

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO PUZOLÁNICO DE ALGUNAS ZEOLITAS DE IBEROAMÉRICA EMPLEANDO EL MÉTODO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Costafreda, J.L.⁽¹⁾, Rosell, M.⁽²⁾, Calvo, B.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Departamento de Ingeniería Geológica. C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid. (costafreda@yahoo.es), (benjamin.calvo.perez@gmail.com), ⁽²⁾ Centro Técnico para el Desarrollo de Materiales de Construcción. Carretera de Casablanca y calle 70, Reparto Bahía. Regla, Ciudad Habana Cuba (mbroselam@gmail.com).

Abstract:

The natural zeolites can behave as activate pozzuolanas in hydroxide of calcium – pozzuolanas systems, in which provokes diminishing in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contents and of the oxide of calcium free in dissolution throughout the time. This paper demonstrates the results of the study about pozzuolanic reactivity of several zeolites from Latin America using the electrical conductivity method. More important conclusion seems to be that mordenite, clinoptilolite-heulandite and stilbite interfere of different way on $\text{Ca}(\text{OH})_2$ concentration in dissolution as well as in the electrical conductivity. In addition, the analyses demonstrate that the pozzuolanic reactivity is an inherent aspect linked to the size of particle, chemical composition and the ionic exchange capacity of these materials. Calculation for pozzuolanic index ranges between 1,05 and 2,35 % for a time limit of 72 hours.

Key words: zeolite, pozzuolanic activity, conductivity, dissolution.

Resumen:

Las zeolitas naturales pueden comportarse como puzolanas activas en sistemas hidróxido de calcio-puzolana, en los cuales provocan abatimientos sensibles en los contenidos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y de la cal libre en disolución a medida que transcurre el tiempo. El presente trabajo demuestra los resultados del estudio de la reactividad puzolánica de algunas zeolitas de Iberoamérica empleando el método de conductividad eléctrica, llegando a la conclusión que muchas especies de zeolitas interfieren drásticamente en la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en disolución y en la conductividad eléctrica de la misma, siendo un aspecto inherente al tamaño de la partícula, la composición química y la capacidad de intercambio iónico de estos materiales. Se han calculado índices de puzolanidad entre 1,05 y 2,35 % para un tiempo límite de 72 horas.

Palabras clave: zeolita, actividad puzolánica, conductividad, disolución.

Introducción

En el presente trabajo se ha aplicado el método de conductividad eléctrica para la evaluación de las propiedades puzolánicas de zeolitas procedentes de diferentes países de Iberoamérica. En disoluciones de cal-puzolana, el desarrollo de la reacción $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -puzolana provoca la

formación de productos insolubles, disminuyendo la concentración de Ca(OH)_2 , esto trae como consecuencia una variación de la conductividad, cuya rapidez de cambio depende de la mayor o menor reactividad de la puzolana (Raask, E. y Bhaskar, M. C. 1975). En una disolución de Ca(OH)_2 los iones del electrolito tienden a transportar carga; cuando se aplica un campo eléctrico a la disolución, los iones experimentan una fuerza que los atrae hacia el electrodo con carga opuesta, y contribuyen con el proceso de conducción; no obstante, la porción de carga transportada está determinada por la concentración iónica, la movilidad intrínseca en el medio, carga, tamaño y la magnitud del gradiente de potencial que influye directamente en la migración de estos iones (Skoog, D. 1990 y Willard, H. 1991).

Materiales y métodos

El método consiste en determinar la variación en el tiempo de la concentración de Ca(OH)_2 en disolución cal-puzolana, mediante la medición de la conductividad eléctrica, la cual es directamente proporcional a los iones Ca^{2+} en disolución, conociendo previamente la correspondencia entre la conductividad y la concentración. La relación entre el Ca^{2+} consumido (concentración de Ca^{2+} a un tiempo t) y la concentración inicial, se considera un índice de la reactividad o puzolanicidad: mientras mayor sea el consumo de Ca^{2+} mayor será la actividad puzolánica del material (Khandilkar, S. y Cursetji, M. 2003).

En el ensayo para evaluar la reactividad puzolánica por el método de conductividad eléctrica, se emplearon muestras de zeolitas procedentes de Cabo de Gata (Almería, España) (mordenita relacionada con procesos hidrotermales del complejo volcánico del sureste de la península ibérica) (Costafreda, J.L., 2008), de Brasil (estilbita, relacionada estratigráficamente con dunas y sedimentos aluviales del Sistema Desértico del Mesozoico, en la Cuenca de Parnaíba) (Rezende, N., 1997), Ecuador (clinoptilolita-heulandita, relacionadas con secuencias sedimentarias de origen marino y volcanoclásticas de la Formación Cayo) (Morante, F. 2004) y Cuba (clinoptilolita-heulandita del yacimiento Tasajeras, Provincia de Villa Clara, donde se asocian a secuencias tobáceas, tobas vítreas, areniscas y lavas de origen volcanosedimentario) (Rosell, M. 2006). En la tabla 1 se ofrecen los datos sobre la composición química de las zeolitas involucradas en este trabajo.

Tabla Nº 1: Composición química de las zeolitas naturales que se analizan y comparan en el presente estudio.

MUESTRA	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Si/Al	PPC
Cabo de Gata	68,30	11,95	1,56	1,15	1,27	1,38	2,89	5	11,33
Brasil	68,79	11,71	3,34	5,25	2,75	1,31	0,216	5,15	5,84
Ecuador	66,00	11,49	2,69	3,42	0,77	0,34	1,98	5,05	12,80
Cuba	64,39	11,76	1,96	3,64	0,61	1,29	1,47	4,80	14,48

Las muestras de zeolitas empleadas fueron micronizadas previamente hasta una finura $< 63 \mu$ (Costafreda, J.L., 2008). Los análisis fueron realizados en el Laboratorio Químico de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid y en el Centro Técnico para el Desarrollo de Materiales para la Construcción (CTDM) en la Habana, Cuba.

Se preparó una disolución patrón de Ca(OH)_2 con una concentración de 10 g/l en agua destilada, la cual se mantuvo en agitación durante 2 horas y en reposo otras 24 horas. Esta disolución fue filtrada y luego valorada con HCl; una vez conocida la concentración de la disolución patrón, se construyó la curva de calibración (ver figura 1) y se determinó la

contribución a la conductividad de los posibles iones del agua destilada. Se midió la conductividad eléctrica de las disoluciones empleadas y fueron calculadas las concentraciones a partir de la concentración de la solución patrón.

Una vez obtenida la curva de calibración se monitorizó la evolución de la reacción puzolánica, midiendo la conductividad desde el tiempo 0 hasta las 72 horas. Finalmente, se prepararon 30 ml de una disolución al 60% de la disolución patrón, con 3 gramos de zeolita natural, a una temperatura de 40°C, sobre los cuales se realizaron mediciones de la conductividad.

Análisis y discusión de los resultados

La ecuación obtenida, y que caracteriza esta correlación a la temperatura de 40°C, es:

$$y = 0,0473x - 0,0111 \quad (1)$$

Donde:

- **x**: representa la conductividad medida en la disolución patrón
- **y**: se refiere a la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

El coeficiente de correlación es:

$$R^2 = 0,9949 \quad (2)$$

Que refleja el grado de dependencia lineal entre la conductividad y la concentración.

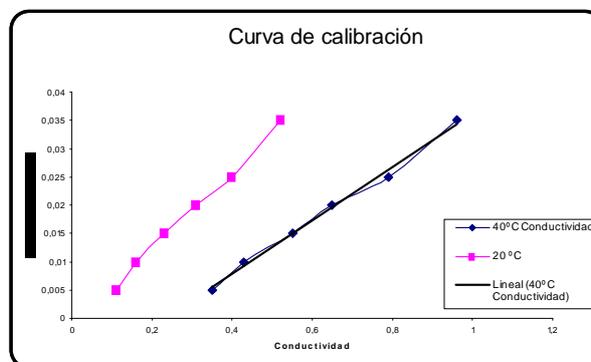


Figura N° 1: Curvas patrones de conductividad a diferentes rangos de temperatura, mostrando la tendencia lineal de la conductividad de la disolución.

Con la medición de la conductividad a los diferentes tiempos, y evaluando la ecuación anterior (1), se ha obtenido la concentración de iones $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en los diferentes tiempos medidos. Para obtener una mayor confiabilidad de los resultados, se realizó el ensayo por triplicado, para cada una de las muestras estudiadas. Los resultados individuales y promedios de las mediciones aparecen en las tablas 2 y 3, así como en la figura 2.

En la tabla 2 se aprecia una estrecha similitud en los rangos de variación de los resultados que aportan las tres muestras de zeolita de Cabo de Gata, que da testimonio de un comportamiento similar. Los valores de la concentración obtenidos con (1) y reflejados en la tabla 3, muestran

también cifras parecidas; por esta razón, se ha calculado el valor medio de cada uno de los resultados obtenidos, tanto para la concentración de Ca(OH)_2 como para la conductividad de la disolución, para efectuar la interpretación de los resultados de forma global.

Tabla Nº 2: Mediciones de la conductividad de la disolución de zeolita natural - Ca(OH)_2 en S/cm a 40°C (muestras SJ-7, SJ-9 y SJ-10, Cabo de Gata).

Tiempo (hr)	0	0,5	1	2	3	5	6	7	24	48	72
SJ-7	0,789	0,768	0,703	0,668	0,613	0,579	0,568	0,543	0,510	0,469	0,382
SJ-9	0,791	0,756	0,705	0,671	0,616	0,580	0,581	0,543	0,515	0,472	0,392
SJ-10	0,778	0,762	0,698	0,665	0,611	0,587	0,571	0,543	0,518	0,461	0,407
Media	0,786	0,762	0,702	0,668	0,613	0,582	0,574	0,543	0,515	0,467	0,393

Las mediciones de la conductividad eléctrica de la solución a partir del tiempo 0 ha experimentado cambios bruscos, con evidente disminución de los valores; así, la primera caída de la conductividad se manifiesta en el intervalo de tiempo comprendido entre los 50 minutos y la primera hora. Entre las 2 y las 3 horas se produce otro cambio negativo apreciable en la disminución de la conductancia específica de la solución, con diferencias de valores que van desde los 0,668 y los 0,613 S/cm; y, por último, otro cambio significativo ocurre en el intervalo de 24 a 48 horas, donde los valores van desde los 0,515 a los 0,393 S/cm.

Tabla Nº 3: Variación en el tiempo de la concentración en Ca(OH)_2 , en mol/l, para una disolución de zeolita- Ca(OH)_2 (muestras SJ-7, SJ-9 y SJ-10, Cabo de Gata).

Tiempo (hrs)	0	0,5	1	2	3	5	6	7	24	48	72
SJ-7	0,0262	0,0252	0,0222	0,0205	0,0179	0,0163	0,0158	0,0146	0,0130	0,0111	0,0070
SJ-9	0,0263	0,0247	0,0222	0,0206	0,0180	0,0163	0,0164	0,0146	0,0133	0,0112	0,0074
SJ-10	0,0257	0,0249	0,0219	0,0204	0,0178	0,0167	0,0159	0,0146	0,0134	0,0107	0,0081
Media	0,0261	0,0249	0,0221	0,0205	0,0179	0,0164	0,0160	0,0146	0,0132	0,0110	0,0075

Los valores de la tabla 3 reflejan una situación parecida a la tabla 2, donde las variaciones en los valores de la concentración de Ca(OH)_2 se verifican exactamente en aquellos intervalos de tiempo donde la conductividad experimenta cambios (ver figura 2). La conclusión más importante radica en el hecho de que la mordenita es la causante de la eliminación del Ca(OH)_2 , provocando un abatimiento de cerca del 28,74% de este compuesto y la disminución de la conductividad del medio en un 50%, para un intervalo de tiempo de tres días.

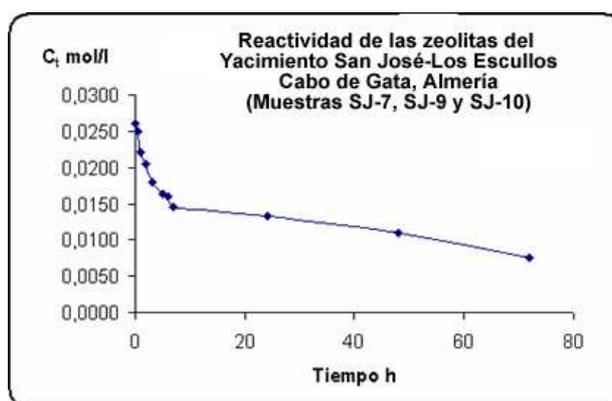


Figura Nº 2: Representación de la variación de la concentración (C_t) en el tiempo (h) de acuerdo a los valores medios obtenidos en las tablas 2 y 3, para la zeolita de Cabo de Gata, España.

La zeolita brasileña exhibe una rápida e intensa reacción con la solución de Ca(OH)_2 entre las edades de 0-7 horas (ver tabla 4 y figura 3), intervalo en el cual se produce una rápida y brusca

inflexión en la curva de concentración, lo que se traduce como una neutralización de la reacción dada por el grado de saturación de la puzolana en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ absorbido.

Tabla N° 4: Mediciones de la conductividad de la disolución de zeolita natural - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en S/cm a 40°C (muestras Brasil 1, 2 y 3, Cuenca de Parnaíba, Brasil).

Tiempo (hrs)	0	0,5	1	2	3	5	6	7	24	48	72
Brasil 1	0,781	0,725	0,716	0,687	0,675	0,632	0,619	0,588	0,578	0,555	0,561
Brasil 2	0,790	0,726	0,715	0,689	0,677	0,634	0,621	0,587	0,577	0,561	0,568
Brasil 3	0,786	0,731	0,712	0,689	0,675	0,635	0,624	0,589	0,576	0,558	0,56
Media	0,786	0,727	0,714	0,688	0,676	0,634	0,621	0,588	0,577	0,558	0,563

En el tramo entre 7-24 horas predomina una morfología horizontal de la curva con una ligera inclinación en dirección al eje de las abscisas, lo que indica que la velocidad de la reacción se ha ralentizado. En el intervalo de 24-48 horas, y debido, posiblemente, a la sobresaturación en iones Ca^{2+} , lo cual crea grandes presiones sobre la superficie activa del grano de puzolana (absorbato), se reanuda la reacción puzolánica a nivel interno de la partícula de puzolana que termina con una neutralización definitiva a la edad de 72 horas (ver figura 3).

Tabla N° 5: Variación en el tiempo de la concentración en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en mol/l, para una disolución de zeolita- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (muestras Brasil 1, 2 y 3, Cuenca de Parnaíba, Brasil).

Tiempo (hrs)	0	0,5	1	2	3	5	6	7	24	48	72
Brasil 1	0,026	0,023	0,023	0,021	0,021	0,019	0,018	0,017	0,016	0,015	0,015
Brasil 2	0,026	0,023	0,023	0,021	0,021	0,019	0,018	0,017	0,016	0,015	0,016
Brasil 3	0,026	0,023	0,023	0,021	0,021	0,019	0,018	0,017	0,016	0,015	0,015
Media	0,026	0,023	0,023	0,021	0,021	0,019	0,018	0,017	0,016	0,015	0,016

En las tablas 4 y 5, se hace evidente que las diferencias entre los valores iniciales y finales, tanto para conductividad como para la concentración, reflejan un bajo nivel reactivo, observándose que a las 72 horas la disolución mantiene un grado apreciable de conductividad eléctrica. Esto se explica por la baja capacidad de la zeolita brasileña para neutralizar $\text{Ca}(\text{OH})_2$, donde el exceso en cationes de Ca^{2+} determina el mayor grado de conductancia específica de la interfase cal-puzolana.

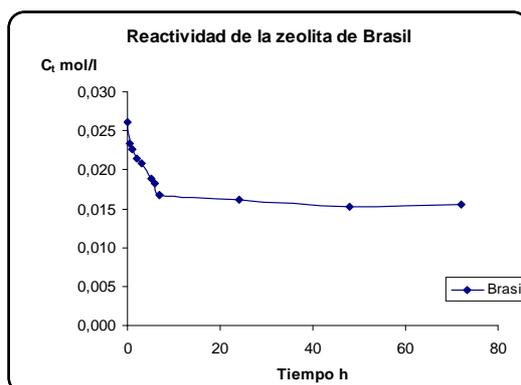


Figura N° 3: Representación de la variación de la concentración (C_t) en el tiempo (h) de acuerdo a los valores medios obtenidos en las tablas 4 y 5, para la zeolita de Brasil.

La zeolita de Ecuador muestra una curva muy parecida a la de Cabo de Gata en los primeros tiempos, aunque el gradiente de su curva es menor en el intervalo 0-7 horas, siendo ligeramente menos activa a esta edad (ver figura 4). No obstante, a las 7 horas ha captado mayor cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que la zeolita española (ver tablas 6 y 7); aquí se produce una

inflexión brusca en la curva que indica, como en el caso de la española, que la reacción se ha completado en su primera fase, es decir, a nivel de la superficie de la partícula puzolánica (Rabilero, A. 1988).

Tabla N° 6: Mediciones de la conductividad de la disolución de zeolita natural - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en S/cm a 40°C (muestras Ecuador 1, 2 y 3, Formación Cayo, Guayaquil Ecuador).

Tiempo (hrs)	0	0,5	1	2	3	5	6	7	24	48	72
Ecuador 1	0,795	0,732	0,719	0,689	0,669	0,621	0,587	0,528	0,486	0,41	0,415
Ecuador 2	0,792	0,738	0,713	0,687	0,668	0,62	0,58	0,521	0,49	0,412	0,410
Ecuador 3	0,790	0,736	0,71	0,691	0,671	0,618	0,586	0,522	0,496	0,411	0,413
Media	0,792	0,735	0,714	0,689	0,669	0,620	0,584	0,524	0,491	0,411	0,413

Entre las 7-24 horas, la zeolita ecuatoriana mantiene su capacidad de reacción, la cual va en aumento a medida que transcurre el tiempo; este incremento reactivo se hace más evidente a las 24 horas, donde el gradiente se acentúa bruscamente, manifestándose una segunda reacción importante, posiblemente por efecto de la presión electrolítica de la solución sobre la partícula puzolánica. Este ritmo de reacción continúa hasta las 48 horas, tiempo en el cual se produce la sobresaturación de la puzolana, produciendo una segunda inflexión de la curva que se interpreta como un cese de la reacción por haber alcanzado el equilibrio de saturación.

Tabla N° 7: Variación en el tiempo de la concentración en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en mol/l, para una disolución de zeolita- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (muestras Ecuador 1, 2 y 3, Formación Cayo, Guayaquil Ecuador).

Tiempo (hrs)	0	0,5	1	2	3	5	6	7	24	48	72
Ecuador 1	0,0265	0,0235	0,0229	0,0215	0,0205	0,0183	0,0167	0,0139	0,0119	0,0083	0,0085
Ecuador 2	0,0264	0,0238	0,0226	0,0214	0,0205	0,0182	0,0163	0,0135	0,0121	0,0084	0,0083
Ecuador 3	0,0263	0,0237	0,0225	0,0216	0,0206	0,0181	0,0166	0,0136	0,0124	0,0083	0,0084
Media	0,0264	0,0237	0,0227	0,0215	0,0206	0,0182	0,0165	0,0137	0,0121	0,0083	0,0084

La zeolita ecuatoriana demuestra mayor pureza y cristalinidad en comparación con la de Cabo de Gata y la brasileña.

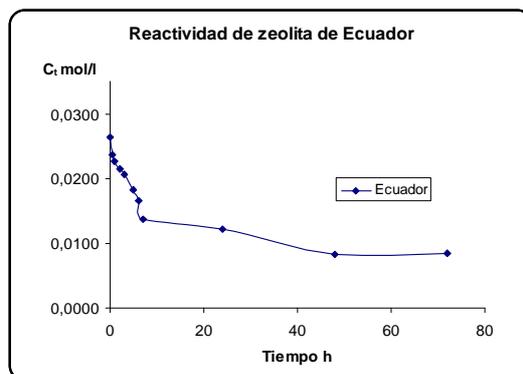


Figura N° 4: Representación de la variación de la concentración (C_t) en el tiempo (h) de acuerdo a los valores medios obtenidos en las tablas 6 y 7, para la zeolita de Ecuador.

El análisis de la zeolita de Cuba ha producido una curva de pendiente muy acentuada en los primeros tiempos, cercana al eje de ordenadas, continua y uniforme, de morfología lineal, lo que significa que es el material más puro y cristalino del total de puzolanas analizadas en este capítulo (ver figura 5 y tabla 8).

En el intervalo de 0-7 horas ha producido, por sí sola, un abatimiento de la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que va desde los 0,0264 hasta los 0,0137 mol/l (ver tabla 9), lo que constituye un

52%, aproximadamente, de la concentración inicial de la solución asimilado en este corto período de tiempo, que confirma la alta reactividad puzolánica de la zeolita cubana.

Tabla N° 8: Mediciones de la conductividad de la disolución de zeolita natural - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en S/cm a 40°C (Muestras Cuba 1, 2 y 3, Tasajeras, Cuba).

Tiempo (hrs)	0	0,5	1	2	3	5	6	7	24	48	72
Cuba 1	0,795	0,732	0,719	0,689	0,669	0,621	0,587	0,528	0,486	0,41	0,415
Cuba 2	0,792	0,738	0,713	0,687	0,668	0,62	0,58	0,521	0,49	0,412	0,410
Cuba 3	0,790	0,736	0,71	0,691	0,671	0,618	0,586	0,522	0,496	0,411	0,413
Media	0,792	0,735	0,714	0,689	0,669	0,620	0,584	0,524	0,491	0,411	0,413

A las 7 horas la inflexión de la curva delata una saturación inicial de la muestra que “frena” la velocidad de la reacción, manteniendo un régimen de actividad moderada hasta la edad de 24 horas. Entre las 24-48 horas la curva adopta una trayectoria en forma de “meseta”, que indica una ausencia de reactividad puzolánica. El segundo evento reactivo queda representado en la curva en forma de una pendiente suave que persiste a las 72 horas.

Tabla N° 9: Variación en el tiempo de la concentración en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en mol/l, para una disolución de zeolita- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (muestras Cuba 1, 2 y 3, Tasajeras, Cuba).

Tiempo (hrs)	0	0,5	1	2	3	5	6	7	24	48	72
Cuba 1	0,0265	0,0235	0,0229	0,0215	0,0205	0,0183	0,0167	0,0139	0,0119	0,0083	0,0085
Cuba 2	0,0264	0,0238	0,0226	0,0214	0,0205	0,0182	0,0163	0,0135	0,0121	0,0084	0,0083
Cuba 3	0,0263	0,0237	0,0225	0,0216	0,0206	0,0181	0,0166	0,0136	0,0124	0,0083	0,0084
Media	0,0264	0,0237	0,0227	0,0215	0,0206	0,0182	0,0165	0,0137	0,0121	0,0083	0,0084

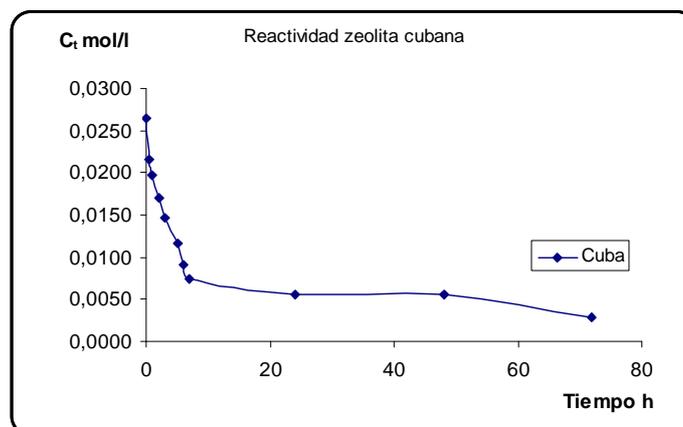


Figura N° 5: Representación de la variación de la concentración (C_t) en el tiempo (h) de acuerdo a los valores medios obtenidos en las tablas 8 y 9, para la zeolita de Cuba.

En la figura 6 se ilustran las variaciones promedios en la concentración de la solución (C_t) para un período de tiempo (h), en el sistema de reacción zeolita- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para cada población de muestras estudiadas, observándose que para un mismo intervalo de tiempo los consumos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ son diferentes, lo cual indica grados diferentes de reactividad puzolánica.

Las curvas muestran comportamientos regulares de reacción puzolánica en el tiempo, condicionados por la composición química de las zeolitas analizadas (ver tabla 1), sin embargo, la zeolita de Cabo de Gata exhibe mayor regularidad en su reactividad; si se la compara con las de Cuba, Ecuador y Brasil, posee mayores contenidos en cationes de Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Al^{3+} , pero menores contenidos en Ca^{2+} , deduciéndose que la saturación de la disolución en CaO posibilita el desencadenamiento de una reacción sostenida con esta zeolita,

la cual compensa el exceso de iones de Ca^{2+} por medio de un intercambio de sus iones alcalinos y alcalino-térreos, al tiempo que propicia una mayor prolongación de su reactividad puzolánica en el tiempo.

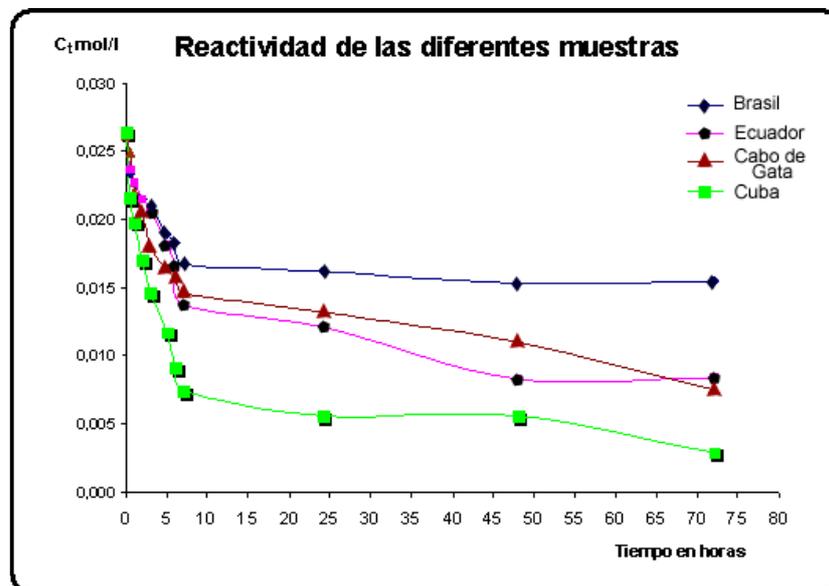


Figura N° 6: Representación de la variación de la concentración (C_t) en el tiempo (h) de acuerdo a los valores medios obtenidos para todas las muestras analizadas.

Si se evalúa el índice de puzolanidad como:

$$I_p = (C_0 - C_t) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

- I_p : índice de puzolanidad.
- C_0 : concentración inicial en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la disolución.
- C_t : concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a un tiempo t de reacción.

Se obtienen, para las diferentes edades, los índices de puzolanidad de las muestras estudiadas como se indica en la tabla 10.

Tabla 10: Índices de puzolanidad a diferentes edades para las muestras estudiadas.

Índices de puzolanidad (%)			
Muestra	24 h	48 h	72 h
Cuba	2,08	2,08	2,3587
Ecuador	1,43	1,80	1,7958
Cabo de Gata	1,28	1,51	1,8568
Brasil	0,99	1,08	1,0532

Evidentemente, los datos recogidos en la tabla 10 señalan la zeolita cubana como la más reactiva, con índices de puzolanidad elevados para las distintas edades. Es seguida por la de Ecuador, cuyos valores sólo superan a la española a las edades de 24 y 48 horas, pero a partir de edades superiores (72 horas), pierde su reactividad puzolánica, siendo superada entonces por las zeolita de Cabo de Gata, que aporta una importante reacción en la disolución entre las 24 y las 72 horas.

La zeolita brasileña, según los valores reflejados en la tabla 10 y su representación gráfica en la figura 6, posee el más bajo índice de puzolanidad, lo cual es un reflejo de la influencia de su composición química (ver tabla 1).

En la figura 7 aparecen las curvas construidas a partir de los índices de puzolanidad de las muestras analizadas. La curva que representa la zeolita de Cabo de Gata se ajusta adecuadamente a la línea de tendencia, factor que destaca el carácter reactivo uniforme de esta puzolana en el tiempo. Las curvas que identifican a las zeolitas de Cuba y Ecuador manifiestan un ajuste menos completo, acoplándose a la línea de tendencia con dos de sus tres puntos, mientras que la de Brasil lo hace con un solo punto de apoyo, demostrando un comportamiento reactivo más disperso.

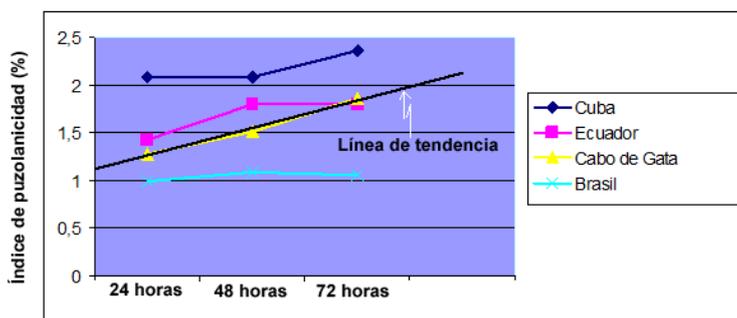


Figura N° 7: Variación de los índices de puzolanidad en el tiempo para las distintas zeolitas analizadas y ajustes de uniformidad estándar con la línea de tendencia.

Con la interpretación de los resultados obtenidos se pone de manifiesto la relación directamente proporcional que existe entre el índice de puzolanidad, la pérdida por calcinación y la relación silicio-aluminio en los distintos comportamientos puzolánicos de las muestras estudiadas.

Conclusiones

El método para la determinación de la reactividad puzolánica por vía conductimétrica reproduce satisfactoriamente las propiedades puzolánicas de los materiales empleados, facilitando la discriminación entre ellos de acuerdo a su comportamiento reactivo.

El método permite crear una correspondencia directa entre la composición química de las zeolitas, su grado de pureza y arreglo cristalino, aspecto de gran importancia porque explica el grado de dependencia entre las características de un material puzolánico y su grado de reactividad.

El índice de reactividad puzolánica de las zeolitas empleadas puede depender también, además de su pureza y calidad, de la complejidad de su composición, donde los diferentes compuestos que las forman tienen respuestas de reacción diferentes en contacto con la disolución saturada en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el tiempo, influyendo en la velocidad y en la duración de dicha reacción.

La capacidad de intercambio iónico de las zeolitas empleadas ha influido radicalmente en la intensidad de las diferentes reacciones, siendo más efectivas, en orden de categoría, la cubana,

seguida de la ecuatoriana, cuya capacidad como intercambiadores iónicos superan con creces a las zeolitas española y brasileña.

El comportamiento de las curvas de concentración (Ct) del Ca^{2+} para las zeolitas española y cubana, entre las edades de 48-72 horas, y presumiblemente a edades superiores, demuestra que la reacción puzolánica es un proceso que persiste en el tiempo, lo que hace de estos materiales importantes colectores de iones Ca^{2+} durante el fraguado de los cementos, neutralizando los excesos de este producto y propiciando la formación de fases químicamente estables y neutras que aportan gran resistencia.

El grado de finura de los materiales empleados ($< 63 \mu$) favorece positivamente la reacción entre la puzolana y la disolución, debido a la gran superficie específica activa del material finamente molido, produciendo el fenómeno de adsorción mediante el cual el Ca^{2+} de la solución es atraído y fijado en la superficie y en el interior de la partícula.

Bibliografía

Costafreda, J. L., 2008. *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.

Costafreda, J.L. y Calvo, B. (2007). *Calidad de las rocas zeolitizadas de Cabo de Gata como agregados activos en cementos puzolánicos resistentes a los sulfatos y al agua de mar*. V Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Panamá. 13 p.

Costafreda, J. L., Calvo, B. y Estévez, E. (2007) *Propiedades y aplicaciones de las rocas zeolitizadas de Cabo de Gata, Almería España*. 2ª Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. 18 pp, 2007.

Khandilkar, S. y Cursetji, M. (2003). Assesmnt of pozzolanic reactivity – an Attempt on formulating a pozzolanic index. *Proceedings of the 4th International Congress on the Chemistry of Cement*. In: Greves and Owens (Editors), Durban. 10 p.

Morante, F. (2004). *Las zeolitas de la costa de Ecuador: geología, caracterización y aplicaciones*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 307 p.

Rabilero, A. (1988). *Las puzolanas. Cinética de reacciones*. Editorial Oriente. Santiago de Cuba. 114 p.

Raask, E. y Bhaskar, M.C. (1975). *Puzolanic activity of pulverized fuel ash*. *Cem. Concr. Res.* (5) pp. 363-376.

Rezende, N. (1997). *Argilas nobres e zeolitas na bacia do Parnaíba*. CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Série Diversos, N° 02. 53 p.

Rosell, M. (2006). *Zeolitas naturales cubanas. Reactividad puzolánica. Uso en adiciones para hormigones*. Tesis Doctoral. Centro Técnico para el desarrollo de Materiales de Construcción. 123 p.

Skoog, D. A. (1990). *Análisis instrumental*. Segunda edición, México. pp. 671-680.

Willard, H. (1991). *Métodos instrumentales de análisis*. Grupo editorial iberoamericano, México. pp. 743-772.