

¿QUÉ ES UNA PUZOLANA? ^{(1), (2)}

Materia esencialmente silicosa que finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes (sílice - alúmina) capaces, a la temperatura ordinaria, de fijar el hidróxido de cal para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas.

Las puzolanas pueden clasificarse:

- Puzolanas naturales:
- Materias de origen volcánico
- Materias sedimentarias de origen animal o vegetal.
- Puzolanas artificiales:
- Materias tratadas (tratamiento térmico 600 y 900°C.
- Subproductos de fabricación industrial
- Cenizas volantes
- Humo de sílice
- Arcilla naturales (subproductos de la industria del ladrillo cocido)
- Ceniza de cascarilla de arroz
- Escorias granuladas de industrias metálicas no ferrosas

1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

La actividad puzolánica se refiere a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que la puzolana puede combinar y la velocidad con la cual ocurre esta reacción.



La actividad puzolánica depende: de la naturaleza y proporción de las fases activas presentes en la puzolana (composición mineralógica), de la relación cal – puzolana de la mezcla, de la finura (o superficie específica) de la puzolana y de la temperatura de la reacción. Los productos de reacción puzolana/cal generalmente son del mismo tipo que los productos de hidratación del Cemento Pórtland: Silicatos Cálcicos Hidratados (CSH), Aluminatos Cálcicos Hidratados (CAH) y Sílico - Aluminatos Cálcicos Hidratados (CSAH).

¹ Calleja, J., "Las Puzolanas", Separata de la Revista ION Vols. XXIX y XXX, Madrid, 1968.

² Salazar, A., "Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos", 3ª edición, Corporación Construir, Cali, 2002.

1.1 Métodos para evaluar la puzolanicidad

Para determinar la Actividad Puzolánica de un material existen diferentes métodos tanto de carácter químico como mecánico, según se referencia en las normas Colombianas, ICONTEC, y en el resto de normas, tales como ASTM y UNE.

- Método químico o de Frattini, ICONTEC 1512 (UNE 80280/88; EN 196-5).
- La evaluación del Índice de Actividad Puzolánica con Cemento, ASTM C-311
- La norma ASTM C618 establece un índice mínimo, ($R_{\text{muestra}} / R_{\text{Patrón}}$) del 75% para clasificar un material como de carácter puzolánico.
- La evaluación del Índice de Actividad Resistentes con Cementos Pórtland, UNE 83-451-86.
- El Índice de Actividad Puzolánica con Cal, ASTM C-311.
- Otros métodos mecánicos para evaluar la puzolanicidad son los de Feret y Pauli (módulo de la efectividad de la puzolana).

1.2 Propiedades a evaluar en una puzolana

En una puzolana es requisito indispensable evaluar sus características físicas y químicas y su efecto en las propiedades finales del cemento o del hormigón según el caso.

Se debe tener conocimientos de los siguientes aspectos:

- Composición química (óxidos de sílice, hierro, aluminio, calcio, magnesio, álcalis y otros componentes menores).
- Propiedades físicas (finura - gravedad específica).
- Micro estructura (SEM).
- Espectroscopia IR y DRX (compuestos y cristalinidad).
- Actividad puzolánica (ensayo de Frattini, evaluación con cemento y con cal- normas ICONTEC y ASTM).
- Requerimiento de agua.
- Efecto de contracción por secado.
- Efecto en las propiedades finales del cemento (calor de hidratación y resistencias mecánicas).
- Ensayos de durabilidad en concordancia con el medio de servicio (efectos en la reactividad álcali- agregado, efectos en el ataque por sulfatos, carbonatación, cloruros y otros ensayos requeridos en concordancia con el futuro de ambiente de servicio).
- Proporción óptima de uso.
- Especificación del producto y recomendaciones finales.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS SOBRE LAS PUZOLANAS

En la historia de la civilización humana el descubrimiento de los materiales y de las acciones cementantes hidráulicas fue posterior al descubrimiento del fuego y debió ser poco posterior al descubrimiento de la cerámica. Tal descubrimiento, por lo que se refiere a los pueblos mediterráneos, debió pasar de egipcios a griegos y romanos, siendo ampliado y perfeccionado en sucesivas etapas. Por razones de puro azar geográfico y geológico, los griegos y romanos, primeros en conocer “ **la cal** ”, pudieron mezclarla con materiales naturales de origen volcánico que tenían a la mano. Es probable que el primer empleo de estos materiales fuera el de servir de agregados para los morteros de cal. La observación debió hacer el resto, y de la comparación de la resistencia y del comportamiento general de los conglomerados hechos con cal y con materiales volcánicos y no volcánicos, surgió la nueva técnica de mezclar los primeros, ya como materiales activos, con la cal, en polvo y en seco o en húmedo, para obtener los que han pasado a la historia como “cementos y morteros romanos”, con base en cal y puzolana, o cal, puzolana y arena, respectivamente.

Tales materiales fueron la tierra griega de Santorín y las cenizas y tobas romanas de Pozzuoli, localidad que ha legado el nombre genérico de puzolanas para éstos y para similares materiales en lo sucesivo. De las obras antiguas realizadas con puzolanas que han llegado hasta nuestros días como inestimables reliquias de la civilización romana pueden citarse: panteones, coliseos, estadios, basílicas, acueductos, cisternas, puentes, puertos y las más diversas estructuras que han perdurado. Y lo han hecho como no han podido hacerlos muchas obras realizadas en la Edad Media, con materiales conglomerantes mal cocidos y exentos de puzolanas activas. Por el contrario, cuando el defecto de cocción y la falta de puzolana se subsanaron, las obras cobraron de nuevo el vigor y con él la longevidad.

3. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Se consideran generalmente como puzolanas los materiales que, carentes de propiedades cementicias y de la actividad hidráulica por sí solos, contienen constituyentes que se combinan con cal a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos. En tal sentido, las puzolanas dan propiedades cementantes a un conglomerante no hidráulico como es la cal.

Son, por consiguiente, materiales reactivos frente a la cal en las condiciones normales de utilización ordinaria de conglomerantes (morteros y hormigones). No se consideran como puzolanas aquellos otros materiales inertes que, en determinadas condiciones extraordinarias de estado físico de división (elevada finura, gran superficie específica) o de reacción (tratamientos hidrotérmicos con vapor de agua a presiones y temperaturas elevadas), pueden dar lugar a compuestos hidráulicos. Así sucede, por ejemplo, con el cuarzo, que finamente molido y mezclado con cal forma silicatos cálcicos hidratados por tratamiento en autoclave.

La reactividad de las puzolanas se atribuye, fundamentalmente en algunos casos, a la sílice activa que se encuentra en ellas formando compuestos mineralógicos silícicos.

Las puzolanas, según su origen, se clasifican en dos grandes grupos el de las naturales y el de las artificiales, aunque puede existir un grupo intermedio constituido por puzolanas

naturales que se someten a tratamientos térmicos de activación, análogos a los que se aplican para obtener puzolanas artificiales, con objeto de incrementar su hidraulicidad.

Estas puzolanas tratadas, aunque son naturales por origen, se pueden considerar como artificiales por causa del tratamiento que reciben. Podrían denominarse puzolanas mixtas o intermedias, por participar de los caracteres tanto de las naturales como de las artificiales.

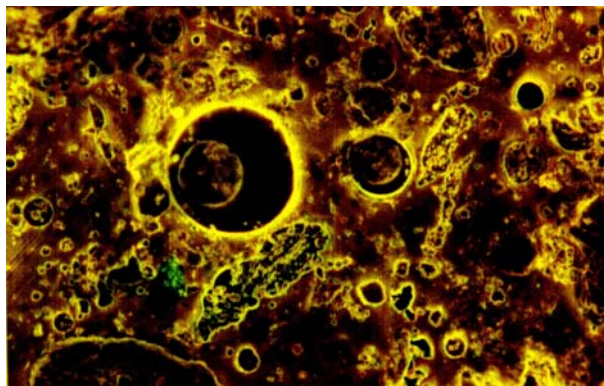
3.1 Puzolanas Naturales

Los materiales denominados puzolanas naturales pueden tener dos orígenes distintos, uno puramente mineral y otro orgánico. Las puzolanas naturales de origen mineral son productos de transformación del polvo y “cenizas” volcánicas que, como materiales piroclásticos incoherentes procedentes de erupciones explosivas, ricos en vidrio y en estado especial de reactividad, son aptos para sufrir acciones endógenas (zeolitización y cementación) o exógenas (agilización), de las cuales las primeras son favorables y las segundas desfavorables. Por una continuada acción atmosférica (meteorización) se convirtieron en tobas, esto es en rocas volcánicas, más o menos consolidadas y compactas, cristalinas, líticas o vítreas, según su naturaleza. El origen volcánico de las puzolanas naturales es determinante de su estructura. La estructura de las rocas, que se han originado por el enfriamiento de grandes masas de lava que han fluido completamente, depende de la velocidad en que se ha producido el fenómeno.

Las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada y formadas en yacimientos o depósitos que en su origen fueron submarinos, por acumulación de esqueletos y caparzones silíceos de animales (infusorios radiolarios) o plantas (algas diatomeas).

Todas las propiedades de las puzolanas naturales y en particular aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria del cemento, dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación.

Los materiales puzolánicos naturales están constituidos principalmente por rocas eruptivas y en particular efusivas y volcánicas, y dentro de éstas, por extrusivas, salvo las de naturaleza orgánica que son de origen y formación sedimentaria.



PUZOLANA NATURAL DE ORIGEN VOLCÁNICO PUMÍTICO

3.1.1 Causas de la actividad puzolánica

La actividad puzolánica responde a un principio general. Dicho principio se basa en que la sílice y la alúmina, como componentes ácidos de materiales puzolánicos, reaccionan con la cal a condición de que sus uniones en dichos materiales sean lábiles.

No pueden considerarse aparte las acciones de la sílice y de la alúmina, ya que la presencia de esta última favorece en gran medida la acción puzolánica, directamente por sí e indirectamente al implicar su presencia un mayor contenido de álcalis, que se fijan parcialmente en los nuevos productos resultantes de la reacción puzolánica, los cuales tiene el carácter de pseudogeles. El óxido de hierro se supone que actúa como alúmina, pero de una forma más atenuada y lenta. Las estructuras zeolíticas se atacan por la cal más rápidamente que las verdaderas puzolanas totalmente vítreas y la fijan en mayor cantidad que la correspondiente a un intercambio catiónico con álcalis, lo cual indica una ruptura de la estructura reticular y de los enlaces químicos, lo que da lugar a una participación de la sílice y de la alúmina, que es más fácil con las estructuras zeolíticas que en las vítreas.

En efecto, por lo que se refiere a las puzolanas de origen mineral, su actividad se ha atribuido tanto a los constituyentes amorfos como a los cristalinos, y en particular a los de naturaleza zeolítica. La gran reactividad de las puzolanas tanto naturales como artificiales, depende además de su composición química y mineralógica, y de la cantidad de fase amorfa o vítrea, de su gran superficie reactiva, de la presencia de álcalis, alcalinotérreos y del grado de condensación de grupos como SiO_4 , AlO_4 ...

Algo análogo sucede con las puzolanas de origen orgánico, dado que otros materiales de similar origen y composición son inactivos frente a la cal, la actividad de estas puzolanas de origen orgánico no es sólo cuestión de contenido en sílice hidratada, sino también del estado físico de división de la misma.

Lo prueba, por una parte, el hecho de que las activas poseen una estructura natural porosa con una gran superficie específica interna, y por otra, la circunstancia de que ciertos ópalos y basaltos no activos cobran actividad cuando se molturan a gran finura y se someten a una gran lixiviación con ácido clorhídrico concentrado (10 normal).

La sílice hidratada reactiva, componente eficaz de las puzolanas de origen orgánico, procede en su mayor parte de esqueletos de infusorios radiolarios y de algas marinas diatomeas, aparte de los citados ópalos y geiseritas. Pero no todas las puzolanas de esta procedencia, altas en sílice, tienen la misma actividad. En algunas de ellas se incrementa también sometiéndolas a calcinación, como sucede con el "moler" danés, con la "gaize" francesa del Valle de Mosa y con las "tierras blancas" italianas del norte del Lacio, muy ligeras y porosas, cuyo análisis microscopio revela cuarzo, mica y feldespato más o menos alterados, en una matriz amorfa de gel de sílice.

3.2 Puzolanas artificiales

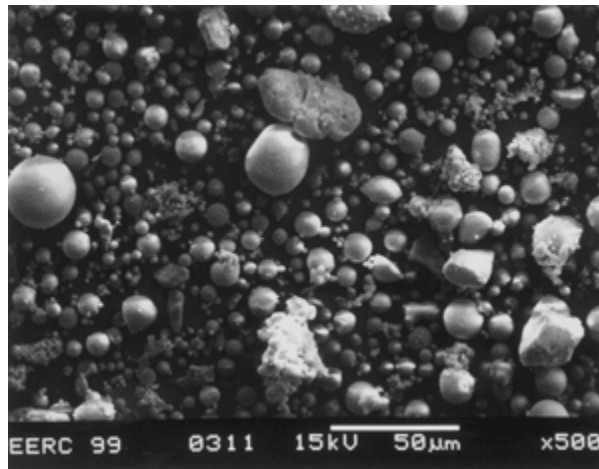
Se definen éstas como materiales que deben su condición de tales a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta condición cabe distinguir dos grupos uno, el formado por materiales naturales silicatados de naturaleza arcillosa y esquistosa, que adquieren el carácter puzolánico por sometimiento a procesos térmicos "ex profeso", y otro el constituido por subproductos de determinadas operaciones industriales, que, en virtud de

su naturaleza y de las transformaciones sufridas en las mismas, adquieren las propiedades puzolánicas.

Al primero de estos grupos pueden asimilarse, por su analogía, las puzolanas designadas como mixtas o intermedias, o semiartificiales, es decir, aquellas que, naturales por su origen, se mejoran por un posterior tratamiento. Representantes típicos de este grupo son el polvo de ladrillo obtenido de productos de desecho de la cerámica de alfarería y las bauxitas naturales.

En el segundo grupo encajan los residuos de las bauxitas utilizadas para la obtención del aluminio, materiales a los que los alemanes designan como "Si-Stoff" (silicalita o amorfita) y el polvo de chimeneas de altos hornos. También pueden incluirse en este grupo, aunque presentan bastantes concomitancias con las escorias, las cenizas volantes y de parrilla de las centrales termoeléctricas y las cenizas de lignitos. Por extensión, las mismas escorias siderúrgicas podrían acoplarse en el grupo.

Como queda indicado, el representante más genuino de los materiales arcillosos elevables a la categoría de puzolana artificial es el polvo de ladrillo. Sometida la arcilla a tratamientos térmicos adecuados, se forman en ella compuestos puzolánicamente activos en virtud de reacciones y transformaciones en las que, junto a una estructura y constitución mineralógica de partida y a la composición química, juegan importantísimo papel como variables la temperatura y el tiempo.



MICROGRAFÍA (SEM) DE UNA CENIZA VOLANTE TIPO F

Análoga importancia tiene la temperatura de tratamiento de los residuos de la combustión de carbones o esquistos bituminosos, en la calidad y comportamiento de las puzolanas artificiales a partir de dichos subproductos. Las temperaturas óptimas parecen estar en el mismo intervalo (700-800 °C) de las correspondientes a la activación de las arcillas, puesto que también en este caso se obtiene con ellas la máxima solubilización de los materiales.

Si los esquistos abundan en silicato bicálcico y aluminato monocálcico, son ya conglomerantes "per se", y si tienen poca cal y su temperatura de calcinación no ha sido muy elevado, constituyen buena puzolanas artificiales, lo cual puede ser explicable por el contenido de sílice amorfa, que ya a 870 °C pierde su capacidad de reacción por

transformarse en cristalina (cuarzo- α - > tridimita). Por esta razón, las temperaturas óptimas de activación de los esquistos se hallan en el intervalo 800 a 850 °C.

Si se considera que entre las puzolanas naturales y artificiales reunidas, los términos extremos en cuanto a composición y estructura pueden ser las tierras diatomeas (sílice hidratada), como producto más hidratado y silíceo, y el polvo de ladrillo o arcilla cocida, como producto más anhidro, entre ambos se hallan las puzolanas naturales de origen volcánico. Entre los dos primeros materiales podrán existir diferencias en cuanto al mecanismo de su reacción con la cal, y el correspondiente a las últimas será intermedio.

Los cementos puzolánicos se han reconocido, desde hace mucho tiempo como más resistentes a los sulfatos. Y la adición de puzolana a un clínker Portland, ya de por sí resistente, ha sido una conclusión lógica a la que se llegó hace bastante tiempo. Sin embargo, no se ha sacado igual ó seguramente mayor partido del empleo de clínkeres con alto contenido de fase vítrea, mezclado con puzolanas, para obtener cementos aún más resistentes a los sulfatos.

Internacionalmente se define al cemento Portland puzolánico como al producto de una mezcla íntima y uniforme de cemento Portland y puzolana de alta finura, obtenida por molienda conjunta de clínker de cemento Portland y puzolana o por molienda separada y posterior mezcla de estos mismos materiales. La Norma ASTM C 595 especifica que la puzolana participa entre el 15 y el 40 % en peso del cemento Portland puzolánico. Las Normas Españolas establecen dos categorías de cementos que pueden contener puzolanas; el cemento Portland con adiciones activas que pueden llevar hasta un máximo del 20 % de puzolana en peso y los cementos puzolánicos, que pueden estar en una en una proporción del 80 % máximo de clínker de cemento Portland mas regulador de fraguado y un mínimo del 20 % en peso de puzolana.

4. VENTAJAS DEL EMPLEO DE LAS PUZOLANAS

En general, las ventajas de todo orden que pueden obtenerse de los cementos puzolánicos son las señaladas en la tabla No. 3-1. Dichas ventajas hacen aptos a los cementos puzolánicos para una amplia serie de empleos específicos que se detallan en la tabla No. 3-2.

Tabla No. 3-1 : Ventajas de las Puzolanas en los Cementos Puzolánicos

<p>A. En la resistencia mecánica A.1 A largo plazo, al prolongar el período de endurecimiento A.1.1 A tracción A.1.2 A compresión A.1.3 Mejor relación tracción - compresión</p>	<p>E. En la plasticidad D.1 Rebajando la relación a/c D.2 Reduciendo la segregación D.3 Evitando la exudación y el sangrado</p>
<p>B. En la estabilidad B.1 Frente a la expansión por cal libre B.2 Frente a la expansión por sulfatos B.3 Frente a la expansión por la reacción álcalis - agregado B.4 Frente a la retracción hidráulica de secado, por la menor relación a/c B.5 Frente a la retracción térmica por enfriamiento B.6 Frente a la fisuración</p>	<p>F. En la impermeabilidad F.1 Reduciendo la porosidad F.2 Evitando la formación de eflorescencias F.3 Produciendo la mayor cantidad de Tobermorita</p>
<p>C. En la durabilidad C.1 Frente a ataques por agua puras y ácidas C.2 Frente a ataques por aguas y suelos sulfatados C.3 Frente a ataques por agua de mar C.4 Frente a ataques por gases de descomposición y fermentación de materias orgánicas C.5 Frente a la desintegración por la reacción álcalis - agregado</p>	<p>G. En la adherencia G.1 Del agregado a la pasta G.2 Del mortero a las armaduras</p>
<p>D. En el rendimiento y la economía D.1 Al corresponder a los cementos puzolánicos mayor volumen que a otros conglomerantes a igualdad de peso D.2 Al ser los cementos puzolánicos, en general, conglomerantes más baratos</p>	<p>H. En el comportamiento térmico H.1 Al liberar menor calor de hidratación H.2 Al producir menor elevación de temperatura</p>

Tabla No. 3-2 : Empleos Específicos de los Cementos Puzolánicos

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">a. Trabajos de concreto en grandes masasb. Cimentaciones en todo terrenoc. Obras marítimasd. Obras sanitariase. Albañilería (pega de muros y mampostería en general)f. Repellos o revocos (pañetes)g. Soladosh. Baldosas hidráulicai. Prefabricados de elementos estructurales de concreto armado o sin armar, especialmente curados por tratamientos térmicosj. Concretos especiales premezclados |
|---|