.

Con estos objetivos se abordó este trabajo experimental destinado a conseguir hormigones a base de cal y subproductos industriales o agrícolas. Una primera dificultad fue la ausencia de normativas específicas para este tipo de hormigones, adoptando como referencias más próximas al tema tratado, las Normas siguientes:

– ASTM C821-74; ASTM C141-67 (R78); ASTM C49-57 (R79); UNE 7189-62.

Todas ellas se refieren a morteros y no a hormigones, por lo que han tenido un valor de referencia y orientación, modificándose algunos puntos, a los que se hará referencia.

2. OBJETIVOS

Este trabajo se centra en la investigación de las posibles características estructurales de hormigones a base de cal como aglomerante, añadiéndole según el caso: ceniza volante en distintas proporciones y en tres grados de finura; ceniza de cáscara de arroz en distintas proporciones y en dos grados de finura; comparando los resultados de resistencia a compresión a 7,28 (ASTM C141-67) y 60 días, con dosificaciones patrón, conteniendo un 100% de cal como aglomerante.

Se estudian: la influencia del factor agua/conglomerante (a/c) en la resistencia de las probetas; la influencia del % de aglomerante, respecto al árido y el % de adición, respecto al aglomerante.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Materiales

Se enumeran a continuación las principales características de los materiales empleados en la elaboración de los hormigones realizados en este trabajo:

- Cenizas volantes procedentes de la central térmica de Soto de Ribera (Asturias) considerada como parte integrante del aglomerante.
- Cal apagada (hidróxido de cal) con un contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ superior al 90% y de CO_2 inferior al 7%.
- Arena del Manzanares: tamaño máximo 9,11 mm; módulo granulométrico 3,13 y peso específico 2,60 gr/cm^3 .
- Gravilla del Jarama: tamaño máximo 19,05 mm; módulo granulométrico 7,55 y peso específico 2,10 gr/cm^3 .
- Ceniza de cáscara de arroz (RHA): procedente del horno preparado al efecto por el equipo de investigación (2).

3.2. Metodología

Se han estudiado los siguientes parámetros:

- Evolución de la resistencia de todas las probetas en función del tiempo, rompiéndose a 7, 28 y 60 días y registrándose los valores en los correspondientes diagramas tensión/tiempo para todas las dosificaciones.
- Influencia del contenido en agua (a/c) en la resistencia. Realizándose todas las

dosificaciones para tres relaciones a/c de 0,7, 0,6 y 0,5, no bajándose de 0,5 por problemas de trabajabilidad y no superando el valor 0,7 por mermas excesivas en la resistencia.

- Influencia de la finura y de la cantidad de adición en la resistencia final. Las adiciones se han utilizado en la siguiente forma:
 - Ceniza volante de Soto de Ribera en tres finuras: natural (2.954 cm^2/gr Blaine), y triturada con molino de bolas hasta alcanzar las finuras de: 4.500 y 8.000 cm^2/gr Blaine.
 - Ceniza de cáscara de arroz quemada a $985 \pm 10^\circ \text{C}$ (2).

Tanto las cenizas volantes, como las cenizas de cáscara de arroz, se han mezclado con cal apagada, en los siguientes porcentajes:

- 0% de ceniza volante + 100% de cal (patrón).
- 20% de ceniza volante + 80% de cal (cenizas en las tres finuras).
- 30% de ceniza volante + 70% de cal (cenizas en las tres finuras).
- 40% de ceniza volante + 60% de cal (cenizas en las tres finuras).
- 0% de RHA + 100% de cal (patrón).
- 30% de RHA + 70% de cal (RHA en las dos finuras).
- 55% de RHA + 45% de cal (RHA en las dos finuras).
- 70% de RHA + 30% de cal (RHA en las dos finuras).

Las proporciones de adición no se mantuvieron constantes persiguiendo obtener las mayores resistencias, dado que existe bibliografía abundante, en la que se aconsejan proporciones más altas de RHA (3).

- Influencia de la proporción de aglomerante (cal + adición) respecto al árido, fijando tres valores del 15,25 y 35%, respectivamente de conglomerante respecto al árido.
- Influencia sobre dosificaciones seleccionadas en el proceso anterior de pequeñas adiciones de yeso o cemento. En su resistencia a compresión.

En el esquema de la Fig. 1 se recogen de forma sistematizada las composiciones de las distintas dosificaciones, asignándole a cada una de ellas un número de clave del 1 al 54, al

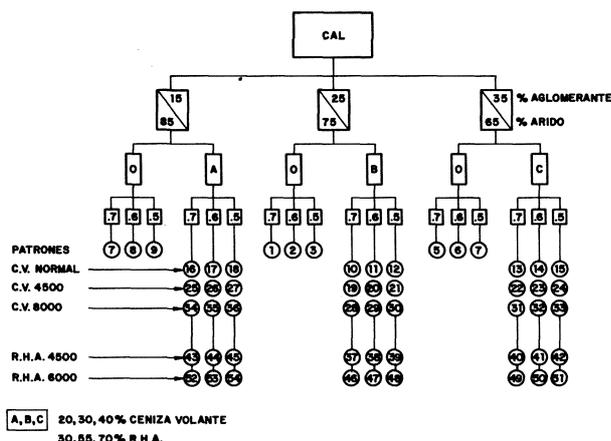


Fig. 1

que se referirán los resultados a lo largo del trabajo. La mencionada figura 1 trata de reflejar de forma gráfica la metodología seguida en la realización del trabajo.

3.3. Confección

Para la realización de las probetas, curado y rotura, se han seguido las orientaciones de la Norma ASTM C141-67 (Hydraulic hydrated lime for structural purposes) con la salvedad de que los cubos se han realizado de 7 x 7 x 7 cm, en lugar de 5 x 5 x 5 (UNE 7/189/62), por tratarse de hormigones, en lugar de morteros.

Las roturas se han realizado a 7, 28 y 60 días, a compresión simple con prensas tipo Amsler 50 D 73, de 50 Mp de capacidad máxima para ensayos a compresión; y prensa tipo Toni-Technik, de 20 Mp automática, para ensayos a compresión, con una dispersión entre ambas menor de 10%.

4. EVOLUCION DE LA RESISTENCIA DE LAS PROBETAS, EN FUNCION DEL TIEMPO

La Fig. 2 recoge los resultados de los ensayos a compresión de las 54 dosificaciones estudiadas. En los seis esquemas que constituyen la Fig. 2, se ha seguido la misma sistemática: sobre unas coordenadas cartesianas, en ordenadas se han registrado resistencias a compresión -valores medios de las roturas, expresados en MPa. En abscisas se han situado las 54 dosificaciones, representando para cada una de ellas los resultados mediante tres barras correspondientes a los resultados a 7, 28 y 60 días, respectivamente, colocados en este orden de izquierda a derecha en todos los casos, y en la misma posición relativa que en la Fig. 1.

En los cinco esquemas de la Fig. 3, se recogen igualmente, resultados a compresión en MPa de distintas dosificaciones, representándose en

abscisas dos tipos de factores: relaciones a/c y proporción de conglomerante.

Los valores indicados mediante barras negras-valores puramente orientativos-, son las medias de los correspondientes para el 15, 25, y 35 % de conglomerante.

Para la ceniza de R.H.A. con a/c = 0,5 y 15 % de conglomerante, las roturas a compresión presentan valores extremadamente bajos, del orden de 2 MPa, creciendo significativamente al pasar al 25 % y 35 % de conglomerante.

Este comportamiento parece compatible con el hecho de que la RHA necesita más agua para su trabajabilidad.

Como era de esperar a semejanza de los hormigones convencionales, la resistencia final decrece con el aumento del agua de amasado, siendo las cenizas volantes mucho más sensibles a esta variable, ya que se observan variaciones del 100 % de la resistencia para incrementos de dos puntos en la relación a/c frente a variaciones del 27 % en el caso de RHA.

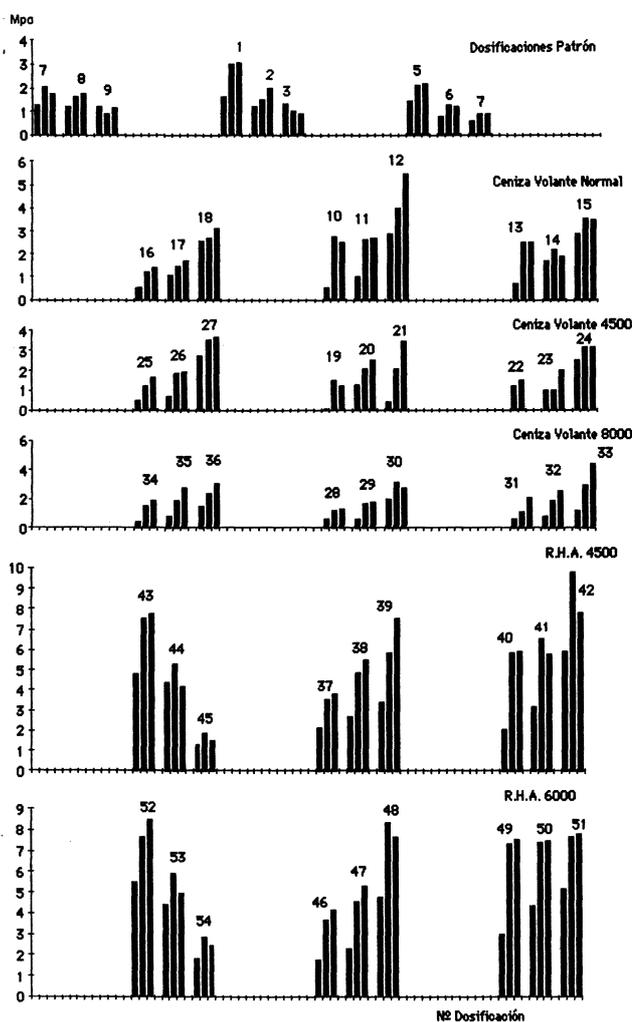


Fig. 2

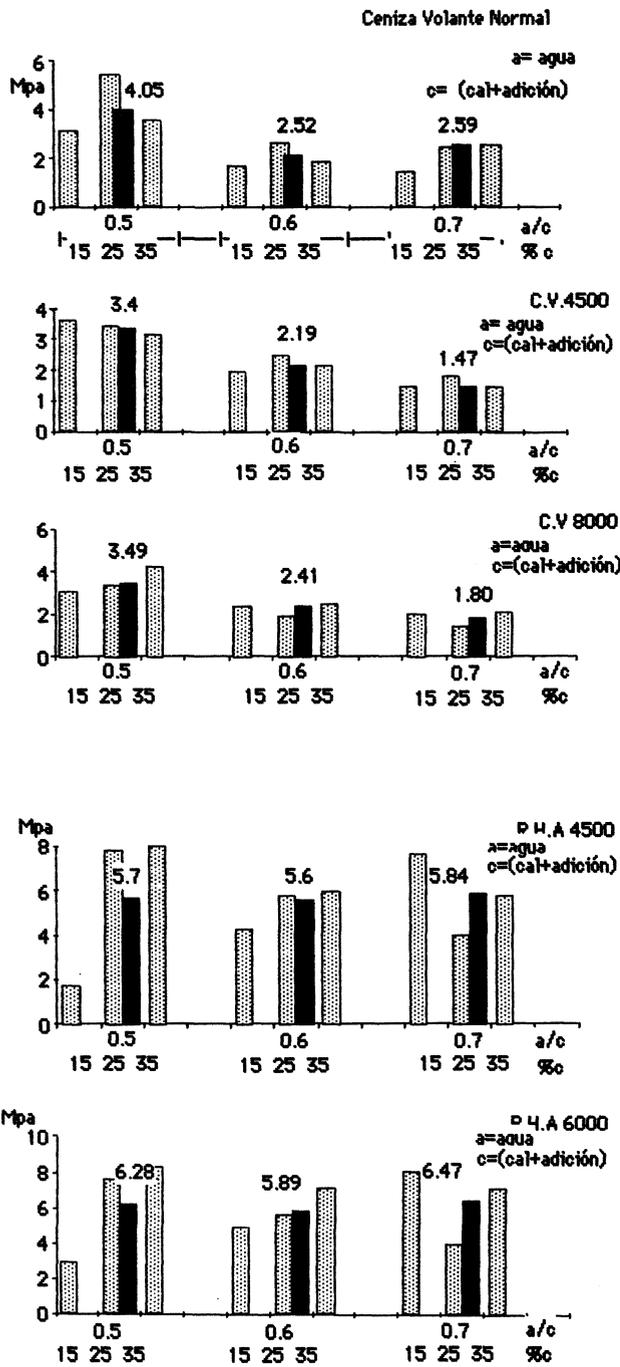


Fig. 3. - Influencia de la relación a/c en la resistencia final.

5. INFLUENCIA DEL GRADO DE FINURA EN LA RESISTENCIA FINAL

Existe abundante literatura en la que se acepta que el grado de puzolanidad es proporcional, en gran parte, al grado de finura o molienda de las cenizas (4) (5). Observando la Fig. 4 en la que se representan valores medios, parece constatar este hecho para el caso de la RHA; pero no ocurre lo mismo para el caso de las cenizas volantes. Puede observarse que, aún en el caso de las cenizas, RHA, las diferencias no

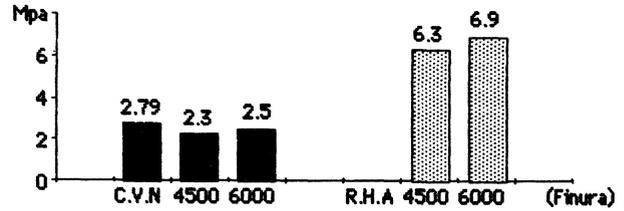


Fig. 4.

son muy significativas (menores del 10%), por lo que habría que plantearse la conveniencia o no del mayor consumo de energía necesario en el molido para tan escaso incremento de la resistencia conseguida.

6. INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE CONGLOMERANTE EN LA RESISTENCIA

En los cinco esquemas de la Fig. 5, se recogen los resultados correspondientes a las cenizas volantes y al RHA.

En cenizas volantes no aparece clara la relación creciente, entre el contenido de conglomerante

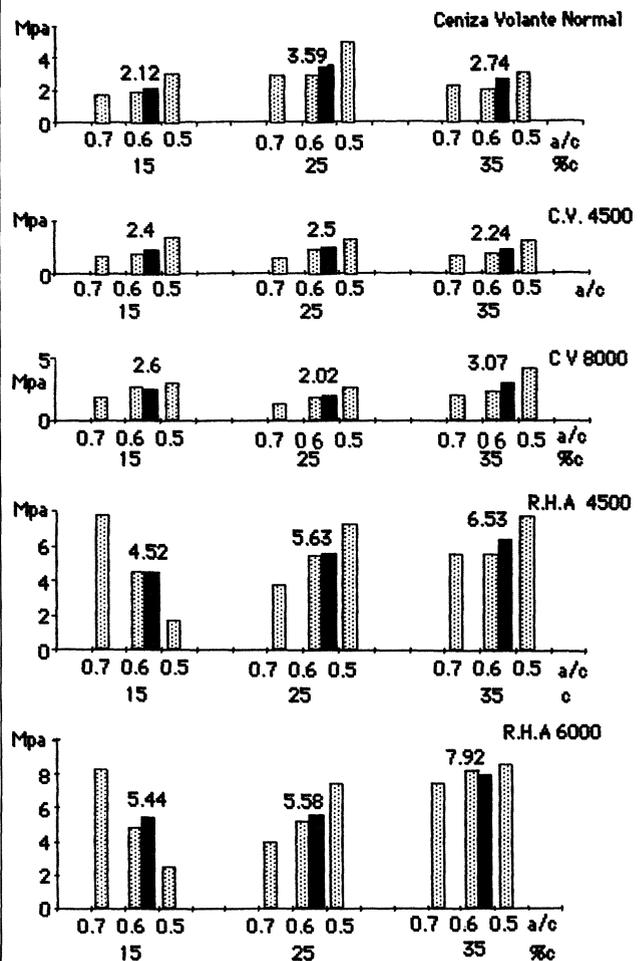


Fig. 5. - Influencia del tanto % de conglomerante en la resistencia final.

y la resistencia final. Los mejores resultados se presentan para un contenido del 25%, aunque hay excepciones en función del grado de finura, ya que para un 35% de CV 8000 se dan los mejores resultados.

Empleando RHA, la relación conglomerante - resistencia aparece mucho más clara, el crecimiento es casi lineal, produciéndose los mejores resultados para relaciones del 35% del conglomerante, que fue el máximo ensayado, lo que recomienda probar con proporciones mayores en posteriores trabajos.

Merece la pena comentar la circunstancia que se detecta al utilizar RHA, ya que la resistencia de las probetas con un 15% de conglomerante presenta valores decrecientes conforme se pasa de relaciones a/c de 0,7 a 0,6 y de este valor a 0,5.

7. INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE ADICIÓN FRENTE AL CONGLOMERANTE CAL EN LA RESISTENCIA FINAL

A la vista de los esquemas de la Fig. 6 puede deducirse la dificultad existente en obtener conclusiones generales dada la gran diversidad de comportamientos detectados y que, en el caso de las puzolanas, dependen de infinidad de variables: «Las propiedades técnicas del producto varían según la composición de las materias primas; la puzolana y la cal, que varían en cada caso y yacimiento y dependen también del procesamiento. Infiere la correcta cochura y apagado de la cal. Otra variante es la granulometría, o sea, el tipo de molienda y clasificación de las partículas» (6).

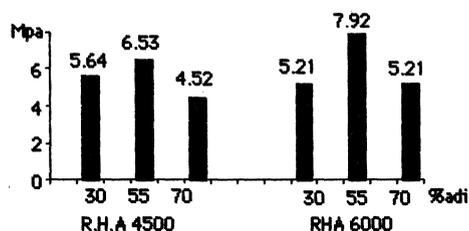
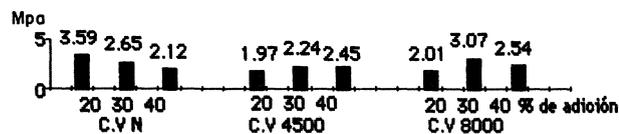


Fig. 6. - Influencia de la proporción de adición frente al conglomerante cal en la resistencia final.

8. SELECCION DE LAS DOSIFICACIONES MAS IDONEAS

En función de los resultados obtenidos para valores medios de todas las dosificaciones y atendiendo a los parámetros anteriormente

citados, se obtendrían los perfiles óptimos teóricos, para el caso de las cenizas volantes y la RHA, que serían los siguientes:

	a/c	Finura	% c	% adición	Dosif. n.º
CENIZA VOLANTE	0,5	Normal	25	20	12
CENIZA DE CASCARA DE ARROZ	0,5	6000	35	55	51

En la figura 7 se recoge la evolución de resistencias a 7, 28 y 60 días para las dosificaciones seleccionadas, así como para la patrón de cal.

Referenciando las dosificaciones seleccionadas a su correspondiente patrón de cal sin adiciones, se consiguen incrementos en la resistencia inicial del 75% para cenizas volantes y del 215% para la RHA, así como incrementos del 82 y 188% respectivamente, en su resistencia a 60 días. Esto es interesante, si se tiene en cuenta que uno de los principales inconvenientes de la cal como conglomerante, es su baja resistencia inicial.

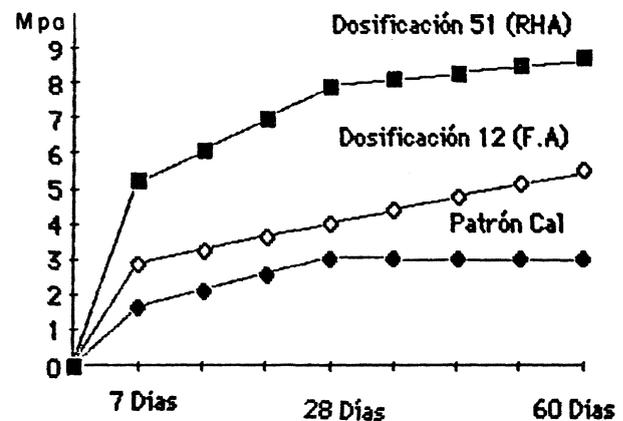


Fig. 7. - Diafragma tensión/tiempo de las dosificaciones óptimas.

9. INFLUENCIA DE PEQUEÑAS ADICIONES DE YESO Y CEMENTO EN LAS DOSIFICACIONES SELECCIONADAS

A partir de las dosificaciones seleccionadas, la número 12 para las cenizas volantes y la número 51 para la RHA, se ha estudiado la influencia en la resistencia a compresión de las probetas al sustituir pequeñas proporciones de cal por yeso o cemento, en distintos % del 3, 6 y 9 para el yeso, y del 8, 16 y 24 para el caso del cemento.

La Fig. 8 muestra claramente el negativo efecto sobre la resistencia a la compresión de la adición de yeso en la dosificación 12. La caída

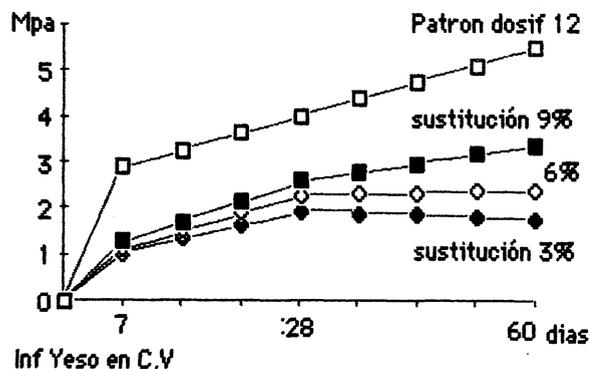


Fig. 8. - Influencia del yeso sobre ceniza volante.

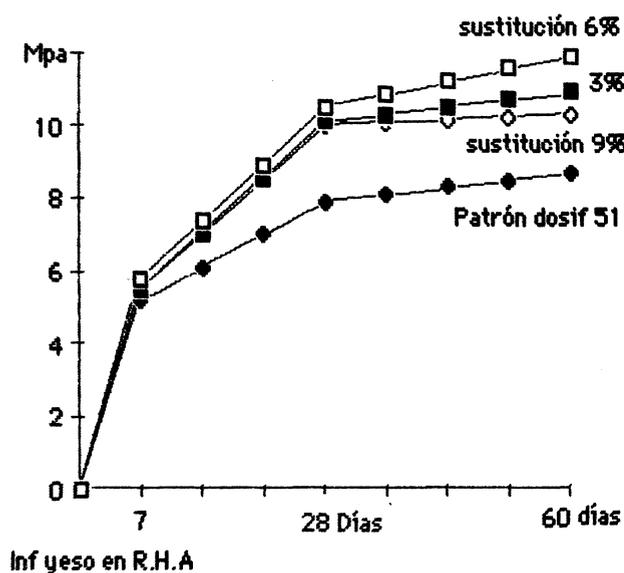


Fig. 9. - Influencia del yeso en R.H.A.

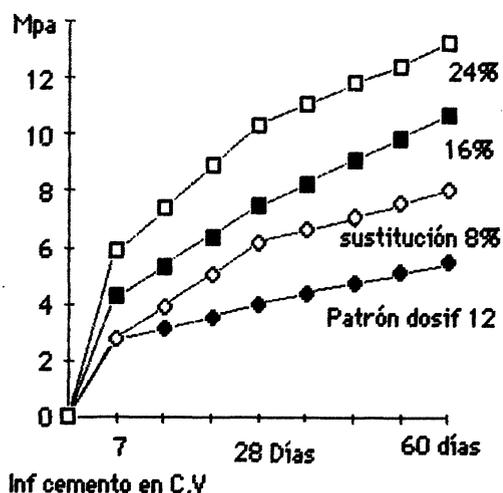


Fig. 10. - Influencia del cemento en Cenizas Volantes.

de resistencias a 7, 30 y 60 días, ocasionada por la sustitución de un 3% de conglomerante por yeso, se mejora relativamente al pasar al 6% y de este valor al 9%, lo que apunta hacia la consecución de mayores resistencias para mayores cantidades sustituidas.

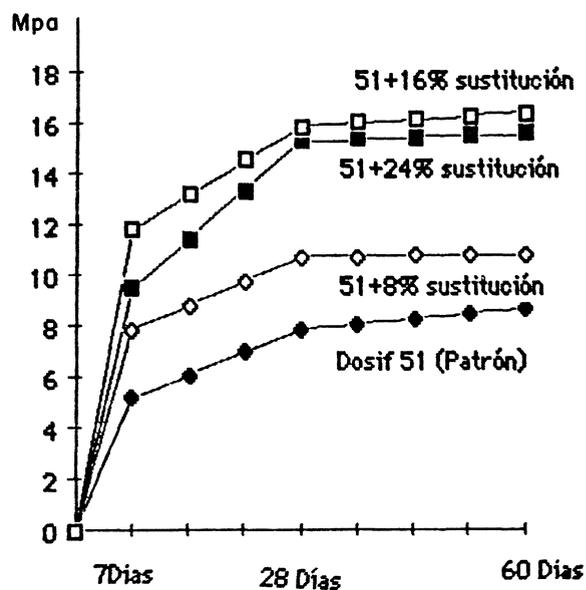


Fig. 11. - Influencia del cemento en ceniza de cascara de arroz.

El efecto es bien distinto en la dosificación 51 a base de ceniza de cáscara de arroz. A todas las edades las resistencias aumentan para sustituciones del 3%, 6% y 9%, presentando para este último porcentaje una caída relativa de resistencia, lo que induce a suponer, a falta de un trabajo más minucioso, que la cantidad de conglomerante sustituible óptima estará entre 3% y 6%.

En las Figuras 10 y 11 se refleja, como era previsible, la beneficiosa influencia de la sustitución de conglomerante por cemento. En el caso de la dosificación patrón 12, los resultados son claros, no así, en el caso de la dosificación 51, a base de ceniza RHA, que muestra una inversión de la tendencia creciente al pasar del 16% al 24%.

10. CONCLUSIONES DIRECTAS

Del conjunto de dosificaciones estudiadas, se pueden deducir una serie de conclusiones inmediatas sobre los aspectos estudiados:

- Aparentemente, resulta viable desde el punto de vista estructural la utilización de este tipo de hormigones en viviendas de baja altura. Los resultados obtenidos no permiten juzgar aspectos: como adherencia, corrosión de armaduras, etc.
- Un hormigón pobre de cemento Portland, supone aproximadamente un 12% de cemento respecto al peso total, para una resistencia de unos 21 MPa, la dosificación 51 con un 16% de sustitución de cal por cemento, equivale a un 2% de cemento respecto al peso total, para una resistencia

aproximada de 16 MPa. Esto supone un consumo 6 veces menor de cemento para una pérdida de 28 % de resistencia.

Por su parte la dosificación 12 con un 24 % de sustitución de cal por cemento, presenta un 5,3 % de cemento respecto al peso total, para una resistencia aproximada de 13 MPa. Esto supone un consumo de cemento sólo 2,26 veces menor para una pérdida del 37 % de resistencia.

- c) Hormigones a base de cal (45 %) y ceniza de RHA (55 %), sin otro tipo de adición, proporcionan resistencias a 7 días del orden de los 5 MPa valor aceptable para edificaciones de poca altura, que son las que nos ocupan.
- Si se adiciona un 16 % de cemento respecto a la cal, es decir, para una dosificación: 29 % de cal, 16 % de cemento y 55 % de RHA, los valores iniciales alcanzan aproximadamente los 12 MPa.
- d) Las sustituciones por yeso perjudican en el caso de la cenizas volantes (pérdidas del 46 % en resistencia) mientras que favorecen a la RHA (incrementos del 27 % en resistencia).
- e) Las sustituciones por cemento favorecen tanto a las cenizas volantes (incrementos del 94 % en resistencia) como a las RHA (incrementos del 64 % en resistencia).
- f) El grado de molienda estará más condicionado por la energía consumida y su costo, que por las mejoras de resistencias obtenidas.
- g) La variable que se ha mostrado más crítica, respecto a la resistencia obtenida, ha sido, en todos los casos, la relación agua/aglomerante.
- h) La ceniza RHA ha dado mejores resultados absolutos que las cenizas volantes, se muestra menos sensible a variaciones en los parámetros estudiados y ofrece un comportamiento más uniforme, por lo que se muestra como un material muy adecuado para su utilización en países en vías de desarrollo de unas determinadas características.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) Primer simposio Nacional del Cemento. Cochabamba (Bolivia) 1981.

- (2) J. SALAS, PERCY CASTILLO, M.^a ISABEL SANCHEZ ROJAS, JANER VERAS: «Empleo de cenizas de cáscara de arroz como adiciones en Morteros». *Materiales de Construcción* n.º 203. IETcc. Julio/sept. 1986. ESPAÑA.
- (3) RAY SMITH: «Rice Husk Ash Cement; Progress in development and aplicación». *Intermediate Technology Development Group Limited*. Londres, 1984.
- (4) UMBERTO COSTA, FRANCO MASSAZA: «Factors Afecting the with lime of italian Pozzolanas». *Revista il Cemento* n.º 3, 1974.
- (5) LUIS ARMANDO ZURITA: «Contribución fisico-química al estudio de los materiales potencialmente puzolánicos». *Centro de Investigaciones de Ingeniería*. Guatemala C. A. Agosto, 1984.
- (6) E. PLOSKONKA: «Aprovechamiento de Materiales puzolánicos en Bolivia». No publicado. 1982, Bolivia.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BIE KUL, SPENCE ROBIN: «Alternative Cements in India». *Intermediate Technology Development Group Limited*. 46 págs. Londres, 1976.
- UNCHS: «Building Lime». *Building Digest* n.º 8. *Central Building Research Institute*. Roorkee 1962.
- UMBERTO COSTA-FRANCO MASSAZA: «Fact tors affecting the reaction with lime of italian pozzolanas». *Revista il Cemento* n.º 3, 1974.
- LUIS ARMANDO ZURITA: «Contribución Fisico-química al estudio de los materiales potencialmente puzolánicos». *Centro de Investigaciones de Ingeniería*. Guatemala C. A. Agosto, 1984.
- E. PLOSKONKA: «Aprovechamiento de los Materiales Puzolánicos en Bolivia. No publicado, 1982.
- F. TRIVIÑO: «Puzolanas».
- UMBERTO COSTA, FRANCO MASSAZA: «Influence of the Thermal on the reactivity of some natural puzzolanas with lime». *Revista il Cemento* n.º 3, 1974.
- L. S. DENT GLASSER, N. KATAOKA: «On the dole of calcium in the alcali agregate reacción» *University of Aberdeen* 1981.
- ROBERT S. BOYNTON: «Chemistry and Technology of lime and limestone». *Interscience Publishers*.
- TANG BIHAO: «Research and aplicación of large-scale precast. Wall-panels made with lime and fly-ash» *CIB* 83, pág. 265, 269.
- RAY SMITH: «Rice husk ash cement; progress in development and aplicación». *Intermediate Technology Development Group limited*. Londres, 1984.
- J. SALAS, M. ALVAREZ, J. VERAS: «Lights/insulating concrete with Rice-Husk». *Cement and Composites*, Sheffield nk 1986.

* * *