

CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE LAS ZEOLITAS DEL YACIMIENTO “LOS MURCIANOS” ALMERÍA.

Calvo Pérez, B¹., Costafreda Mustelier J.L.², Estévez, E.³

¹Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Departamento de Ingeniería Geológica C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid. (benjamin_calvo@yahoo.es), ²Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Departamento de Ingeniería Geológica. C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (costafreda@yahoo.es), Universidad Central de Venezuela

Abstract:

In a volcanic geological environment, constituted by piroxenic andesites, breccias, tuffs, pyroclasts with andesitic and dacitic composition, largely altered by the hydrothermal solutions, there is a mordenite-type zeolite deposit, exploited since many years ago as bentonite. Recent discovery of this zeolite with mordenite content rising to 57%, has changed the genetic vision about that deposit, and new possible approaches have been opened of this mineral in the puzzolanic cement building. This paper intends to give preliminary data about the characterization of this zeolite according to the results of XR Diffraction, XR Fluorescence and Electronic Microscopy (SEM); as well as to emphasize the puzzolanic possibilities of this material, using both chemical and mechanical essays.

Keys words: zeolite, mordenite, puzzolanic, cement.

Resumen:

En un ambiente geológico volcánico, compuesto por andesitas piroxénicas, brechas, tobas, piroclastos de composición andesítica y dacítica, alteradas en gran parte por las soluciones hidrotermales, se encuentra un depósito de zeolita tipo mordenita, explotado desde hace varios años como bentonita. El reciente hallazgo de la zeolita con un contenido de mordenita de hasta 57 %, ha cambiado radicalmente la visión genética del yacimiento y con ello se han abierto nuevas posibilidades de aprovechamiento de este mineral en la fabricación de cementos puzolánicos. El presente trabajo tiene la finalidad de aportar datos preliminares referentes a la caracterización de esta zeolita a través de los resultados de Difracción de Rayos X, Fluorescencia de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido; así como destacar las posibilidades puzolánicas de este material mediante ensayos mecánicos y químicos.

Palabras claves: zeolita, mordenita, puzolánico, cemento.

Ubicación

El área de estudio se encuentra ubicada en la Provincia de Almería, entre los municipios de Los Escullos y San José de Níjar, aproximadamente a 4 kilómetros al noreste de este último siguiendo la línea de la costa. Geográficamente se encuentra entre las coordenadas 2° 4' 08" de Longitud Oeste, y a los 36° 46' 42" de Latitud Norte. Está representada en el Mapa Geológico de España N° 1.060 “El Pozo de los Frailes” a escala 1:50.000 del Instituto Geominero de España (IGME); y en el Mapa Topográfico Nacional de España N° 1.060-1

(del mismo nombre) a escala 1:25.000 del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Los puntos colindantes más notables son, por el Norte: Níjar, El Pozo de los Frailes, Venta del Pobre, Carboneras y Los Escullos; por el Este y por el Sur con el Mar Mediterráneo, por el Oeste con Almería, San Miguel del Cabo de Gata.



Figura Nº1. Plano de ubicación del depósito

El acceso a la zona es óptimo y puede hacerse de dos formas posibles: desde Almería hacia Murcia, por la N 344 / E15 (N-340) hasta la salida de El Retamar, Ruescas y El Pozo de los Frailes hasta San José. Desde Murcia hacia Almería: por la N 344/E-15 hasta la salida Salida 487 hacia Campohermoso, hacia la AL - 100, hasta San José (Ver figura Nº 1).

Geología

Desde el punto de vista regional, el yacimiento se ubica en la Zona Interna de las Cordilleras Béticas, donde coexisten materiales volcánicos y sedimentarios neógenos, y de neoformación cuaternarios. Está enclavado en el extremo suroriental de la Caldera de los Frailes, que se abre



Figura Nº 2. Mapa geológico del yacimiento San José-Los Escullos. (Z) Zeolita; (TD) Tobas dacíticas; (AD) Andesitas piroxénicas; (PAD) Piroclastos y flujos de andesita; (B) Bentonita; (ADB) andesita brechosa; (H) Alteración hidrotermal intensa; (F) Fallas.

hacia el sur en forma de herradura, y su extremo suroeste forma la llamada Punta de la Hoya de la Torre. Las dimensiones del yacimiento son de aproximadamente 250 metros por su eje longitudinal y un ancho de cerca de 130 metros, siendo la profundidad de la excavación de unos 35 metros. El rumbo del yacimiento es NE – SO.

Las variedades litológicas principales a nivel local son: andesitas piroxénicas, piroclastos y materiales de flujo de composición andesítica, tobas dacíticas y andesíticas, zeolita de variedad mordenita y bentonitas. Es común encontrar zonas de alteración hidrotermal en la parte Norte y Sur del área, afectando a las andesitas, piroclastos andesíticos y sus brechas (Ver Figura Nº 2).

Las zeolitas ocupan la parte central del área, las tobas dacíticas yacen en todo el flanco oriental y meridional del yacimiento, circunvalando a las zeolitas casi por completo. Los piroclastos de composición andesíticas ocupan el extremo más oriental, en tanto que las andesitas piroxénicas predominan hacia el flanco occidental. Franjas notables de brechas de composición andesíticas se localizan en el centro del área, extendiéndose en la dirección NE-SE (Ver Figura Nº 2).

Hay grandes sistemas de fracturas de dirección NW - SE que seccionan el yacimiento y que acusan una marcada actividad tectónica.



Figura N° 3 (a,b y c). Carácter de los contactos con las rocas encajantes. (a) Los rasgos de la alteración hidrotermal han sido destruidos por la tectónica posterior; (b) Asimilación parcial del encajante y (c) asimilación total o completa del encajante.

Los contactos entre todas las litologías están fuertemente tectonizados, es posible que después de la actividad hidrotermal la tectónica continuó movilizandolos macizos, ubicándolos en posición paraúctona, con lo cual se han mantenido restos de contactos activos. En la Figura N° 3(a) se muestra claramente un contacto tectónico entre las zeolitas y las andesitas piroxénicas, en donde las alteraciones son de poco o nulo desarrollo, existiendo una fuerte molienda y trituración que han hecho desaparecer los contornos del endo y del exocontacto. Sin embargo, en otros puntos (Ver Figuras N° 3 a, b y c) se observa con claridad el proceso de absorción, disolución y asimilación parcial y total de las rocas encajantes por la acción progresiva de las soluciones hidrotermales.

Las zeolitas tienen contacto con todas las litologías periféricas que constituyen el encajante. Es más difícil establecer, por ejemplo las relaciones de las zeolitas con las dacitas, que son las rocas de caja más próximas a ellas, pero posiblemente la mayor parte de las zeolitas se



Figura N° 4. Afloramiento de zeolita en el nivel superior del yacimiento "Los Murcianos".

formaron a expensas de las tobas dacíticas durante los procesos de alteración hidrotermal. Los contactos con las andesitas piroxénicas parecen ser paraúctonos, con cierta preservación de los rasgos de la alteración hidrotermal (Figura N° 3-a), con asimilación parcial (Figura N° 3-b) y asimilación total o completa (Figura N° 3-c).

Forman grandes afloramientos, principalmente en el flanco Norte y Norte-Noroeste del yacimiento, en estas partes se las puede observar en los grandes taludes y bermas de la cantera, que constituyen actualmente el frente de explotación de la mina (Ver Figura N° 4). Poseen coloraciones blanca, beige, azul pálida y gris claro, con tonalidades azuladas y en ocasiones pardo rojizas ocasionado por reacciones superficiales con el oxígeno del aire. Muy pocas veces aparece cristalina y por lo general forma masas concrecionales residuales de alteración, creando pequeños mantos arcillosos de igual coloración, otras veces son porosas. En los afloramientos se encuentran cruzadas frecuentemente por grietas que se inclinan con ángulos verticales a subverticales, y planos de fallas con dirección 280° - 100° e inclinación de 55° , generalmente al Sur en el flanco occidental del yacimiento, mientras que en el flanco oriental lo hacen hacia el Norte con ángulos de 30° . Estos sistemas de fracturas producen ocasionales desplazamientos. El agrietamiento aumenta en las cercanías de las formaciones vecinas.

Las zeolitas pudieron formarse por irrupción de soluciones hidrotermales de baja y media temperatura en un ambiente geológico altamente poroso, constituido por las brechas y piroclastos, así como por las diaclasas y planos de fallas que la tectónica produjo en todos los litotipos. La zeolita se precipitó en todos los espacios libres conjuntamente con materiales arcillosos tipo esmectita y sericita, y productos silíceos residuales de las soluciones saturadas en sílice. La deposición fue favorecida por la fallas profundas que seccionan el área con dirección NW-SE, las cuales pudieron haber servido de plano de deslizamiento en los tiempos en que se produjo el colapso de la Caldera de los Frailes (Ver Figura N° 2).

Caracterización de las zeolitas

Doce muestras analizadas por los métodos de Difracción de Rayos X, Fluorescencia de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido aportaron resultados positivos de zeolita tipo mordenita (Ver Figuras 5 a, b, c y tabla N° 1), con lo cual se ha efectuado el contorneo del área de las zeolitas en el yacimiento. Estas muestras analizadas están compuestas por mordenita (43-57 %), esmectita (17-19%), plagioclasa (5-12%), feldespatos potásico (3-5%), cuarzo (6-14%), pirita (2%), yeso (trazas), hematita (2%) y materiales amorfos en general (12-14 %).

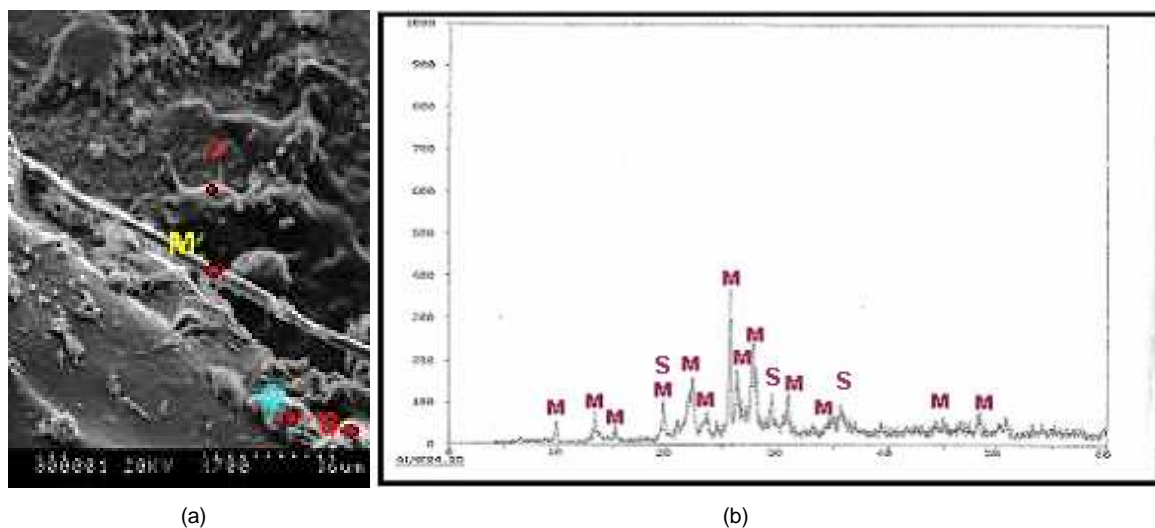


Figura N° 5 (a) y (b). (a) Micrografía de la muestra SJ-20 mostrando la mordenita (M) con hábito acicular, cuarzo (Q), esmectita (S) y gran cantidad de material amorfo, y (b) difractograma de la misma muestra.

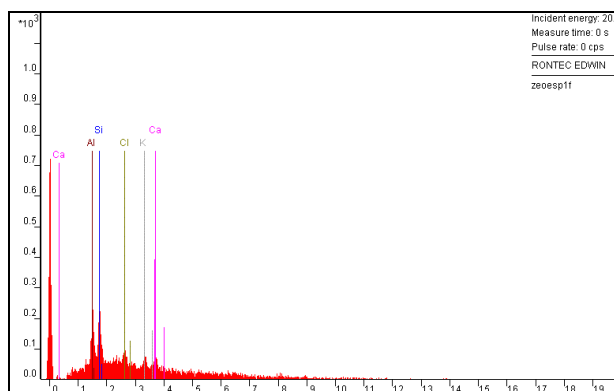


Figura 5 (c). Espectrograma elemental de la muestra SJ-20.

Para el cálculo de la fórmula de la Mordenita se tuvo en cuenta los resultados de los análisis de Fluorescencia de Rayos X (XRF), realizados en el Laboratorio Centralizado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

La relación Silicio / Aluminio (Si/Al) se obtuvo a través de la división de los contenidos en por ciento de ambos elementos, el resultado de esta relación

aportó un ratio Si/Al de 4,34, por lo que se ubica la muestra dentro de los especímenes normales de la mordenita. Para obtener la sumatoria total de todos los elementos que integran

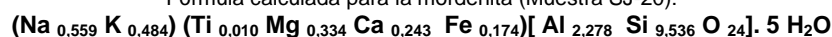
la muestra se sumaron los porcentajes de masa de dichos elementos. El porcentaje de oxígeno se dedujo del valor resultante de la diferencia entre 100, la pérdida de agua (LOI) y la sumatoria total de los elementos detectados en la muestra, mientras que el Factor Oxígeno se obtuvo del producto de la división del % de oxígeno entre el número atómico de dicho elemento.

Tabla N° 1. Resultados del análisis de Fluorescencia de Rayos X y cálculo de la fórmula de la mordenita para la muestra SJ-20

Muestra "SJ-20"					
Oxide	Mass (%)	StdErr	El	Mass (%)	StdErr
SiO2	66,08	0,53	Si	30,73	0,25
Al2O3	13,37	0,38	Al	7,08	0,2
K2O	2,62	0,18	K	2,18	0,15
Na2O	2	0,14	Na	1,48	0,1
Fe2O3	1,6	0,14	Fe	1,12	0,1
CaO	1,57	0,07	Ca	1,12	0,05
MgO	1,550	0,140	Mg	0,936	0,083
Cl	0,229	0,024	Cl	0,229	0,024
TiO2	0,093	0,016	Ti	0,0556	0,0093
Relación Silicio - Aluminio: (Si / Al = 30,73 / 7,08 = 4,34)					

Cálculo de la fórmula de la mordenita (muestra SJ-20)
Σ Elementos = 44,9306
% Oxígeno = 100 - LOI - Σ Elementos
% Oxígeno = 44,1894
Factor Oxígeno = 44,1894 / 16 = 2,7618
KNOWN: 10,88 (%) LOI departed
Si = 30,73 / 28 x 24 / 2,7618 = 9,536
Al = 7,08 / 27 x 24 / 2,7618 = 2,278
Ca = 1,12 / 40 x 24 / 2,7618 = 0,243
Fe = 1,12 / 55,85 x 24 / 2,7618 = 0,174
Mg = 0,936 / 24,3 x 24 / 2,7618 = 0,334
K = 2,18 / 39,1 x 24 / 2,7618 = 0,484
Ti = 0,0556 / 47,9 x 24 / 2,7618 = 0,010
Na = 1,48 / 23 x 24 / 2,7618 = 0,559
Cl* = 0,229 / 35,45 x 24 / 2,7618 = 0,056
H2O = 10,88 / 18 x 24 / 2,7618 = 5,25 Aprox. = 5

Fórmula calculada para la mordenita (Muestra SJ-20):



Se dividió el porcentaje de cada elemento (% de masa) entre su respectivo número atómico, y a su vez este resultado se multiplicó por la cantidad de agua contenida en la zeolita (en nuestro caso asumimos una cantidad de 24 moléculas de H₂O) dividido por el Factor Oxígeno.

La fórmula de la mordenita se obtuvo a través de la agrupación de cationes de Na y K, los iones móviles de Ti, Mg, Ca y Fe, los iones fundamentales de la estructura cristalina del mineral (Al, Si y el O) y por último, en el extremo de la derecha, se ubicó la cantidad de moléculas de H₂O (Ver tabla N° 1)

Los análisis orientados de arcilla corroboraron la existencia de arcilla, preferentemente esmectita, conjuntamente con la mordenita.

Un muestreo posterior realizado en un área situada a 2.000 metros hacia el norte del depósito, arrojó idénticos resultados, concluyéndose que la perspectiva del yacimiento aumenta hacia su flanco Norte en una zona estrecha y alargada relacionada con fuerte alteración hidrotermal.

Propiedades tecnológicas de las zeolitas

Se analizaron 7 muestras (SJ-7, SJ-10, SJ-11, SJ-12, SJ-13, SJ-15 y SJ-20) para conocer sus propiedades puzolánicas y mecánicas. Los métodos empleados son los siguientes:

- Determinación de la actividad puzolánica de la zeolita por conductimetría.

- Ensayos químicos de puzolanidad, según norma española UNE-EN 196-5:1996; de título “Método de ensayo de cementos”, parte 5: Ensayo de puzolanidad para cementos puzolánicos.
- Ensayos del Índice de Keil Modificado.
- Ensayos mecánicos de Resistencia a Compresión según norma española UNE-EN 196-1:1996 de título “Método de ensayo de cementos”, Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

Los ensayos se realizaron en las instalaciones del Laboratorio Oficial para Ensayo de Materiales de Construcción (LOEMCO).

Determinación de la actividad puzolánica de la zeolita por conductimetría.

El ensayo consistió en el estudio de la reacción que se verifica entre el Ca(OH)_2 y el material puzolánico (zeolita) en el sistema sólido-solución, a través de diferentes etapas, tales como: difusión de los iones Ca^{2+} en la solución hasta la superficie de las partículas de puzolana, b) adsorción de los iones de Ca^{2+} en la superficie de las partículas de puzolana, c) difusión de los iones Ca^{2+} a través de la capa de los productos de reacción y d) interacción química entre los iones de Ca^{2+} y la puzolana. El fundamento del método consiste en determinar aumentos o disminuciones de las concentraciones o cantidades de los reactivos en el tiempo; el desarrollo de la reacción da lugar a la formación de productos insolubles y a una disminución de la concentración del Ca(OH)_2 en la solución y en consecuencia a una disminución de la conductividad de la misma.

Para llevar a cabo este ensayo se preparó una solución saturada de Ca(OH)_2 de 160 g/l; se construyó la curva de calibración con soluciones a 100%, 75%, 50% y 25% saturadas, determinando la conductividad que corresponde a cada solución preparada. A continuación se pesaron 3 gramos de muestra de puzolana, previamente molida bajo 0.074 mm, se vertieron en 100 milímetros de la solución saturada de Ca(OH)_2 a 40° C mantenida en un *baño de María*; como paso final se midió la conductividad a diferentes tiempos hasta completar las 96

horas continuas, según: 1 hora, 2 horas, ..., 8 horas, 24 horas, 48 horas, hasta 96 horas (Ver Figura N° 6).

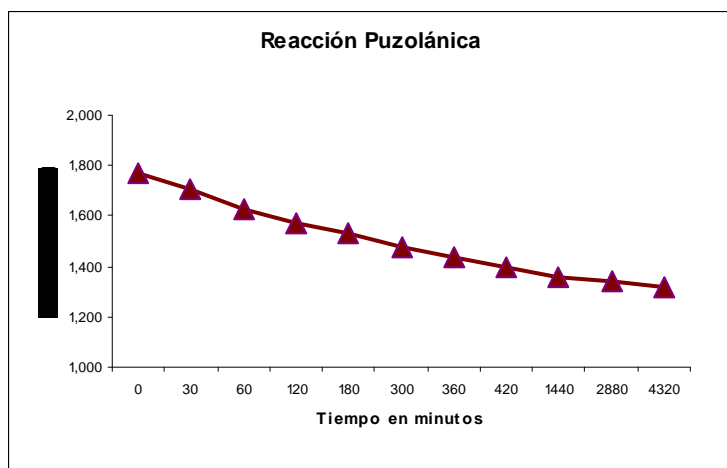


Figura N° 6. Curvas de conductividad de la muestra SJ-20

Los resultados demuestran, a través de la curva de concentración, una disminución estable y paulatina de la concentración de la solución en los primeros tiempos de reacción y un decrecimiento uniforme de la intensidad a medida que transcurre el tiempo, con clara tendencia a alcanzar una concentración de

equilibrio en los intervalos finales de la reacción. Todas las demás muestras analizadas mostraron el mismo comportamiento ante la reacción que la muestra SJ-20 teniendo una variación insignificante. Este comportamiento permite deducir que los materiales empleados

como puzolanas naturales poseen propiedades puzolánicas dentro de los parámetros permisibles para ello.

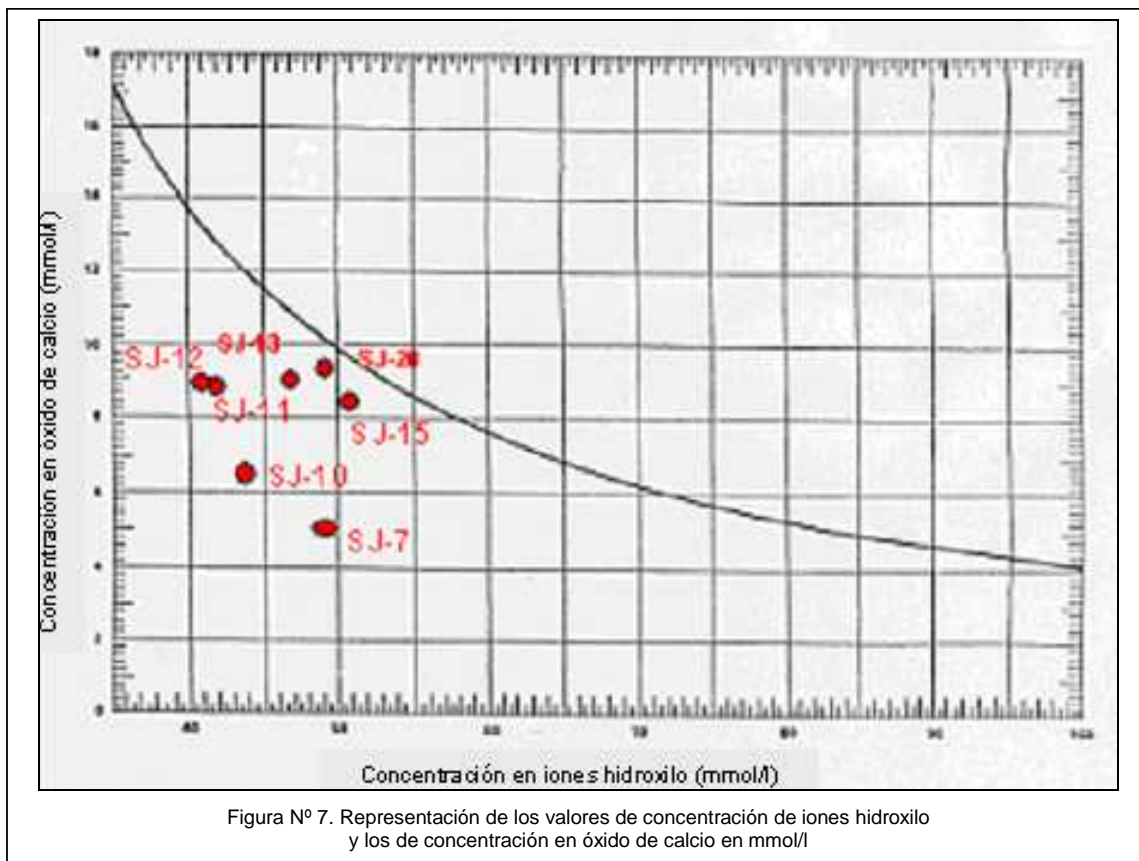
Resultados de los ensayos químicos de puzolanicidad a 7 días

Para la determinación de la puzolanicidad de las 7 muestras antes mencionadas, se calculó la concentración de los iones hidroxilo en la solución así como la concentración en óxido de calcio a una temperatura de 40° C.

Muestra	Tipo de roca	Concentración de iones hidroxilo (mmol/l)	Concentración en óxido de calcio (mmol/l)	Valoración
SJ-7	Zeolita	49,4	5,5	Positiva
SJ-10	Zeolita	43,7	6,3	Positiva
SJ-11	Zeolita	41,5	8,9	Positiva
SJ-12	Zeolita	41,2	8,9	Positiva
SJ-13	Toba dacítica	49,4	9,4	Positiva
SJ-15	Toba dacítica	50,4	8,4	Positiva
SJ-20	Zeolita	46,4	9,2	Positiva

Tabla Nº 2. Comparación y valoración de los valores de concentración de iones hidroxilo y de concentración en óxido de calcio

Al comparar la cantidad de iones hidroxilos que contiene la disolución acuosa en contacto con el cemento hidratado con la cantidad de hidróxido de calcio, necesaria para obtener una disolución acuosa saturada de la misma alcalinidad que la anterior



durante un período de tiempo de 7 días y a una temperatura de 40° C, se puede observar, como muestra la tabla Nº 2, que todos los ensayos resultaron positivos ya que la concentración de hidróxido de calcio en cada caso fue menor que la concentración de saturación en óxido de calcio. Los datos obtenidos corroboran, al igual que el ensayo descrito anteriormente, que las zeolitas y las tobas dacíticas del depósito “Los Murcianos” pueden ser empleados como puzolanas naturales en la fabricación de cementos.

Al observar el diagrama de determinación de la puzolanicidad de la figura N° 7, se advierte que la población de muestras representadas se ubican en las cuadrículas inferiores por debajo de la trayectoria de la curva de concentración de saturación en óxido de calcio, requisito indispensable para que un material cumpla las exigencias normalizadas para ser considerado puzolánico.

Ensayos mecánicos: Resistencia a Compresión

Luego de analizar las citadas muestras por vía química se procedió a someterlas a ensayos mecánicos (Resistencia a Compresión a los 28 días), para relaciones de 70% cemento de referencia (CR) - 30% puzolana (P) y 75% (CR) - 25% (P).

Muestra	Tipo de puzolana	Resistencia a compresión (N/mm ²)	
		(70 % CR, 30 % P)	(75 % CR, 25 % P)
SJ-7	Zeolita	46,9	48,0
SJ-10	Zeolita	45,7	51,8
SJ-11	Zeolita	46,9	50,1
SJ-12	Zeolita	48,1	51,4
SJ-13	Toba dacítica	41,2	44,9
SJ-15	Toba dacítica	42,2	45,8
SJ-20	Zeolita	41,3	47,1

Tabla N° 3. Valores de la Resistencia a Compresión a los 28 días

El cemento de referencia empleado fue el de tipo I 42,5 R/SR.

La Resistencia a Compresión arrojó valores superiores al referenciado (42.5) en 4 muestras (SJ-7, SJ-10, SJ-11 y SJ-12) para la relación 70% (CR)-30% (P), mientras que las 3 muestras restantes (SJ-13, SJ-15 y SJ-20) mostraron valores inferiores al normalizado (Ver tabla N°3).

Para la relación 75% cemento de referencia y 25% puzolana, los valores de Resistencia a Compresión fueron superiores al referenciado (42.5) en todas las muestras analizadas (Ver tabla N° 3).

Ensayos mecánicos: Resistencia a Compresión para cementos resistentes a los sulfatos y al agua de mar

Muestra	Tipo de puzolana	Resistencia a compresión a 28 días	Valoración
		IAR (%)	
SJ-7	Zeolita	80,0	Positiva
SJ-10	Zeolita	86,33	Positiva
SJ-11	Zeolita	83,50	Positiva
SJ-12	Zeolita	85,66	Positiva
SJ-13	Toba dacítica	74,83	Negativa
SJ-15	Toba dacítica	76,33	Positiva
SJ-20	Zeolita	78,50	Positiva

Tabla N° 4. Representación de los valores del Índice de Actividad Resistente para las puzolanas empleadas

La medición de la Resistencia a Compresión sobre los morteros fabricados a partir de estas muestras arrojaron un valor superior al normalizado (75%) para el Índice de Actividad Resistente (IAR). La mezcla 75% / 25% en masa dio un valor de Resistencia a Compresión a la edad de 28 días superior al 75 % de la resistencia del cemento de referencia a la misma edad (Ver tabla N°4). Tan sólo una de las muestras (SJ-13) mostró un valor inferior al 75%, aunque este valor es muy cercano al valor límite permisible.

El cemento de referencia, tanto para el ensayo de puzolanicidad como para el de resistencia, fue el de tipo I 42,5 R/SR.

Al comparar los resultados reflejados en las tablas N° 3 y 4, se pone de manifiesto que los valores superan en ambos casos los normalizados, cumpliendo así con dos de los principales parámetros establecidos para la fabricación de cementos con puzolanas naturales.

Índice de Keil modificado

El experimento sobre los morteros a los 7 días de edad arrojó resultados negativos, indicando que el material empleado como puzolana natural en la mezcla era inadecuado, ubicándolos en la categoría de “pobre” y “muy pobre” para este período de tiempo, con valores de resistencia temprana muy bajos (ver tabla N° 5).

Sin embargo, las probetas destruidas a los 28 días aportaron valores positivos de resistencia,

Muestra	Tipo de puzolana	A 7 días		A 28 días	
		Hi mod (%)	Valoración	Hi mod (%)	Valoración
SJ-7	Zeolita	14,17	Muy pobre	48,82	Buena
SJ-10	Zeolita	0,74	Muy pobre	44,14	Buena
SJ-11	Zeolita	14,17	Muy pobre	48,82	Buena
SJ-12	Zeolita	8,95	Muy pobre	53,51	Buena
SJ-13	Toba dacítica	21,64	Pobre	26,56	Pobre
SJ-15	Toba dacítica	3,73	Muy pobre	30,46	Buena
SJ-20	Zeolita	2,23	Muy pobre	26,95	Pobre

Tabla N° 5. Valores obtenidos para el índice de Keil Modificado para edades de 7 y 28 días, respectivamente

de 7 muestras analizadas 5 poseen la categoría de “buena”, esto demostró que los cementos con puzolanas suelen tener menores resistencias mecánicas a edades cortas, pero en cambio resistencias mayores a edades superiores, generalmente a partir de los 28 días de fraguado e incluso antes.

Valoración de las puzolanas

Los datos obtenidos en los ensayos químicos y mecánicos permiten concluir que los materiales utilizados como puzolanas naturales (zeolita y toba dacítica) cumplen con los requerimientos normalizados, tanto químicos como mecánicos, para fabricar diferentes tipos

Muestra	Tipos de cemento					
	CEM II/B-P	CEM IV/A	II/B-P 42,5/SR	II/B-P 42,5/MR	IV/A 42,5/SR	IV/A 42,5/MR
SJ-7	X	X	X	X	X	X
SJ-10	X	X	X	X	X	X
SJ-11	X	X	X	X	X	X
SJ-12	X	X	X	X	X	X
SJ-13	X	X	-	-	-	-
SJ-15	X	X	X	X	X	X
SJ-20	X	X	X	X	X	X

Tabla N° 6. Tipos de cemento que se pueden fabricar con una relación 75% CR, 25% P

de cementos con una relación de 75% (CR) y 25% (P); entre estos cementos podemos citar: CEM II/B-P, CEM IV/A, II/B-P 42,5/SR, II/B-P 42,5/MR, IV/A 42,5/SR, IV/A 42,5/MR como muestra la tabla N° 6. Excepcionalmente, una sola muestra (SJ-13) reduce su eficacia a los cementos tipo CEM II/B-P y CEM IV/A.

Vale decir que, en base a los ensayos descritos en páginas anteriores, se podrán fabricar con estos cementos los siguientes materiales:

- Hormigones para terrenos o aguas con sulfatos, cimentaciones yesíferas y obras marítimas en entorno agresivo.
- Hormigón armado, hormigón en masa y morteros en general.

Bibliografía

Arribas Moreno, Antonio. 2005. *Rodalquilar*. Revista Bocamina. Nº 15 abril 2005. 90 pp.

Bargar, Keith E., Keith, Terry E.C. 1993. *Calcium zeolites in rhyolitic drill cores from Yellowstone National Park, Wyoming*. Natural zeolites '93: occurrence, properties, applications. 18 pp.

Bosch, Pedro, Schifter, Isaac. 1997. *La zeolita una piedra que hierve*. Fondo de Cultura Económica de México. 73 pp.

Castroviejo, Ricardo. 1999. *Edificios volcánicos y estructuras de colapso en relación con las mineralizaciones auríferas de Rodalquilar: una nueva interpretación*. Depto. Ingeniería Geológica E.T.S.I. de Minas de Madrid Apuntes de clases. 28 pp.

Coombs, Douglas S., Alberti, Alberto, Armbruster, Thomas, et all. 1997. *Recommended nomenclature for zeolite minerals : Report of the subcommittee on zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Minerals Names*. The Canadian Mineralogist 35 pp.

Estévez Fernández, Esteban. 2005. *Estudio de las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España*. Proyecto Fin de Carrera-E.T.S.I. de Minas de Madrid. 84 pp.

Giannetto, Giuseppe, Montes, Arturo, Rodríguez, Gerardo. 2000. *Zeolitas. Características, propiedades y aplicaciones industriales*. Editorial Innovación tecnológica. Caracas. 351 pp.

Tobón, Jorge I. 2000. *Puzolanas en los alrededores de Irra*. Revista de La Facultad de Minas Dyna. Medellín , Nº 129, 7 pp.

Karlsoon, Karaldur R. 1993. *Application of oxygen and hydrogen isotopes to zeolites*. Natural zeolites '93: occurrence, properties, applications. 16 pp.

Rabilero, Antonio. 1988. *Las puzolanas cinética de reacciones*. Editorial Oriente. 114 pp.

Utada, Minoru. *Zeolites in hydrothermally altered rocks*. 1997 and revised 2001. Natural zeolites: occurrence, properties, applications. 18 pp.