

EFICIENCIA DE LA ZEOLITA DE CABO DE GATA, ALMERÍA, EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO (RCD).

Jorge Luis Costafreda Mustelier⁽¹⁾, Benjamín Calvo Pérez⁽²⁾,
Carlos Adolpho Magalhães Baltar⁽³⁾

⁽¹⁾ Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003 Madrid. España. E-mail: costafreda@yahoo.es

⁽²⁾ Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003 Madrid. España. E-mail: benjamin_calvo@yahoo.es

⁽³⁾ Universidad Federal de Pernambuco. Rúa Acadêmico Hélio Ramos s/n. 50740-530. Recife, Brasil. E-mail: camb@ufpe.br

Resumen

El presente trabajo tiene la finalidad de mostrar las ventajas obtenidas con la utilización de zeolita (variedad mordenita) procedente de Cabo de Gata, Almería (España), al ser mezclada con árido reciclado (RCD) procedente de demoliciones urbanas de la Comunidad de Madrid. Los resultados obtenidos han demostrado que los morteros fabricados a partir de mezclas complejas de cemento pórtland, arena normalizada (AN), (RCD) y zeolita poseen gran resistencia mecánica (49,0 Mpa a 7 días y 62,1 Mpa a 90 días). Por otra parte, se ha demostrado que el RCD puede sustituir satisfactoriamente a la (AN) en diferentes dosificaciones sin que esto afecte negativamente la ganancia de resistencias mecánicas. Otro hecho a destacar es que la zeolita sustituye al cemento pórtland en un 25% en la misma mezcla.

Palabras clave: zeolita, mortero, hormigón, cemento, RCD.

Abstract

This paper pretend to show the advantages obtained with the natural zeolite (mordenita variety) from Cabo de Gata, Almeria (Spain), mixed with RCD proceeding from metropolitan demolitions of the Madrid Community. Results have demonstrated that produced mortar with complex mixing of portland cement, normalized sand, RCD and zeolite has a great mechanical resistance (49,0 Mpa to 7 days and 62,1 Mpa to 90 days). In the other hand, it has been demonstrated that RCD can satisfactorily to substitute to normalized sand in different dosage, without this fact has a negative effect on resistances increment. A fact to take into account is that zeolite replaces a 25% of the portland cement in the same mixing.

Key words: zeolite, mortar, concrete, cement, RCD.

1. Introducción

La influencia de la zeolita natural de Cabo de Gata, Almería, en el fraguado de morteros puzolánicos con (RCD), procedente de residuos de demoliciones urbanas, es positiva; con esta mezcla mixta se han alcanzado patrones óptimos de resistencias mecánicas a las edades de 7, 28 y 90 días, adecuándolos a las especificaciones de la norma española UNE-EN 196-1:2005 [1, 2, 5]. Con el propósito de demostrar la capacidad de este agregado natural para aportar resistencias mecánicas, se ha dosificado su presencia en la mezcla cementicia, empleándose cantidades variables de agua y materiales, en dependencia del porcentaje añadido o sustraído (ver tablas 5 y 6).

2. Materiales y métodos

Caracterización de los materiales

Para esta investigación se utilizó una muestra de zeolita natural (SJ-7) procedente de Cabo de Gata, Almería (España), cuya caracterización química y mineralógica se expresa a continuación: SiO₂:68,3%, Al₂O₃:11,95%, CaO:1,15%, Na₂O:2,89%, K₂O:1,38%, MgO:1,27%, Fe₂O₃:1,56% [1, 2]. La muestra empleada está formada por una fase dominante constituida por mordenita (57-97%), esmectita (17-19%) [7]. La zeolita ha sido triturada previamente por debajo de las 63 micras.

Además, se empleó (RCD) procedente de demoliciones urbanas de la Comunidad de Madrid [11], cemento pórtland de alta resistencia inicial resistente a los sulfatos (Cem I 42,5 R/SR) y arena normalizada (AN) tipo (CEN-NORMSAND DIN EN 196-1) (Ver tabla 1).

El análisis de difracción de rayos x demostró que el (RCD) empleado está constituido por una fase principal representada por cuarzo y calcita, y por fases secundarias consistentes en feldespato potásico, tobermorita, portlandita, así como trazas de etringita y moscovita [5, 6]. En la figura 1 se observan los picos que representan cada una de las especies mineralógicas mencionadas.

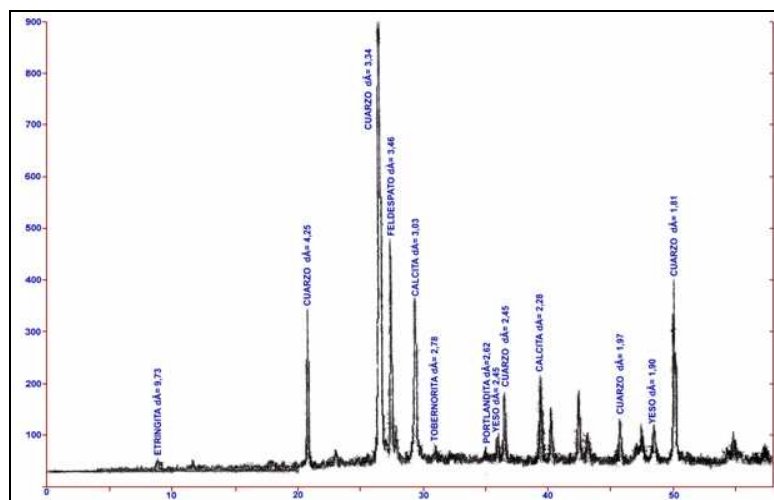


Figura N° 1 Difractograma obtenido del estudio de difracción de rayos x de la muestra de (RCD) empleado en el presente trabajo. (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Tabla N° 1: Composición química, determinada por fluorescencia de rayos x, del (RCD), (AN) y cemento de referencia (CEM I 42,5 R/SR) empleados en el presente trabajo. (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

MUESTRAS	Compuestos anhidros en % de masa											
	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PPC	Total
Árido reciclado	54,17	22,1	1,82	5,86	1,31	-	0,298	1,67	0,293	0,077	12,22	99,86
Arena normalizada (AN)	94,25	0,93	0,88	2,24	0,06	0,059	0,06	0,86	0,141	0,038	0,48	99,52
Cemento Pórtland (*)	20,76	58,5	8,81	5,24	3,05	-	1,16	0,817	0,23	0,11	0,99	99,69

(*) El cemento empleado es del tipo CEM I 42,5 R/SR.

La distribución granulométrica del RCD, representada en la tabla 2 permite destacar la ausencia total de finos.

Tabla N° 2: Redistribución granulométrica del RCD empleado en los ensayos.

TAMAÑO (mm)	MASA RETENIDA RCD (%)
2,0	0
1,0	37,8
0,5	33,0
0,25	19,3
0,125	9,9
- 0,125	0
total	100,0

El estudio de las especies mineralógicas destaca que la (AN) empleada en el presente trabajo posee una alta pureza y una elevada estabilidad física y química, aportada por los minerales que la componen.

Tabla N° 3: Distribución granulométrica de la (AN) empleada en los ensayos.

TAMAÑO (mm)	MASA RETENIDA (%)
	Arena normalizada (AN)
2,0	0
1,0	30,9
0,5	34,4
0,25	11,3
0,125	20,4
0,063	2,9
- 0,063	0,1
total	100,0

El valor de la absorción de agua por inmersión para el (RCD), calculado con el auxilio de la expresión (1) que se ofrece en la línea siguiente, fue de 4,64%.

$$Aw (\%) = [(M_e - M_s) / M_s] \cdot 100 = 4,64 \% \quad (1)$$

El contenido de materias orgánicas se determinó de acuerdo con la norma europea EN-1744-1:1998. La muestra que aparece en la figura 2 corresponde con la que se evalúa en este trabajo, y cumple con las exigencias de la norma mencionada.



Figura Nº 2: Comparación de la mezcla de (RCD) sumergido en hidróxido de sodio con una muestra patrón.

La naturaleza poligénica de los residuos de demolición urbanos hace que éstos posean una amplia gama de coherencia y dureza, cuyo conocimiento es útil a la hora de planificar trabajos de construcción que requieran resistencias apreciables al desgaste [3]. Los cálculos correspondientes, así como los resultados de los mismos se presentan en la tabla 4.

Tabla Nº 4: Medida del coeficiente de friabilidad del (RCD) empleado en este estudio, según la norma española UNE-83-115-89.

Masa inicial - m_1(g)	500,00
Masa final - m_2(g)	406,98
Coeficiente de Friabilidad	
$F.A. = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 = \frac{500 - 406,98}{500}$	18,60%

Donde:

F.A.: es el coeficiente de friabilidad.

m_1 : es la masa de la muestra 1.

m_2 : masa de la muestra 2 o final.

Adición de zeolita natural en morteros puzolánicos con (RCD). Fases de preparación y dosificación del mortero

Para la preparación de los morteros puzolánicos constituidos por zeolita natural-cemento-(RCD)-(AN)-agua destilada, se empleó la norma española UNE-EN 196-1:2005. Se prepararon 6 muestras con niveles de dosificación diferentes, que se explican con detalle en los párrafos siguientes.

Muestra ZRO1: está constituida, según la norma UNE-EN 196-1:2005, por 450 gramos de cemento pòrtland CEM I 42,5 R/SR; 1.350 gramos de (AN) y 225 gramos de agua desmineralizada. Esta muestra no contempla otros agregados que los citados y es el patrón referente con el cual serán comparadas y monitorizadas las evoluciones de los resultados para las distintas dosificaciones a diferentes edades (ver tablas 5 y 6).

Muestra ZRO2: se ha sustituido el 25% del cemento pòrtland por zeolita natural; es decir: 375 gramos de cemento pòrtland y 125 gramos de zeolita natural. El resto de

los componentes del mortero quedan como: 1.350 gramos de (AN) y 225 gramos de agua desmineralizada. En esta muestra se ha producido un ahorro del 25% del cemento p rtland, habitualmente empleado en la fabricación de los morteros ordinarios.

Muestra ZRO3: se mantiene la cantidad de cemento p rtland de la dosificación anterior (375 gramos) y de zeolita natural (125 gramos), pero se introducen 337,5 gramos de (RCD); 1.012,5 gramos de (AN) y 250 gramos de agua. Es evidente el aumento de la cantidad de agua empleada, dada la alta capacidad de absorción del (RCD); por eso, el aumento de 25 gramos más de agua permitió obtener un mortero más trabajable. En esta muestra, además del ahorro del 25% de cemento p rtland, se ha introducido una medida de ahorro de la (AN) correspondiente al 25%.

Muestra ZRO4: se mantiene la misma dosificación anterior para el cemento y para la zeolita natural, y aumenta a 675 gramos la cantidad de (RCD), o sea, la mitad de la cantidad total normalizada para la (AN) (1.350 gramos), quedando una relación de 50/50 y una proporción de agua de 250 gramos.

Muestra ZRO5: el cemento y la zeolita natural mantienen sus anteriores dosificaciones; la cantidad de (RCD) asciende a 1.012,5 gramos, y se reduce el porcentaje de (AN) en la mezcla con la misma cantidad de agua.

Muestra ZRO6: con las mismas proporciones de cemento-zeolita natural en la pasta, se ha sustituido totalmente la (AN) por el (RCD), cuya cantidad en la mezcla es de 1.350 gramos, como establece la norma UNE-EN 196-1:2005 en referencia a la (AN).

Tabla N  5: Variaciones de la dosificación de materiales para la elaboración del mortero puzolánico, medido en por ciento.

Ensayo	Arena normalizada (%)	�rido reciclado (%)	Zeolita (%)	Cemento (%)	Agua desmineralizada (g)
ZR01	100	0	0	100	225
ZR02	100	0	25	75	225
ZR03	75	25	25	75	250
ZR04	50	50	25	75	250
ZR05	25	75	25	75	250
ZR06	0	100	25	75	250

Tabla N  6: Variaciones de la dosificación de materiales para la elaboración del mortero puzolánico, medido en gramos.

Ensayo	Arena normalizada (g)	�rido reciclado (g)	Zeolita (g)	Cemento (g)	Agua desmineralizada (g)
ZR01	1.350,0	0	0	450	225
ZR02	1.350,0	0	125	375	225
ZR03	1.012,5	337,5	125	375	250
ZR04	675,0	675,0	125	375	250
ZR05	337,5	1.012,5	125	375	250
ZR06	0	1.350,0	125	375	250

En las tablas 5 y 6 se presenta de forma detallada la variación de las dosificaciones que se acaban de describir, tanto en gramos como en porcentajes.

3. Resultados y discusión

Resultados de los ensayos de resistencia mecánica a compresión para las edades de 7, 28 y 90 días

Para la determinación de la resistencia mecánica, se han tenido en cuenta las especificaciones de la norma española UNE EN 196-1:2005. Los datos de la tabla 7 han sido los patrones seguidos para monitorizar las resistencias mecánicas obtenidas a las distintas edades.

Tabla Nº 7: Exigencias mecánicas y físicas dadas como valores característicos de las resistencias iniciales y normales, según norma UNE EN 196-1:2005.

Clase de Resistencia	Resistencia a compresión Mpa				Tiempo de principio de fraguado (min.)	Expansión (mm)
	Resistencia inicial		Resistencia normal			
	2 días	7 días	28 días			
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≤52,5	≥75	≤10
32,5 R	≥10,0	-				
42,5 N	≥10,0	-	≥42,5	≤62,5	≥60	
42,5 R	≥20,0	-				
52,5 N	≥20,0	-	≥52,5	-	≥45	
52,5 R	≥30,0	-				

Resistencia mecánica a compresión a la edad de 7 días

A los 7 días de edad se acusan ganancias de resistencia mecánica inicial a compresión, destacándose las muestras ZR01, ZR02 y ZR3. La primera de estas muestras, ZR01, que corresponde al cemento de referencia, experimenta una coherencia significativa donde el valor de resistencia a compresión duplica el valor límite de la norma española UNE EN 196-1:2005 para la edad de 7 días (ver tablas 7 y 8).

Tabla Nº 8: Resultados de los ensayos de resistencia mecánica a compresión para la edad de 7 días.

Nº MUESTRA	DOSIFICACIÓN DEL MORTERO (%)	EDAD	LECTURAS COMPRESIÓN Mpa
ZR01	(100 AN + 100 CEM + 225 H ₂ O)	7 días	41,1
ZR02	(100 AN +75 CEM + 25Pz + 225 H ₂ O)		34,9
ZR03	(75 AN + 25 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		24,9
ZR04	(50 AN + 50 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		20,4
ZR05	(25 AN + 75 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		19,3
ZR06	(0 AN + 100 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		18,3

La muestra ZR02 supera en 14,9 Mpa al valor mínimo de resistencia especificado por la norma citada anteriormente.

La muestra ZR03 es capaz de aportar al mortero una resistencia mecánica que supera en 4,9 Mpa al valor fijado por la norma, ocurriendo lo mismo con la muestra ZR04. En el caso de las muestras ZR05 y ZR06, los valores de resistencias mecánicas iniciales no igualan al valor referente; sin embargo, el pequeño déficit de resistencias de éstas (0,7 y 1,7 Mpa), con respecto a la norma (≥ 20 Mpa), significa que el (RCD) posee propiedades puzolánicas reactivas, capaces de aportar

resistencias al mortero con el ritmo lento en que suelen hacerlo las puzolanas comunes [8] (ver tabla 8 y figura 3).

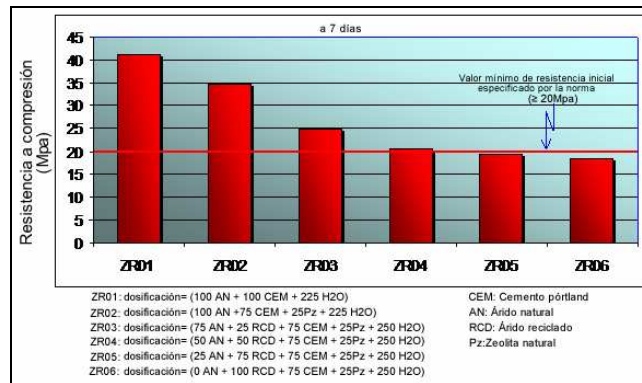


Figura Nº 3: Variación de los valores de la resistencia a compresión para las distintas dosificaciones a la edad de 7 días.

Resistencia mecánica a compresión a la edad de 28 días

La evolución en el incremento de los valores, para la edad de 28 días, del mismo modo que se observó en la tabla 8, evidencia notables aumentos de las resistencias (ver tabla 9); se han comparado estos valores con las especificaciones de la tabla 7 (norma EN 196-1: para 28 días = $\geq 42,5$ - $\leq 62,5$ Mpa), y se ha constatado que todas las muestras cumplen con las exigencias del ensayo para esta edad. El cemento de referencia destaca sobre el resto de muestras y también supera en 12,3 Mpa al valor límite inferior normalizado, que demuestra un proceso de fraguado rápido [4, 10].

Tabla Nº 9: Resultados de los ensayos de resistencia mecánica a compresión para la edad de 28 días.

Nº MUESTRA	DOSIFICACIÓN DEL MORTERO (%)	EDAD	LECTURAS COMPRESIÓN Mpa
ZR01	(100 AN + 100 CEM + 225 H ₂ O)	28 días	54,8
ZR02	(100 AN + 75 CEM + 25Pz + 225 H ₂ O)		51,5
ZR03	(75 AN + 25 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		49,0
ZR04	(50 AN + 50 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		47,6
ZR05	(25 AN + 75 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		45,6
ZR06	(0 AN + 100 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		44,0

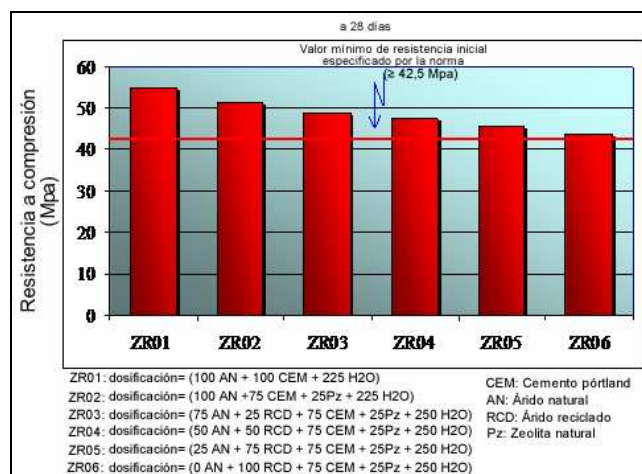


Figura Nº 4: Variación de los valores de la resistencia a compresión para las distintas dosificaciones a la edad de 28 días.

Las restantes muestras también superan la norma, siendo, por tanto, aptas las dosificaciones empleadas en este estudio. Se puede comprobar que la dosificación (75 AN + 25 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H₂O) (ver tabla 9 y figura 4) es la más efectiva de todas las dosificaciones donde aparece el (RCD), siendo por su parte (0 AN + 100 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H₂O) la que aporta las menores resistencias, aunque mantiene igualmente una efectividad adecuada. Es evidente que la presencia de zeolita natural favorece la capacidad hidráulica de la pasta y su proceso de fraguado a los 28 días de edad [2, 4, 6].

Otro detalle a destacar es que la cantidad de agua añadida (250 gramos) a las muestras de mortero ZR03, ZR04, ZR05 y ZR06, es decir 25 gramos más que la ordinaria, que constituye un 11,1% por encima de los 225 gramos normalizados (norma UNE-EN 196-1:2005), no produce interferencias importantes en el aumento de la resistencia mecánica a 28 días. Por el contrario, los incrementos indicados en la tabla 9, referentes a la proporción de agua, parecen corroborar que la zeolita es capaz de regular el grado de hidratación, la humedad y los mecanismos de reacción responsables de las resistencias mecánicas en la masa del mortero [12, 13].

Los resultados de las resistencias mecánicas para las muestras ZR04, ZR05 y ZR06, donde las sustituciones de la (AN) por el (RCD) se incrementan en porcentajes cada vez mayores (50, 75 y 100%), demuestran que el RCD es capaz de sustituir a la (AN), no sólo en calidad reactiva, sino también como material resistente; a pesar de que el contenido en SiO₂ en la composición química del (RCD) sea un 40% menor que en la (AN), y los ritmos de aportes de resistencias más lentos.

Los resultados de la determinación del (IAR) para las muestras de mortero descritas en este trabajo se presentan en la tabla 10. El porcentaje de resistencia mínimo exigido por la norma, conocido como índice de actividad resistente, corresponde a un valor mayor o igual que el 75% del valor de resistencia mecánica normal del cemento de referencia (muestra ZR01) para la edad de 28 días.

Tabla N° 10: Determinación del índice de actividad resistente (IAR) para las muestras de morteros con (RCD) y zeolita natural procedente del yacimiento San José-Los Escullos (Cabo de Gata) (Normas españolas UNE 80303-1:2001 y 80303-2:2001).

Muestra	Rc a 28 días (Mpa)	IAR (%)	Valoración
ZR01*	54,8		
ZR02	51,5	93,9	Positivo
ZR03	49,0	89,4	Positivo
ZR04	47,6	87,2	Positivo
ZR05	45,6	83,2	Positivo
ZR06	44,0	80,3	Positivo

(* Muestra patrón (cemento de referencia))

En la figura 5 se representan las variaciones del índice de actividad resistente, según los resultados de la tabla 10 y su relación con las resistencias mecánicas aportadas por cada muestra a la edad de 28 días. Como consecuencia de la interpretación de los valores obtenidos, se llega a la conclusión de que todos los

resultados son positivos, ya que el (IAR) de todas las muestras supera el límite especificado en las normas empleadas.

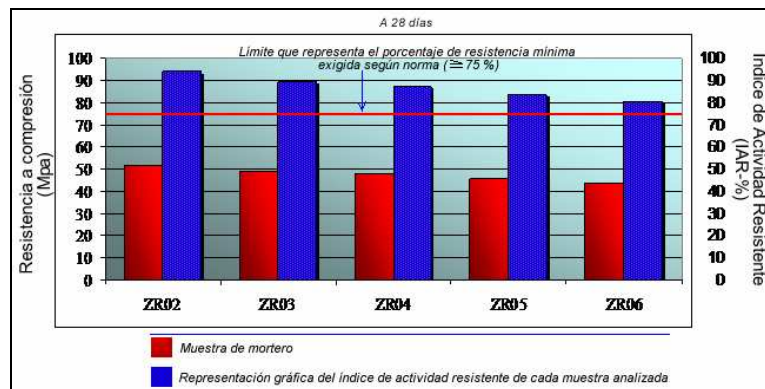


Figura N° 5: Variación del índice de actividad resistente (IAR) en relación a las muestras con diferente dosificación.

Resistencia mecánica a compresión a la edad de 90 días

La evolución de las resistencias mecánicas a compresión para la edad de 90 días exhibe un comportamiento similar al descrito en el epígrafe anterior, donde predomina una fuerte tendencia al incremento de todos los valores. En la tabla 11 la muestra ZR01 alcanza los 69,8 Mpa, que significa un incremento de resistencia en 15 Mpa; esta muestra (cemento de referencia) se comporta normalmente como una mezcla común de cemento pórtland y (AN) [14], exhibiendo una acusada preponderancia en comparación con el resto de muestras.

La muestra ZR02 alcanza también valores anómalos; sin embargo, se considera importante destacar el fenómeno que ocurre con las muestras ZR03, ZR04, ZR05 y ZR06, donde la variaciones en las dosificaciones de (RCD) respecto a la (AN) no han interferido negativamente en el incremento de las resistencias.

Para enfatizar esta conclusión se destaca la muestra ZR03 (62,1 Mpa) con un incremento de sus valores de resistencia de 13,1 Mpa respecto a la edad de 28 días (ver tabla 9); es seguida por ZR04 (59,7 Mpa), valor que se incrementa en un 12,1 Mpa, y, por último, las muestras ZR05 (57,0 Mpa) y ZR06 (53,4 Mpa) con incrementos de resistencias de 11,4 y 9,4 Mpa, respectivamente (ver figura 6).

Tabla N° 11: Resultados de los ensayos de resistencia mecánica a compresión para la edad de 90 días.

N° MUESTRA	DOSIFICACIÓN DEL MORTERO (%)	EDAD	LECTURAS COMPRESIÓN Mpa
ZR01	(100 AN + 100 CEM + 225 H ₂ O)	90 días	69,8
ZR02	(100 AN +75 CEM + 25Pz + 225 H ₂ O)		65,6
ZR03	(75 AN + 25 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		62,1
ZR04	(50 AN + 50 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		59,7
ZR05	(25 AN + 75 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		57,0
ZR06	(0 AN + 100 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H ₂ O)		53,4

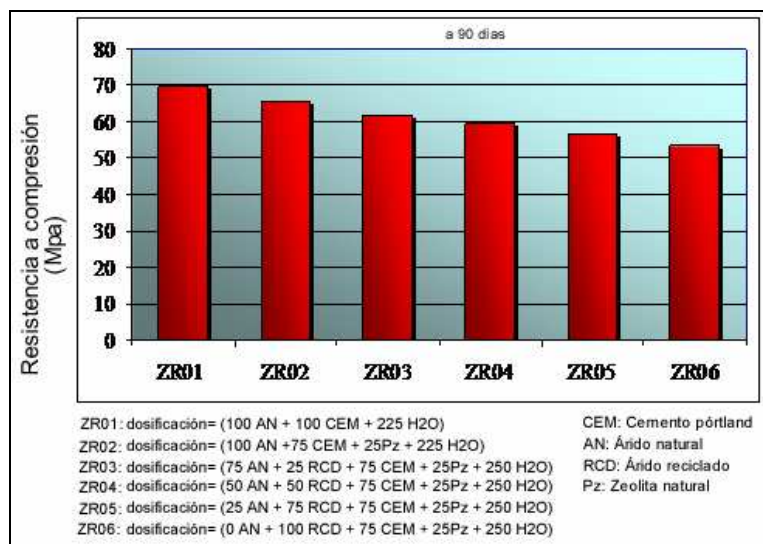


Figura N° 6: Variación de los valores de la resistencia a compresión para las distintas dosificaciones a la edad de 90 días.

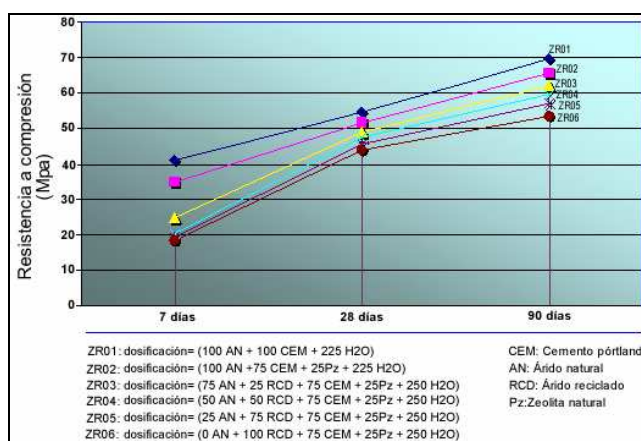


Figura N° 7: Evolución en el tiempo de los valores de la resistencia a compresión para las distintas dosificaciones en relación a diferentes edades de ensayo.

La figura 7 señala el comportamiento de los resultados por muestras, indicando el grado de dependencia entre los distintos niveles de dosificación del mortero y los valores de resistencias obtenidos. El paralelismo que persiste en las trayectorias ascendentes de las curvas, acusa una marcada regularidad en los incrementos de resistencias en el tiempo.

4. Conclusiones

Los resultados de los ensayos mecánicos han corroborado que el (RCD) puede sustituir favorablemente a la (AN) con distintas dosificaciones. Los valores de resistencias, obtenidos del análisis de los morteros, están comprendidos dentro de los parámetros especificados en la norma especializada para las edades iniciales; igualmente cumplen con las especificaciones de resistencias mínimas normales para la edad de 28 días, donde las resistencias mecánicas obtenidas superan, incluso, los valores fijados por dicha norma.

Las proporciones más adecuadas en la dosificación de los morteros estudiados a 28 días son: (75 AN + 25 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H₂O) y (50 AN + 50 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H₂O), en las cuales se introduce un ahorro entre el 25 y el 50% de (AN). Sin embargo, las restantes proporciones: (25 AN + 75 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H₂O) y (0 AN + 100 RCD + 75 CEM + 25Pz + 250 H₂O), que aportan resistencias igualmente adecuadas dado los resultados obtenidos, constituyen un ahorro de (AN) entre un 75 y un 100%. La sustitución del cemento por zeolita natural en un 25%, también representa una cifra importante en el ahorro de este producto.

El empleo conjunto de (RCD), (AN), zeolita y cemento puede constituir un ciclo de productividad, optimización y rentabilidad máxima, donde convergen simultáneamente ciertas variables cuyo peso tiene gran impacto en la sociedad actual. Pueden citarse:

- Gestión y aprovechamiento de los residuos urbanos en las grandes y medianas capitales.
- Racionalización y conservación de los yacimientos de arenas naturales.
- Explotación de las reservas de zeolitas naturales, cuya extracción no infliere costes elevados relacionados con su producción y los impactos medioambientales.
- Menor coste de producción de cemento pórtland y, por consiguiente, menor grado de contaminación ambiental por emisión de CO₂.

Referencias

- [1] Calvo, B., Costafreda, J. L., Estévez, E. Caracterización preliminar de las zeolitas del yacimiento "Los Murcianos" Almería. *V Congreso Internacional de Geoquímica. Soria (España)*. 10pp, 2005.
- [2] Calvo, B., Estévez, E., Costafreda, J. L. Estudio de las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España. *V Congreso Internacional de Geoquímica. Soria (España)*. 10 pp, 2005.
- [3] Calvo, B., Parra, J.L. y Sanabria, M. Morteros de albañilería fabricados con áridos reciclados. *Revista Actualidad Minera*. 1er. Trimestre. Nº 37. 4-6, 2007.
- [4] Campolat, F., Yilmaz, K., Köse, M. M., Sümer, M y Yuurdusev, M. A. Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cemento and Concrete Research*. 1-6, 2003.
- [5] Costafreda, J. L. Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid. 383-416, 2008.
- [6] Costafreda, J.L. y Calvo, B. Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución del fraguado de morteros de cemento. *XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales*, Oviedo. 20 pp, 2007.

- [7] Costafreda, J. L., Calvo, B. y Estévez, E. Propiedades y aplicaciones de las rocas zeolitizadas de Cabo de Gata, Almería España. *2ª Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. 18 pp, 2007.
- [8] Feng, N., Peng, G. Applications of natural zeolite to construction and building materials in China. *Elsevier Cement and concrete Materials*,19. 579-584, 2005.
- [9] González, M. Ataque químico al concreto. *Exposición en el ciclo organizado por el ACI. Capítulo peruano sobre corrosión en estructuras de concreto*. 17 pp, 1991.
- [10] Martínez, W., Chávez, H. y Ostroumov, M. Incremento de la trabajabilidad de concreto hidráulico adicionando cenizas volcánicas en sustitución porcentual a los finos de la mezcla. *Cem. Concr. Res.* 8pp, 2003.
- [11] Parra, J.L. Caracterización de RCD de la Comunidad de Madrid como áridos reciclados para fabricación de hormigones. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid. 323pp, 2001.
- [12] Rabilero, A. Las puzolanas. Cinética de reacciones. *Editorial Oriente*. Santiago de Cuba. 114pp, 1988.
- [13] Rosell, M., Galloso, R. Utilización de la zeolita como material de construcción. Experiencia cubana. *Red CYTED XIII-C*. 10pp, 2001.
- [14] Valdez Tamez, P., Das Roy, T. Villarreal, R. Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. *Ciencia UANL*, vol. VII, Nº 2. Abril-junio, 2004.