



DR. MICHELINE REGOURD  
 "L'ACTIVITE THERMIQUE"  
 Sr. Guido Geymer  
 C. A. Química Integrada  
 Valencia, Venezuela

B I O G R A F I A

La reactividad de cuatro puzolanas de origen y composición diferentes ha sido estimada por pruebas químicas (cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  reactivo medida mediante la difracción de rayos X y análisis térmicos diferenciales en pastas con cementos mezclados) y mediante ensayos de resistencia en barras de mortero ISO. La evolución de la microestructura de estos materiales se ha seguido con un microscopio electrónico de barrido.

Según los análisis mineralógicos, dos puzolanas son principalmente -- sílicas y vítreas (silice sedimentario y una aleación de ferro-silicio con -- polvo de sílice). Otra es de origen volcánico (feldespato y vidrio) y la última es una ceniza volante de una planta generadora de electricidad.

La medición de la resistencia a la compresión es la estimación más -- segura de la puzolanidad de un producto ya sea natural o artificial. Esta -- estimación puede ser obtenida en un período muy corto con mortero ISO tratado -- térmicamente.

El polvo de sílice, es un residuo de la industria de aleaciones Fe-Si y es la puzolana más reactiva encontrada en este estudio.

"THE INFLUENCE OF PULVERIZED FUEL ASH  
 ON THE EARLY AND LONG TERM STRENGTH  
 OF CONCRETE"  
 Mr. J. G. Cabrera  
 Lecturer, Department of Civil Engineering,  
 the University of Leeds, E. K.

REACTIVIDAD HIDRAULICA DE VARIAS PUZOLANAS

Dra. Micheline Regourd\*, B. Mortureux  
 y E. Gautier.

RESUMEN

La reactividad de cuatro puzolanas de origen y composición diferentes ha sido estimada por pruebas químicas (cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  reactivo medida mediante la difracción de rayos X y análisis térmicos diferenciales en pastas con cementos mezclados) y mediante ensayos de resistencia en barras de mortero ISO. La evolución de la microestructura de estos materiales se ha seguido con un microscopio electrónico de barrido.

Según los análisis mineralógicos, dos puzolanas son principalmente -- sílicas y vítreas (silice sedimentario y una aleación de ferro-silicio con -- polvo de sílice). Otra es de origen volcánico (feldespato y vidrio) y la última es una ceniza volante de una planta generadora de electricidad.

La medición de la resistencia a la compresión es la estimación más -- segura de la puzolanidad de un producto ya sea natural o artificial. Esta -- estimación puede ser obtenida en un período muy corto con mortero ISO tratado -- térmicamente.

El polvo de sílice, es un residuo de la industria de aleaciones Fe-Si y es la puzolana más reactiva encontrada en este estudio.

\* Departamento de Microestructuras, C.E.R.I.L.H., Paris, Francia

## INTRODUCCION

Las puzolanas han sido definidas como materiales aptos para reaccionar con cal en presencia de agua y para formar compuestos con propiedades aglomerantes (1). Las puzolanas naturales son de origen volcánico o sedimentario. Las volcánicas, son ya sea cristalizada conteniendo ceolita o vítreas con inclusiones cristalinas. Las sedimentarias, pueden ser arcillas activadas por quemado o tierra de diatomeas constituida por esqueletos silicosos. Las puzolanas artificiales tales como la ceniza volante son esencialmente vítreas.

La cantidad de cal requerida por las puzolanas, varía con sus características físicas y químicas (2). En un período corto, la actividad depende principalmente de la superficie específica y para un período mayor del contenido reactivo del sílica y alúmina.

En nuestro estudio, comparamos cinco puzolanas de origen y naturaleza diferente. Dos eran naturales, una volcánica de Volvic (Francia), y la otra sedimentaria, procedente de Marruecos. Las otras tres fueron artificiales, la primera una ceniza volante de la estación generadora de electricidad en Violaines (Francia) y las otras dos, polvo silicoso del residuo de la aleación de Fe-Si de Francia o de Islandia.

La reactividad de estas puzolanas ha sido determinada por (i) las mediciones de la resistencia a la compresión de los morteros ISO, (ii) la cantidad de cal que reaccionó en las pastas de cemento y mortero, que fue medida mediante la difracción de los rayos X y análisis térmicos diferenciales. La evolución de la microestructura de los materiales se siguió con un microscopio electrónico de barrido.

## ANALISIS QUIMICO Y MINERALOGICO DE LAS PUZOLANAS.

Los resultados del análisis químico de las cinco puzolanas se muestran en la Tabla 1. La difracción por rayos X y la microscopía caracterizan estos productos de la siguiente manera:

- 1.- La puzolana de Volvic está constituida de 20% de vidrio y 80% de fases cristalizadas, tales como andesita, cuarzo, piroxeno y magnetita. Se presentan en forma granular con aristas angulares. La superficie específica Blaine (S.E.B.) es de 4000 cm<sup>2</sup>/g.
- 2.- La puzolana silicosa de Marruecos resultó muy finamente molida (S.E.B. de 7,000 cm<sup>2</sup>/g). Además de su constituyente principal, ópalo microcristalizado, coexisten otras formas de sílica bien cristalizada (cuarzo y cristobalita), dolomita y varios fosfatos.
- 3.- La ceniza volante es esencialmente vítrea. Los raros minerales cristalizados son mullita, silimanita, magnetita y cuarzo. La ceniza volante fue usada como materia prima y tuvo una superficie específica Blaine de 2,500 cm<sup>2</sup>/g.

- 4.- El polvo de sílica es enteramente vítreo. Se manifiesta en la forma de nódulos muy finos, con un tamaño promedio del orden de 0.3  $\mu$ m.

## COMPARACION DE LA REACTIVIDAD DE LAS PUZOLANAS.

En su Reporte Principal sobre la hidratación de cementos puzolánicos en el Congreso de París, R. Sersale (3), K. Takemoto y H. Vchikawa (4) han mostrado que la reactividad de las puzolanas está ligada a la fijación de Ca (OH)<sub>2</sub>, la correlación entre la cantidad de cal reactiva y la resistencia es baja. Los autores han concluido que la cantidad de puzolana para ser usada en el cemento, deberá determinarse por ensayos de resistencia y no por examen químico de reactividad. En nuestro estudio, hemos usado los dos métodos para estimar la actividad hidráulica de las puzolanas. Entre algunas de ellas, tales como la ceniza volante, reaccionan lentamente a los 20°C. Debido a esto, tratamos pastas de cemento a 50°C durante 5 días y morteros ISO a 80°C desde algunas horas, hasta varios días. Para determinar si el ensayo acelerado por tratamiento térmico da una fiel indicación del comportamiento de la puzolana en un período largo a la temperatura ordinaria, hicimos un estudio preliminar a 20, 60 y 80°C en dos cementos mezclados con un 30% de ceniza volante como puzolana, correspondiente a dos cementos Portland de composición diferente.

## ENSAYES DE RESISTENCIA DE LOS MORTEROS ISO TRATADOS TERMICAMENTE.

Las muestras de mortero ISO (4 x 4 x 16 cm), después de un tiempo de prefraguado de 4 horas, fueron sumergidas en agua la que alcanzó la temperatura escogida a una velocidad de 20°C/hora. La velocidad de enfriamiento fue de 30°C/hora. A una temperatura de 20°C se midieron las resistencias a la compresión hasta los 90 días para tener una apreciación de sus aumentos en general. A los 60 y 80°C, se continuaron las mediciones hasta que las variaciones fueron muy pequeñas, es decir, menores del 5% mientras el tiempo se duplicó.

## CENIZA VOLANTE MEZCLADA CON CEMENTOS

La figura 1 (a) muestra el rápido aumento de las resistencias del cemento mezclado a los 60 y 80°C, pero los valores máximos obtenidos son inferiores a aquellos medidos a la temperatura ambiente.

La figura 1 (b) proporciona la evolución del grado de avance al cual da un valor igual a 1 cuando la resistencia no varía más de manera significativa (este avance se mide al final del período inactivo). Las curvas a los 20, 60 y 80°C son semejantes: El valor  $\alpha = 1$  se obtuvo once veces más rápidamente a los 60°C que a los 20°C y treinta veces más rápidamente a los 80°C que a los 20°C. La semejanza de las relaciones siguen la ley de Arrhenius como en el caso del calor de hidratación (5). Sin embargo, un factor de reducción deberá ser usado por cada valor relativo de la resistencia. La reducción se encuentra entre 0.7 y 0.8 para los dos cementos mezclados con ceniza volante y no es muy diferente de la relación R<sub>1</sub>/R<sub>2</sub> si R<sub>1</sub> es la resistencia después de 40 horas a 80°C y R<sub>2</sub> la

resistencia a los 90 días a 80°C. En esta forma, la resistencia después de un tratamiento térmico corto, puede darnos una estimación de la resistencia a largo plazo a 20°C. Esto fue previamente ensayado en varios tipos de cemento, cementos Portland y cementos mezclados (5).

De este modo, los tratamientos térmicos pueden considerarse como un ensayo acelerador de la reactividad de la ceniza volante. Esto se muestra en las figuras 2 y 3 en las cuales las resistencias de los morteros de cemento con ceniza volante son comparadas con las de los morteros de cemento mezclado con un 30% de material inerte, calculado después por la Ley de Féret.

$$R = k \left( \frac{c}{c + w + v} \right)^2$$

donde c, w, v, son respectivamente los volúmenes absolutos de cemento, agua y vacíos en un volumen unitario de mortero, y k es una constante que depende de la naturaleza del cemento.

Esto nos muestra igualmente, que un tratamiento de alrededor de 40 horas es suficiente para apreciar la puzolanicidad de la ceniza volante, la cual reacciona lentamente a la temperatura ambiente durante los primeros tres meses. (Figs. 4 y 5).

La comparación de la reactividad de puzolanas de origen diferente será posible en un período relativamente corto. Este es el método que hemos escogido para probar el comportamiento de muestras puzolanas naturales y artificiales.

#### CEMENTOS PUZOLANICOS

##### Puzolanas naturales

El comportamiento de los dos materiales naturales, la puzolana volcánica de Volvic y la sílica sedimentaria marroquí se comparan en la Fig. 6.

El sílice marroquí, reacciona más rápidamente que la puzolana de Volvic pero las diferencias se reducen considerablemente después de 40 horas. La puzolanicidad puede calcularse a partir de las diferencias entre las puzolanas y el cuarzo inerte. La Fig. 6 también muestra que las resistencias del mortero hecho con cemento mezclado con un 30% de cuarzo (S.E.B. 3200 cm<sup>2</sup>/g), son muy cercanas a las calculadas por la Ley de Féret.

Algunos resultados diferentes se obtuvieron con otro cemento Portland que entró en la composición de los cementos mezclados. Este nuevo CPN fue más reactivo que el anterior como se muestra en la figura 7 para compararse con la figura 6. Las dos puzolanas naturales son muy parecidas y no muestran diferencias significantes a edades tempranas. La puzolana de Volvic, sin embargo, desa-

rolla una resistencia un poco mayor que el sílice marroquí. Es posible que esta diferencia en el comportamiento, esté asociada a la naturaleza del clinker. Este aspecto está siendo estudiado.

##### Puzolanas artificiales

Las resistencias de morteros con ceniza volante son cercanas a las de los morteros con cemento Portland (Fig. 7). Los polvos de sílice, ya sea proveniente de Francia o de Islandia, dan resistencias muy altas, mucho muy superiores a aquéllas de cemento Portland. Para una relación A/C = 0.5, la adición de un agente reductor de agua (1% por peso de cemento) presenta una gran facilidad en el colado de estos morteros para una misma consistencia, los polvos de sílica requieren una mayor relación A/C debido a su muy alta superficie específica (6).

Conforme a los resultados reportados en la figura 7, la clasificación de la puzolana en reactividad decreciente es como sigue:

- 1.- Polvo de sílice.
- 2.- Ceniza volante.
- 3.- Puzolana volcánica de Volvic, sílice marroquí.

Estos resultados fueron comparados con aquéllos obtenidos por medio de la determinación de la cantidad de cal que reaccionó con las puzolanas en pastas de cemento y morteros.

#### ANALISIS QUIMICO DE LA PUZOLANICIDAD.

La cantidad de cal que reaccionó con las puzolanas fue determinada por la difracción de rayos X y por análisis térmico diferencial.

##### Pastas de cemento

Las pastas de cemento preparadas con el mismo cemento Portland estudiado en los morteros tratados térmicamente (Fig. 7) fueron mezcladas con una relación A/C = 0.30, excepto para los polvos de sílica, los cuales demandaron una relación A/C = 0.4 para la misma consistencia. Minicubos (de 1.27 cm) fueron tratados a 50°C durante 5 días. Después de este período, la cantidad de Ca(OH)<sub>2</sub> -- contenida en los diferentes cementos conduce a la siguiente clasificación:

- Cemento Portland	15% por peso
- Cemento mezclado	
70% CPN + 30% puzolana volcánica de Volvic	9%
" " + 30% ceniza volante	9%
" " + 30% sílice marroquí	7%
" " + 30% polvo de sílica	0%