



MR. ROBERT E. PHILLEO

B I O G R A F I A

El Sr. Philleo obtuvo su título de Ingeniero Civil en el Instituto Tecnológico de Massachusetts en 1946. Después de su graduación se incorporó al Cuerpo de la Asociación del Cemento Portland (P.C.A.), laborando como ingeniero investigador en los laboratorios de investigación y desarrollo.

Estado a cargo de la investigación del concreto, en las áreas de inclusión de aire, ensayos no destructivos y efectos de las altas temperaturas en el concreto, impartió la instrucción de técnicas en la Universidad de Northwestern en Evanston, Illinois.

Como jefe de la Sección de Concreto, se ha dedicado a la supervisión del desarrollo de las especificaciones y criterios de selección de los materiales de ingeniería en la construcción pesada. Es una reconocida autoridad en el campo de la técnica de materiales y ha escrito muchos artículos técnicos en esta materia.

El Sr. Philleo fue vicepresidente del ACI en 1972 y posteriormente presidente del mismo en 1973. Actualmente forma parte del Board of Direction del ACI y es miembro de varios comités técnicos. Forma parte del comité C-1 del ASTM sobre cemento, es presidente del comité C-3 sobre Concreto y Aparatos para el Concreto. Es autor del capítulo: "Propiedades Elásticas y Flujo" en ASTM SP 169A (Importancia de los ensayos y propiedades del concreto y materiales para la aplicación del concreto). Trabajó en el Highway Research Board (HRB) en comités dedicados a las propiedades mecánicas del concreto e investigación básica sobre Cemento Portland y Concreto. Es miembro del Consejo de la Comisión CIB - FIP - RILEM, sobre control estadístico de la calidad del concreto. En 1967 fue el orador de la conferencia Stanton Walker en la Universidad de Maryland.

PUZOLANA NATURAL Y CENIZA VOLANTE EN EL CONCRETO MASIVO.

Robert E. Philleo\*

RESUMEN

El Cuerpo de Ingenieros ha usado puzolana en casi todos los concretos masivos colocados en presas y esclusas de navegación durante los últimos años. Las especificaciones han permitido el uso tanto de puzolana natural como de ceniza volante. La elección ha sido determinada por la economía de cada proyecto. En la mayoría de las regiones geográficas, la ceniza volante ha sido la selección económica, pero en la región noroeste del país la puzolana natural se usó en ocho de las más importantes estructuras.

La puzolana ha sido usada como un sustituto de una parte del cemento, sobre la base de volumen absoluto. Experimentación exhaustiva, la cual ha precedido las decisiones sobre el uso de la puzolana, establecieron las cantidades máximas de sustitución para el concreto expuesto y no expuesto.

El concreto se proporciona para lograr la resistencia de diseño en noventa días. Además, debe ser capaz de desarrollar una resistencia de 2.75 MPa en tres días. Este último requisito se estableció para protegerlo contra las fallas por anclaje.

Las propiedades del concreto endurecido han sido excelentes y con resistencias que rebasan las de los concretos de cemento Portland normal a edades posteriores.

\* Jefe de la Oficina de la Rama de Estructuras. Jefe de Ingenieros. Washington, D. C.

Las puzolanas pueden ser incorporadas al concreto por diversos motivos. -- Ellas reducen el costo del concreto, reducen la generación de calor durante la hidratación, pueden mejorar la manejabilidad, combaten los efectos adversos de la reacción alcali-agregado, y pueden mejorar la resistencia al sulfato y, además, cuando la puzolana es de ceniza volante, el concreto sirve como lugar de -- descarga para material de desecho. Esta última característica no ha sido una -- fuerza acicateante en el uso de las puzolanas; pero si los reglamentos que están actualmente formulándose por la Agencia de Protección Ambiental en los Estados Unidos son puestos en vigor, todas las empresas constructoras estarán obligadas a usar ceniza volante en los concretos por esta única razón.

Por más de veinte años el Cuerpo de Ingenieros ha sido el más impor-- tante usuario de puzolana del país. La mayor parte, aunque no toda, ha sido -- usada en concretos masivos de grandes construcciones, tales como presas y exclu-- sas de navegación. Hasta hace poco, cuando la construcción de presas disminuyó temporalmente hasta un nivel muy bajo entre nuestras prioridades nacionales, en un año común, el Cuerpo colocó 4 millones de metros cúbicos de concreto que con-- tenían 150,000 toneladas de puzolana, de las cuales una parte importante era ce-- niza volante. Otros constructores de presas usaron otras 75,000 toneladas de -- puzolana, de las cuales una gran parte no era ceniza volante.

#### Desarrollo Histórico.

El Cuerpo no fue impulsado al uso de la puzolana como una cruzada pa-- ra utilizar materiales de desecho. Más bien, esto fue parte de un programa pa-- ra mejorar las propiedades y reducir el costo del concreto masivo. La caracte-- rística extraordinaria del concreto masivo es que el calor generado por la hi-- dratación del cemento debe tomarse en cuenta en construcciones de este tipo. Si las presas fueran construidas con concreto estructural normal colocado a tempe-- raturas ambientales normales, las temperaturas interiores alcanzarían niveles -- tan altos como 80°C. Puesto que no hay nada negativo en el concreto que ha si-- do tratado con calor en esta forma, este concreto particular debe ser enfriado en una gran masa hasta una temperatura final estable a más de 60°C más baja. Su -- superficialmente parecería que aun si se limitara así, el concreto sería sometido a una compresión durante el ciclo de calentamiento y solamente perdería esa com-- presión durante la etapa de enfriamiento. Desafortunadamente, la etapa de ca-- lentamiento sucede durante la vida temprana del concreto cuando el módulo de -- elasticidad es bajo y el flujo es alto. Como resultado de esto, se alcanza la temperatura más alta en una situación casi libre de esfuerzos. A medida que se -- enfría este alcanza una edad en la cual es capaz de desarrollar un esfuerzo con-- siderable. El esfuerzo asociado con el enfriamiento de un cuerpo restringido -- es de tensión. Ningún concreto no reforzado y limitado puede soportar un des-- censo de temperatura de 60°C sin una falla a la tensión. Las grietas producidas por esta falla de tensión, deben ser evitadas en una construcción por gravedad a fin de mantener su estabilidad. Un enfriamiento lento de 25 ó 30°C puede ser -- tolerado. De esta manera, todo el procedimiento de construcción para estructu-- ras de concreto masivo, consiste de esfuerzos heroicos para mantener esta tempe-- ratura máxima alrededor de 25°C en relación con la temperatura final estable. --

Los esfuerzos consisten en un pre-enfriamiento de los materiales de concreto, -- en seleccionar los materiales y proporciones, los cuales minimizarán el ascenso consabido de la temperatura, controlar el tamaño, la forma y la secuencia de -- tiempo de construcción de los bloques, para aumentar al máximo el enfriamiento por la atmósfera durante los primeros días, y en casos extremos, para remover -- el calor del concreto mediante la circulación de agua fría por un serpentín.

A fin de reducir al mínimo el ascenso de la temperatura, es importan-- te el proporcionamiento de las mezclas de concreto que es lo que nos interesa -- aquí. El enfoque general consiste en usar grandes agregados de modo que la re-- ducción de vacíos haga posible la obtención de una determinada relación agua-ce-- mento con bajas cantidades de cemento, y así poder usar materiales cementantes con bajo calor de hidratación. Esta fué la finalidad que se tuvo para desarro-- llar cementos Portland de bajo calor.

Los diseñadores de concreto masivo, han estado intrigados por mucho -- tiempo ante la posibilidad de usar puzolana, parecida a los materiales usados -- por los romanos, como una forma de reducir aún más la generación de calor. El más antiguo dato del uso de la puzolana en el concreto masivo fue una prueba en uno de los estribos de la Presa Big Dalton, que es una presa de arcos múltiples construida por el Distrito de Control de Inundaciones de Los Angeles en 1929. -- Piedra Pomez procedente de Friant, Calif. fue usada para sustituir un 20% del -- cemento Portland.

Parece ser que no hubo un interés mayor en el asunto, hasta que el -- Cuerpo de Ingenieros construyó la Presa Bonneville sobre el Río Columbia en --- 1935. De nuevo fue la puzolana un material natural procedente de California, -- pero en esta ocasión fue molida junto con el cemento. De esta manera nació la industria del cemento Portland-puzolana, no obstante, permaneció casi dormida -- en los Estados Unidos por dos generaciones después de su aparición.

La primera vez que se usó ceniza volante en el concreto masivo, fue -- con el método de agregados pre-empacados en la construcción. En este método -- las cimbras se llenan con agregados gruesos y los vacíos son después llenados -- con mortero. El mortero contiene puzolana, que normalmente es ceniza volante, -- para mejorar la bombeabilidad y la penetrabilidad, ya que contiene un aditivo -- químico para retardar el fraguado y para producir una ligera expansión del mor-- tero antes del fraguado. Este método ha sido utilizado inicialmente como una -- técnica de reparación, pero también se ha usado en las nuevas construcciones pa-- ra el relleno de cimbras en espiral que se usan en plantas de energía hidroeléc-- trica, y para taponear temporalmente desviaciones de corrientes en las presas o -- en estribos. El uso más amplio y generalizado de este método fue en la restau-- ración de la Presa Baker, cerca de Boulder, Colorado en 1947. Una nueva cara -- aguas arriba fue fabricada usando losas de concreto pre-fabricado de alta cali-- dad que recubrieron el frente, sumamente deteriorado, y el cuerpo completo fue -- engrosado mediante el proceso de rellenar los espacios entre la presa original y la nueva cara con pre-fabricados de concreto con agregados pre-empacados.

El uso de ceniza volante se ha vuelto convencional en las construccio-- nes usando concreto masivo en este país y se inició con la construcción de las

presas de Hungry Horse y de Canyon Ferry en Montana, por el Bureau of Reclamation durante el período de 1948-53. El Bureau obtuvo experiencia sobre el uso de puzolanas naturales primordialmente en las Presas de Friant y Davis, pero en las de Hungry Horse y Canyon Ferry la puzolana y la ceniza volante fue embarcada desde Chicago a una distancia de más de 2,500 kilómetros.

En 1950, el Cuerpo de Ingenieros inició un laboratorio comprensivo para la investigación de materiales de sustitución del cemento. La finalidad de su programa era tanto la reducción del costo del concreto masivo, como obtener beneficios para el control potencial de la temperatura. Dicho programa incluía el cemento natural, el cemento de escoria, una amplia variedad de puzolana natural, y ceniza volante bituminosa. Como resultado de este trabajo el Cuerpo de Ingenieros obtuvo la primera especificación de puzolana en 1957. Al siguiente año se usó la ceniza volante por el referido Cuerpo, en la Presa Sutton sobre el Río Elk, en Virginia Occidental. Todo tipo de materiales sustitutos del cemento han sido usados por el Cuerpo de Ingenieros en sus presas. Sin embargo, el uso de cementos de escoria y naturales casi ha desaparecido, a medida que estos materiales se vuelven inasequibles. De esta manera las puzolanas naturales, las cuales tienen una gran ventaja económica sobre la ceniza volante en aquellas regiones donde el transporte y acarreo de la ceniza volante se vuelve inasequible, gradualmente han asumido la primacía que tenía la ceniza volante, a medida que las fuentes asequibles de ceniza volante se han vuelto más diseminadas a través del país.

#### Política y Uso Actuales

Las guías señaladas por el Cuerpo sobre el concreto, exigen que donde quiera que haya una probabilidad aceptable para el uso de materiales de sustitución, debe demostrarse que es económico, y tales materiales deben ser listados como una alternativa en las especificaciones. La economía depende de la disponibilidad y los precios de los materiales de sustitución, así como la cantidad que va a ser usada. Un parámetro importante es la cantidad, puesto que determina el hecho de que su costo sea doble para incurrir en el gasto de dosificar un material adicional. Puesto que en la mayoría de los casos, el cemento Portland sin sustituto se ha incluido también como una alternativa, se considera una pobre proposición que actualmente decide cuál combinación de materiales es la más económica. El resultado de esta selección de pobres proposiciones, es que durante los últimos veinte años, casi todos los proyectos que constan de más de 75,000 metros cúbicos de concreto, así como los proyectos menores, han contenido puzolanas. El beneficio financiero puede variar desde \$0.10 hasta \$1.50 U.S. - Dólares por metro cúbico, dependiendo de la distancia de acarreo de la ceniza volante o del costo del procesamiento de los materiales naturales. Durante los años de máxima utilización de puzolana los ahorros anuales ascendieron a la cantidad de \$3,000,000 dólares.

Mientras que las puzolanas naturales son esencialmente más caras que la ceniza volante, su uso puede ser más económico en lugares donde localmente son accesibles las buenas puzolanas naturales y hasta donde la ceniza volante debe ser acarreada desde largas distancias. Tal es el caso de la región noroeste

de los Estados Unidos donde las puzolanas naturales han sido usadas en ocho construcciones importantes en el valle del Río Columbia. Aquí se incluyen las Presas de Bonneville, John Day, de Chief Day sobre el mismo Río Columbia, también las Presas de Lower Monumental, de Little Goose y de Lower Granite sobre el Río Snake, y las Presas de Green Peter y de Foster sobre el Río Santiam. Mientras que el material puzolánico natural frecuentemente necesitaba de calcinación y siempre fue necesario molerlo, la puzolana se produjo en forma muy económica para varios de estos proyectos mediante la calcinación de la pizarra en un horno cercano que tenía un productor de agregados ligeros, y moliéndola en una planta de cemento cercana.

La investigación sobre la cual el Cuerpo de Ingenieros fundó su política, obtuvo resultados tales como los que se muestran en la Tabla I. Podrá verse que los concretos que contienen puzolanas naturales tienen las mismas o mayores exigencias de agua que los concretos sin puzolana, mientras que la ceniza volante consistentemente reduce la necesidad de agua. Todas las puzolanas reducen el calor de la hidratación. Además reducen la resistencia a los 7 días, pero en las proporciones que vemos en la Tabla I los concretos que contienen puzolanas se acercan o exceden la resistencia de los 90 días, que los concretos sin puzolana. Como resultado de esta investigación se han establecido los siguientes valores limitantes de sustitución de puzolana:

#### Máximo Grado de Sustitución - %

Material	Concreto expuesto	Concreto no expuesto
Ceniza Volante	25	35
Puzolana Natural no siendo diatomita sin Calcinar	20	30
Diatomita no calcinada	20	20

La más alta cantidad permitida de sustitución respecto a la ceniza volante, refleja el reducido contenido de agua cuando se ha usado ceniza volante. Puesto que las construcciones hidráulicas no son cargadas hasta que han alcanzado una edad avanzada, puede parecer razonable el uso de grandes cantidades de ceniza volante. El límite efectivo está decidido por los procesos de construcción. Las cimbras en voladizo son ancladas a la más reciente colada de concreto. En esta forma la resistencia temprana cobra alguna importancia. Al proporcionar las mezclas, uno de los criterios que debe ser satisfecho es la resistencia a 3 días de 2.75 MPa. La resistencia a los 90 días se ha usado como la resistencia de diseño para el concreto que contiene puzolana, en lugar de la resistencia a los 28 días que se ha usado para el concreto sin puzolana. Así, en una estructura en la cual la carga de diseño no es aplicada en una etapa temprana, es posible que se reconozca la ganancia de una más lenta resistencia del concreto puzolánico, sin aumentar la cantidad total de material cementante.