

c).- EN CARACTER GENERAL - Consideramos que aún sean oportunas las siguientes recomendaciones:

- Establecimiento de nuevas obligaciones legales entre propietario y constructora.
- Obediencia a la obligación legal de supervisión de la obra por un ingeniero experimentado.
- Adopción generalizada de la consulta a ingenieros especializados - en los diversos sectores de la ingeniería y establecimiento de la responsabilidad de éstos en las decisiones específicas.
- Mayor divulgación, por parte de las escuelas de ingeniería, de las responsabilidades de los ingenieros en la seguridad de las construcciones.
- Organización de cursos de perfeccionamiento técnico y de seguridad para:
 - * Personal de supervisión de las obras y servicios.
 - * Obreros calificados en general.
- Capacitación personal de todos los niveles, así como de los obreros calificados a través de incentivos.
- Proyecto de investigación sobre las causas de los accidentes, en casos seleccionados, por una comisión de ingenieros especialistas. Esta comisión estaría aprobada por una institución apropiada. Publicación de las conclusiones para divulgación en los medios técnicos.

CURRICULUM VITAE

Ingeniero Civil de la Universidad Politécnica de Sao Paulo; profesor de Materiales de Construcción en la Universidad Mogi de las Cruces; profesor invitado por la Asociación Brasileña de Cemento Portland y Venezolana de Productores de Cemento. Ingeniero en Jefe del Servicio Nacional de Aprendizaje Industrial (1945-58), asesor de la Cía. Siderúrgica Paulista-COSIPA. Actualmente es presidente del Centro Tecnológico de Construcción, Consejero del Instituto Brasileño de Concreto, Miembro de la U.I.L.J., de RILEM, ASTM y Concrete Society y representante de Brasil ante el CEBTP de París.

PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE CONCRETOS CON GRANULOMETRIA ABIERTA

Dr. V. Ramakrishnan*

RESUMEN

El trabajo presenta los resultados de una investigación extensiva con 375 mezclas de granulometría abierta y de granulometría continua, con rangos de resistencia entre 210 y 525 kg/cm², con cuatro tamaños máximos diferentes de agregado grueso. Las relaciones de agua/cemento (por peso) entre 2.0 y 10.0. Las pruebas se condujeron, cuando eran aplicables, de acuerdo con los Métodos estandar ASTM.

Las propiedades físicas y mecánicas del concreto endurecido, el peso unitario, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la contracción por secado, el flujo y recuperación de flujo, e índices de permeabilidad, para mezclas optimizadas de concreto de granulometría abierta contra concretos de granulometría continua, se comparan en la 3era. parte de la investigación. Para igualdad en resistencia a la compresión, tamaño máximo de agregado grueso y aproximadamente la misma trabajabilidad, el concreto de granulometría abierta tiene mayor peso unitario, mayor módulo de elasticidad, menos contracción, menos flujo y menos permeabilidad que el concreto de granulometría continua. El estudio ha demostrado que para un mismo tamaño máximo de agregado grueso, el concreto de granulometría abierta se puede producir con 20 a 30% menos de cemento que el concreto de granulometría continua para la misma resistencia a la compresión.

Se hicieron algunos estudios preliminares en la parte final de la investigación sobre concretos de contracción-compensada utilizando cemento del Tipo K. La comparación de las características de expansión-y-contracción de concretos de granulometría abierta y de granulometría continua con contracción compensada requiere 37.7% mas cemento del Tipo-K que el equivalente concreto de granulometría abierta de contracción-compensada teniendo la misma resistencia a la compresión y trabajabilidad. Así, esta investigación ha demostrado que se puede obtener una significativa economía para concretos de contracción-compensada, adoptando granulometría abierta en lugar de agregados de granulometría continua.

* Profesor de Ingeniería Civil en la Escuela de Minas y Tecnología de South Dakota; vice-director del comité de publicaciones de la División de Construcción del American Society of Civil Engineers.

INTRODUCCION

La graduación compatible de los agregados es de primordial importancia para lograr un concreto de alta resistencia. La graduación que se utilice deberá ser compatible para la consolidación completa del concreto fresco, evitando una segregación interna. El objeto principal de la granulometría es permitir que los vacíos de las partículas de agregado grueso en un volumen dado de concreto se llenen con partículas de agregado fino, para luego permitir a los vacíos restantes del sistema agregado, que se llenen con una pasta de cemento de una relación agua-cemento específica, ajustado para aditivos, si llegasen a utilizarse para obtener la resistencia requerida. Esto puede lograrse mejor por medio de granulometría abierta, particularmente para mezclas secas con relaciones agua-cemento bajas para concretos de alta resistencia.

La granulometría abierta de los agregados permite la consolidación completa del concreto plástico y obtener un concreto óptimo de vacíos-llenos. Dicho concreto completamente compacto o de óptimo vacío-lleno tendrá incrementada la resistencia a la compresión. En suma, habrá mejorado el módulo (1) de elasticidad, densidad, durabilidad, impermeabilidad, resistencia al uso, congelamiento y deshielo, descascaramiento, desquebrajamiento y reducida contracción y flujo plástico.

¿QUE ES GRANULOMETRIA ABIERTA?

Granulometría abierta, referido también como granulometría de un solo tamaño o granulometría intermitente, es la omisión de tamaños medianeros indeseables que se encuentran entre un angosto campo de actividad del tamaño máximo permisible de los agregados gruesos y la mayor cantidad aceptable del tamaño de agregados finos, y supresión de los extremadamente finos de las granulometrías continuas convencionales. En agregados gruesos de peso ligero, porque son generalmente manufacturados con gránulos hechos en hornos, el proceso se puede más convenientemente llevar a cabo con un tamaño igual, lo cual es matemáticamente el tamaño ideal para granulometría abierta. En agregados gruesos de peso normal, ya sea de grava o piedra triturada, la manera más práctica es utilizar un campo de actividad angosto de tamaño máximo permisible. En cualquier caso, el tamaño de agregados finos deberán ser aceptables a los intersticios del lado cuando se hacen compactas las partículas de agregados gruesos y todos los extremadamente finos deberán ser suprimidos para reducir la superficie específica para entonces reducir también los requisitos de agua y cemento.

COMO CONTRIBUYE A LA ALTA RESISTENCIA EL PROCESO DE GRANULOMETRIA ABIERTA.

En comparación con la granulometría usual de los agregados, la granulometría abierta, con un solo tamaño de agregados grueso y con una matriz de mezcla de cemento de alta resistencia, ofrece la solución óptima para obtener concreto de la más alta resistencia. Esto fue primero sugerido por Stewart (1), de quien el interés principal fue de obtener resistencia máxima con la mínima cantidad de cemento.

En concreto de granulometría abierta de peso normal, las piedras individuales se sitúan de tal manera de hacerlas virtualmente sostenerse una contra otra, los vacíos llenándose con la matriz uniforme como se muestra en la figura #1. Así la fuerza inherente del agregado es aprovechada completamente y las cargas de compresión serán principalmente transmitidas por contacto directo entre las partículas del agregado grueso, en vez de la mezcla generalmente más débil, aunque esfuerzos de tracción y resistencia al deslizamiento deberán transmitirse por esta última. Por este arreglo, el área superficial del agregado es reducida a un mínimo, lo cual es de gran ventaja por el mínimo de lubricante que se requiere. Adyacente a los puntos de contacto entre partículas gruesas, la mezcla toma relativamente menos cargas en virtud de que su módulo es generalmente de más baja elasticidad que del agregado grueso.

La granulometría abierta ha contribuido magníficamente a la realización de concreto de peso ligero y alta resistencia. Aun cuando la fuerza del agregado grueso de peso ligero es considerablemente menor, es posible obtener una resistencia de 630 kp/cm^2 ó 63 N/mm^2 (9000 lb/pulg^2). La explicación para este sorprendente resultado la da Bobrowski y Bardhan-Roy (2). En concreto de peso ligero y granulometría abierta, el agregado grueso no se sostiene uno contra otro, sino en una capa matriz de aproximadamente 2 a 3mm de grueso proporcionada entre ellos como se ve en la figura #2. Por lo tanto, en concreto de peso ligero, a diferencia del concreto de peso normal, la alta resistencia de la matriz contribuye a la resistencia del concreto y no a la fuerza inherente del agregado grueso. La alta resistencia del concreto de peso ligero se debe al efecto de curvatura de la matriz sobre los agregados gruesos, los cuales son sometidos a una inicial deformación plástica. La fuerza actual de la matriz depende de varias condiciones, pero puede perfeccionarse si en lugar del material de peso ligero se utiliza arena ordinaria para la matriz, aunque en este caso la densidad aumentaría ligeramente.

SUPERFICIE ESPECIFICA MINIMA.

Para concreto de alta resistencia, la relación agua-cemento seleccionada será la mínima, sólo lo suficiente para hidratar la pasta de cemento sin exceso, lo cual causaría sangrado después que el agua necesaria para lubricación y saturación de los agregados, en una superficie de condición seca, ha sido proporcionada. En este contexto, entre menos mortero, menos pasta de cemento, menos cemento, y la consecuente reducción de agua dará las ventajas de producir concreto de más alta resistencia con mayor peso unitario.

La condición óptima se adquiere únicamente cuando la superficie específica del agregado, definida como el área superficial por unidad de volumen, está en su mínimo. En agregados de granulometría abierta, la eliminación de agregados de tamaño medianero y extremadamente finos rebaja la superficie específica, reduce el cemento requerido y aumenta la trabajabilidad y su resistencia.

Como el área superficial de una esfera equivalente es proporcional al cuadrado de su diámetro y el volumen es proporcional al triple de su diámetro, la superficie específica es, entonces, inversamente proporcional a su diámetro. Así es que entre más grande el diámetro, menor será la superficie específica y menos mezcla se requiere.

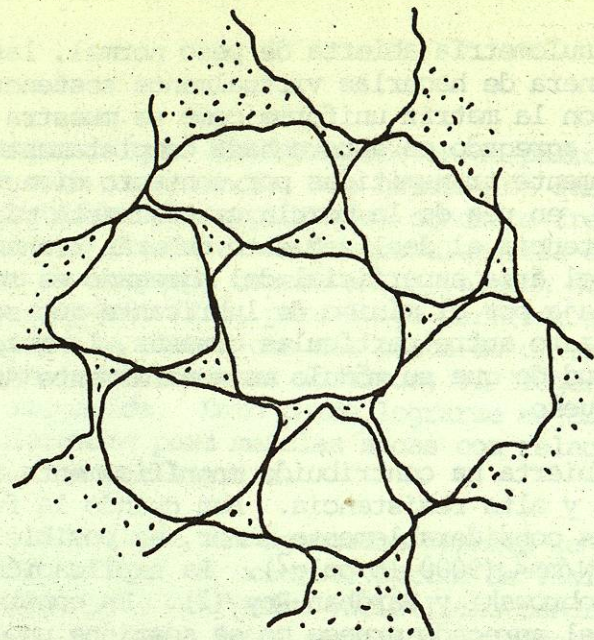


Fig. 1.- Concreto con granulometría abierta con agregado de peso normal.

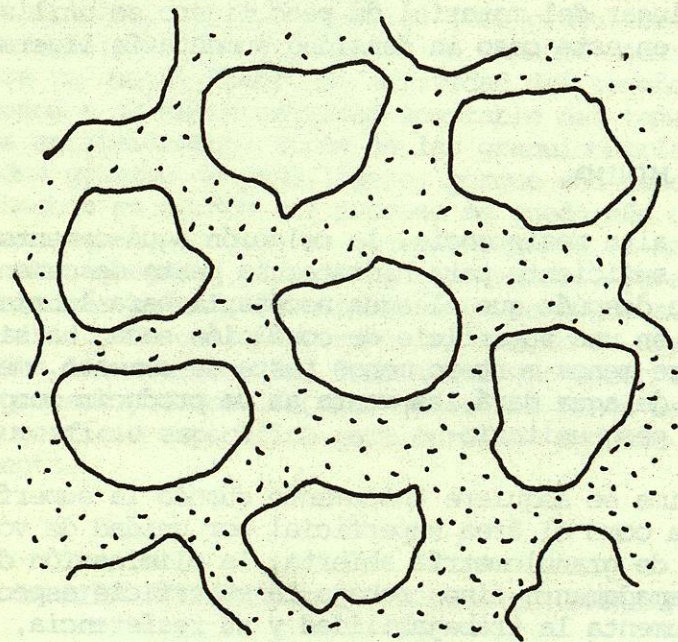


Fig. 2.- Concreto con granulometría abierta con agregado ligero.

BAJO CONSUMO DE CEMENTO.

La resistencia a la compresión del concreto en una relación constante de --- agua-cemento aumenta con un incremento en la relación agregado-cemento, siempre y cuando una completa compactación pueda lograrse. El trabajo de investigación de la Escuela de Minas y Tecnología de South Dakota nos ha mostrado que la resistencia del concreto aumenta con una disminución en el contenido de cemento, manteniendo todas las otras variables igual. El Profr. A. E. Desov de la U.S.S.R. ha comprobado teóricamente que la resistencia del concreto aumenta con una disminución en el contenido de cemento y espesor en capas de mortero de cemento. Con granulometría abierta, este reducido contenido de cemento se puede obtener sin pérdida de la trabajabilidad.

EL DISEÑO DE GRANULOMETRIAS ABIERTAS.

El objeto de diseñar granulometrías de agregados es para obtener, proporcionando tamaños convenientes, el mínimo vacío o una mezcla controlada en vacíos. Zonas porosas en forma de panal en el concreto suceden algunas veces debido a la inhabilidad de un agregado fino demasiado grueso, de filtrarse dentro de bolsillos locales de agregados gruesos concentrados. Por esto, la elección de un agregado fino menor que el tamaño crítico de entrada, asegura que esos vacíos se llenen por la migración de partículas finas a través de las gargantas de los vacíos. El teorema está en la elección de tamaño máximo "permisible" de agregados gruesos y tamaño máximo "aceptable" de agregados finos. La proporción fija de tamaños "permitibles" y "aceptables" constituye el criterio de granulometría abierta.

Para concretos simples y masivos, el tamaño máximo permisible dependerá del equipo utilizado para manejar, mezclar, transportar y los aparatos vibradores disponibles para una consolidación efectiva. Para concreto armado y presforzado, el tamaño máximo permisible de agregado grueso será limitado por su pasada libre a través de los espaciamientos interlineales del acero de refuerzo o conductos y el recubrimiento necesario requerido. Suponiendo que una forma romboédrica de empaquetar el tamaño más grande admisible de agregado fino, a manera de que sirva su función propiamente como material de relleno es equivalente a $0.155 D$ donde D es el diámetro de tamaño más grande de agregado grueso utilizado.

El procedimiento detallado y los aspectos teóricos y prácticos del diseño de mezclas de granulometría abierta se encuentran en referencias 4 y 5.

RESULTADOS EXPERIMENTALES: CONCRETO DE GRANULOMETRIA ABIERTA VS. CONCRETO DE GRANULOMETRIA CONTINUA.

Con el objeto de acertar las características de funcionamiento del concreto de granulometría abierta en comparación con el concreto normalmente utilizado de granulometría continua, una extensiva investigación fue llevada a cabo en la Escuela de Minas y Tecnología de South Dakota y los resultados fueron presentados en varias publicaciones, 6 al 21. Las conclusiones importantes de esta investigación involucrando 375 mezclas de granulometría abierta y mezclas de granulometría continua, han sido aquí resumidas. Las mezclas utilizadas estaban entre 210 kg/cm^2 y 530 kg/cm^2 (3000 lb/pulg^2 y 7500 lb/pulg^2) de resistencia, con cuatro dife-