

7

CONCRETOS DE
ALTA **R**ESISTENCIA
DENTO DE LOS **N**O
CONVENCIONALES

ARQ. CESAR JORGE CARPIO UTRILLA

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial y las necesidades que de ello derivan, han acrecentado enormemente las necesidades de espacio e infraestructura tanto en los países desarrollados como los países en vías de desarrollo. Estas nuevas poblaciones requieren no solo de espacios habitables, sino de infraestructura eficiente; por ejemplo cortinas para presas hidroeléctricas, que por las condiciones físicas de su emplazamiento, estarán sometidas a grandes esfuerzos, sobre todo en el caso de sismos, por lo que requieren concretos de alta calidad y también de alta resistencia.

Situación semejante se da en las obras arquitectónicas contemporáneas para ciudades muy congestionadas, por ejemplo las del sureste asiático, o Nueva York en los Estados Unidos, que han optado por la redensificación de los espacios urbanos a niveles nunca vistos; si tomamos el caso de Tokio en Japón, en los últimos años, se ha trabajado en eliminar zonas de alto riesgo para sus habitantes, sobre todo en el caso de incendios, esto en función de que una parte importante de las calles no permite el paso de los equipos de bomberos. La solución: eliminar las casas de decenas de manzanas y concentrar a todos en una sola torre, creando además jardines y espacios de recreo.

En Tokio, las áreas ya eliminadas presentaban un crecimiento caótico, densamente pobladas, en la que los servicios de seguridad como policía y ambulancias, no podían ingresar en el caso de un siniestro; estudios realizados sobre el tránsito vehicular señalaban que el japonés promedio, utilizaba 24 horas a la semana para trasladarse de su casa a su trabajo y de su trabajo a su casa, ¡dos horas de su casa a su trabajo y dos de regreso!, además de otros problemas involucrados como la falta de espacios de estacionamiento suficientes. Pero cada edificio debería albergar a ¡20,000 personas!

Esto, aunado a la necesidad de los bancos de invertir los grandes capitales acumulados por décadas en sus arcas, les llevó a la decisión de realizar grandes obras, como un aeropuerto emplazado en una isla artificial, o la construcción de tres grandes torres, las más altas del mundo, que alcanzarán los mil metros de altura total. Las Sky Towers, así las han nombrado, se localizan sobre terrenos compresibles, de baja resistencia a la carga; no se encontró terreno resistente antes de los tres mil metros de profundidad, por lo que optaron por mejorar la resistencia de las capas de sustentación aladañas al basamento utilizando miles de columnas que trabajarán a fricción.

Por la naturaleza de la isla, sujeta a fuertes movimientos telúricos, y la entrada de tifones, con velocidades de viento variables, que van desde categoría 1 a la 5, la cimentación de la primera torre deberá ser muy resistente, por lo que se optó por un cajón de concreto armado. Las necesidades de la cimentación, alcanzan varios millones de toneladas de cemento de alta resistencia, así como de aceros de alta calidad, los cuales son suministrados por varios países del orbe, entre ellos está México, con exportación – desde el 2004- de grandes cantidades a dicho país.

Las columnas de la torre en cuestión, alcanzan un peso de 20,000 toneladas cada una, lo que nos da idea de la presión que el edificio ejercerá sobre el basamento de concreto, concretos con resistencias $f_{lc}=300$ kg/cm², que son de uso normal en México, no serían en lo absoluto recomendables en la construcción de torres semejantes a ésta, aunque en México ya se obtienen concretos de $f'c=500$ kg/cm², y se han manejado en torres como las de Huixquilucan, y en el Complejo Parque Alameda, del centro de la ciudad de México. Uno de los más grandes desarrolladores estadounidense está comprando terrenos en Cozumel, por lo que no tarda México en unirse a dichos desarrollos. ¿Qué pasará si se construyen grandes torres?

El futuro próximo está requiriendo que México cuente con concretos de alta resistencia, de 800, 1000 y hasta 1,500 kg/cm², como los que se usarán en la mencionada torre de Tokio; a este respecto, la torre Taipei en Taiwán utilizó concretos de 1,200 kg/cm² y para conseguirlos, los laboratorios manejaron escoria de fundición, micro sílice y humo de sílice. Actualmente, ya se fabrican concretos de las resistencias arriba indicadas, en diversas partes del mundo, como veremos en este artículo, algunos llegan hasta los $f'c = 1,800$ kg/cm² de resistencia.

Profesores investigadores de CBI de la UAM Azcapotzalco, en esfuerzo conjunto, han estado realizando experimentos en el laboratorio de materiales de la UAM Azcapotzalco sobre estos concretos de alta resistencia, apoyando a investigadores de la UNAM, en la verificación y manejo en el laboratorio de dichos concretos, el presente artículo es un resumen de los materiales y procedimientos usados durante los trabajos de verificación de estos concretos, y que darán apoyo e inspiración a los concretos no convencionales, investigación de Administración para el Diseño y la Tecnología en proceso y tema del presente artículo.

EVOLUCIÓN DE LOS CEMENTANTES

Los cementantes modernos aparecen con la calcinación de la piedra caliza y su posterior hidratación, pero la falta de información detallada y escrita de los procedimientos, tanto de elaboración como las de uso del producto, no permitieron darles una aplicación segura a los constructores anteriores al siglo XX. Por lo que la evolución del material que en la actualidad conocemos como concreto fue muy lenta en sus orígenes (en 1824, se desarrolla y patenta el cemento Pórtland)

Pasaría más de un siglo, para que se planteara la posibilidad de utilizar nuevos componentes adicionales a los comúnmente conocidos. Con la aparición de los primeros aditivos químicos en 1938, se pudieron modificar con facilidad algunas de sus propiedades, tales como: acelerar el tiempo de fraguado con hipoclorito de calcio o cloruro de calcio, o retardar el tiempo de fraguado; o con el agregado de mineral de hierro para aumentar la resistencia a la abrasión, así como dotarlo de propiedades nuevas, a través de fluidificantes, etcétera.

Para principios de los años sesenta, apenas era conocida en México la producción de concreto con resistencias a la compresión de 350 Kg./cm², en la actualidad los especialistas en tecnología del concreto han centrado su atención en el desarrollo de métodos que puedan hacer viables la producción de concreto de rangos muy superiores (hasta de 1500 Kg./cm²). Se han realizado diversas investigaciones sobre la resistencia del concreto, las cuales han arrojado que existe un incremento de resistencia en cuanto menor sea la relación agua/cemento así como mejoras en algunas de sus propiedades. Sin embargo, ya en 1950, en Japón se realizaban ensayos con aditivos reductores de agua, permitiendo constatar las mejoras de las características del material, principalmente con relación a su resistencia, plasticidad y compacidad.

Con este antecedente, es hasta la década de los 70's cuando se desarrolla en Japón y Alemania una nueva generación de aditivos químicos (dispersantes de alto poder) basados en complejas moléculas orgánicas; su adición en el concreto permite una reducción de agua en la mezcla y, por consiguiente, un aumento de su resistencia. Estos aditivos reciben el nombre de superfluidificantes o reductores de agua de alto rango. Paralelamente se comienzan a utilizar otros "aditivos" minerales finamente divididos.

Por ejemplo, en Canadá y los países nórdicos europeos, en estos se han estudiado las propiedades del humo de sílice o micro sílice. Cuando se habla de concreto de alta resistencia es necesario indicar el rango de valores para los que el término debe aplicarse. La siguiente tabla ilustra el desarrollo en el incremento a las resistencias a compresión además es posible estudiar como se ha ido desarrollando el uso de la resistencia en los diferentes proyectos y a través del tiempo.

TABLA DE INCREMENTO DE LAS RESISTENCIAS DEL CONCRETO¹

AÑO	PROYECTO	f'c kg/cm ²	f'c MPa
1962	OUTER DRIVE EAST	420	41.2
1965	LAKE POINT TOWER	525	51.5
1972	MID CONTINENTAL PLAZA	630	62
1976	RIVER PLAZA	630	62
1982	CHICAGO MERCANTILE EX.	630	62
1986	COLUMBIA CENTER	675	66
1988	TWO UNION SQUARE	990	97
1989	CONTRUCTION TECH LABS	1200	117.7
1990	ONE PEACHTREE CENTER	850	83

El incremento de la resistencia del concreto ha ido evolucionando gradualmente y se espera que las investigaciones que se efectúen posteriormente se obtengan concretos con resistencias superiores. A la fecha, se habla ya de concretos de muy alta resistencia y cuya clasificación se propone dividiéndola en cuatro clases diferentes.

CONCRETOS ALTA RESISTENCIA CONTEMPORÁNEOS²

Clase	f'c	
	Kg/cm ²	MPa
L	765 +/- 127	75 +/- 12.5
LI	1,020 +/- 127	100 +/- 12.5
LII	1,274 +/- 127	125 +/- 12.5
LV	Más de 1500	Más de 150

¹ Laboratorio de Prueba de Materiales UAM-A. Tabla del MI FLORES Bustamante, J. Antonio, modificada de MORENO J. "The State of the Art of Hight strength Concrete in Chicago, Congreso Internacional, Concreto 94 IMCYC, Acapulco 94.

² Laboratorio de Prueba de Materiales UAM-A. Tabla del MI FLORES Bustamante, Antonio, tomado de Aitcin P C.

En las pruebas de laboratorio de la UAM - Azcapotzalco, se ha podido verificar que la producción de concretos de rangos superiores a los 400 Kg./cm² (39.2 MPa) con materiales convencionales y bajo cuidadoso control de calidad es técnica y económicamente factible. Por otra parte, se encontró que no es necesario utilizar un cemento con características especiales, por que se han podido elaborar concretos de altas resistencias utilizando cementos de acuerdo a la norma ASTM C 150, de los tipos I, II y III. Sin embargo ciertas combinaciones de súper plastificante y cementos son mucho mas favorables que otras mezclas, sobre todo en lo que concierne a las pérdidas de revenimiento.

La utilización del súper plastificante es obligatoria, combinada o no con un agente retardador según el comportamiento reológico³ de las combinaciones mencionadas. El procedimiento para elaborar concretos de alta resistencia se basa en la correcta combinación de elementos y factores que favorecen el aumento de la resistencia, entre éstos se pueden mencionar agregados bien seleccionados y limpios, grava de pequeño tamaño y arena gruesa, cemento Pórtland normal con módulo de finura alto y contenidos importantes de silicato tricálcico; aditivos químicos súper fluidificantes y reductores de agua de gran comportamiento; y, aditivos minerales como la escoria de altos hornos, ceniza volante (fly ash) y microsíllica (sílica fume).

Los investigadores en general, consideran que la composición química y la finura del cemento jugarán un papel importante, un agregado grueso de buena calidad es igualmente fundamental, es decir, que tenga una alta resistencia a la compresión, así como que su capacidad de adherencia a la pasta sea buena y una absorción moderada o casi nula. En cuanto a la arena se recomienda que tenga un módulo de finura cercano a 3.00, sin embargo, se han realizado mezclas para concretos de alta resistencia con módulos de finura que oscilan entre 2.83 y 3.36.

Se han utilizado productos de pizarra, caliza, arenisca, andesita etc. aunque en este caso la mayoría de los investigadores concuerdan que su intervención no influye en forma sustancial en la resistencia del concreto. Se han utilizado cenizas volantes (fly ash) u otros materiales puzolánicos, basándose en los resultados obtenidos con este concepto en la Universidad de Columbia, EUA en los años 50, para reemplazar un pequeño porcentaje de cemento Pórtland, en las mezclas de concreto obteniéndose un incremento significativo a los esfuerzos de compresión, así como un descenso en la producción de calor. También han empleado los investigadores combinaciones cemento/humo de sílice o de cemento/escoria/humo de sílice para fabricar concretos de alta resistencia, como veremos en seguida.

El humo de sílice o microsíllice (sílica fume o microsíllica) es un material que consiste principalmente de bióxido de sílice (SiO₂), y es un subproducto que se obtiene durante la fabricación del silicio y ferrisilicio al capturar los humos que se producen en los hornos. Han llegado a coincidir algunos investigadores que se tienen dos efectos principales en la elaboración de concretos:

- 1) Un efecto semejante al de un reductor de agua que se refleja en una disminución de la relación agua/cemento, cuando el mineral se adiciona en combinación con un súper fluidificante.
- 2) "El efecto inherente", que se presenta en una ganancia en resistencia en los concretos hechos de microsíllice, en comparación con aquellos que no se les agregó y que tienen la misma relación agua/cemento.

³ Reología: Ciencia que comprende determinados capítulos de la Física, que estudia la viscosidad, plasticidad, elasticidad y fluidez de la materia en general.

Referente a los aditivos minerales finamente divididos, se establece una clasificación de los agregados minerales más habituales, y que se presenta en la siguiente tabla⁴, así como aspectos generales en relación a su composición química, mineralógica y características de sus partículas.

CLASIFICACIÓN	COMPOSICIÓN QUÍMICA Y DE MINERALES	CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS
CEMENTANTES Y PUZOLANAS *Escorias de Alto Horno como Cementante	Normalmente silicatos vítreos de calcio, magnesio, aluminio y sílice. Pueden contener pequeñas cantidades de compuestos cristalinos del grupo de las melilitas	Antes del tratamiento similares a la arena, conteniendo de un 10 a un 15% de humedad
*Cenizas volantes altas en calcio -Cementante y Puzolana-	Fundamentalmente silicatos vítreos, conteniendo calcio, magnesio, aluminio y álcalis. Pequeñas cantidades de materia cristalina en forma de SiO ₂ , AC ₃ , CaO libre, periclasa, SC, y SA ₃ C ₄ , otros, menos del 2%	Polvo con un 10 a 15% de partículas > 45 µm (3,000-4,000 cm ² /g Blaine). Son esferas sólidas de Ø < 20 µm, de superficie lisa y menos limpia que las cenizas volantes bajas en calcio.
PUZOLANAS MUY ACTIVAS *Humo de Sílice	Fundamentalmente, Sílice pura en estado vítreo	Polvo finísimo de esferas sólidas de 0.10 µm de Ø, y una superficie específica de 20 m ² /g, por absorción de nitrógeno
*Cenizas de Arroz (Proceso MP)	Esencialmente Sílice pura en estado vítreo	Partículas menores de 45 µm, con una superficie específica de 60 m ² /g por absorción de nitrógeno.
PUZOLANAS NORMALES *Cenizas volantes -bajas en calcio-	Mayoritariamente, silicatos vítreos, que contienen aluminio, hierro y álcalis. Adicionalmente una pequeña porción cristalina de cuarzo, silimanita, magnetita, hematites y muilita.	Polvo con un 10 a 15% de partículas > 45 µm Sup. Blaine. De 2,000 a 3,000 cm ² /g. La mayoría de partículas son esferas sólidas con un Ø 20 µm. Cenosferas y plerosferas.
*Puzolanas naturales	Junto a silicatos de aluminio vítreos, puzolanas naturales, conteniendo cuarzo, feldespato y mica.	Las partículas son > 45 µm, y presentan superficie áspera
PUZOLANAS POCO ACTIVAS *Escoria de Alto Horno enfiada lentamente, cenizas de hogar, escorias de calderas y cenizas de arroz normales	Silicatos cristalinos, con una pequeña porción de materia vítrea.	Los materiales deben pulverizarse hasta un grado muy fino para que desarrollen sus propiedades puzolánicas. Las partículas molidas tienen una textura rugosa

MATERIALES

Es del conocimiento general, que el concreto se compone principalmente de ciertos agregados, cemento Portland o cemento combinado, agua, y en algunos casos puede tener otros materiales cementantes y/o aditivos químicos. También puede contener cierta cantidad de aire atrapado o deliberadamente incluido, que se obtiene mediante el empleo de un aditivo o de un cemento inclusor de aire. En México existen varias empresas que se dedican a la fabricación de cemento, lógicamente existen normas mínimas de calidad que deben cumplir, fuera de ello, los diferentes cementos comerciales disponibles en la actualidad *varían significativamente en su química y finura de molido, lo que incide en la demanda de agua necesaria para obtener la llamada “consistencia normal” de la pasta, y también en su tiempo de fraguado.*

En la producción de cementos Portland de la Zona metropolitana se tienen varias marcas, pero todas deben cumplir con las normas oficiales mexicanas: la NOM -C - 123(ASTM - C - 150) para los cementos tipo I al V y la NOM-” C -224 (ASTM--C -595) para los puzolánicos, así como la NOM -C - (ASTM -C -595) para el de escoria de alto horno. Para ser objetivo en el trabajo, se hace necesario primero un recuento de las clases y tipos de cemento para concreto hidráulico que se producen, o pueden producirse en las fábricas del país, sus respectivas características y usos generales determinados.

CEMENTOS PARA CONCRETO HIDRÁULICO NORMALIZADOS EN MÉXICO⁵

TIPO	PRODUCCIÓN	CARACTERÍSTICAS Y USO PROPUESTO	OPCIONES
A) CEMENTOS PORTLAND SIMPLES: NOM – C-1			
I	Normal	Para uso general en construcciones de concreto, cuando no se requieren las propiedades especiales de los otros tipos	FF, BA
II	Normal	Destinado a construcciones de concreto expuestas a una acción moderada de los sulfatos, o en donde se requiere moderado calor de hidratación	FF, BA, MH
III	Limitada	Para la elaboración de concretos en los que se requiere alta resistencia a edad temprana	FF, BA, MS, AS
IV	Limitada	Se produce para el norte de México	
V	Limitada	Cuando se requiere alta resistencia a la acción de los sulfatos	FF, BA
Blanco	Normal	Para usos donde se requiere el color blanco en vez del gris. Se clasifica de acuerdo con la composición química del clinker	
B) CEMENTOS MEZCLADOS PORTLAND – PUZOLANA: NOM – C-2			
Puz – 1	Normal	Cemento Pórtland – puzolana, para uso general en construcciones de concreto.	FF, MH, MS, AS, EXP

⁵ CFE, Instituto de Ingeniería UNAM. Manual de Tecnología del Concreto. Sección I, ed. Limusa, México 1994. pp 15 y 16.

Puz – 2	Normal	Cemento Portland – puzolana, para uso en construcciones de concreto donde no son requeridas resistencias altas a edades tempranas.	FF, MH, MS, AS, EXP
C) CEMENTOS PORTLAND – ESCORIA DE ALTO HORNO: NOM – C – 175			
I	Descontinuado	Para uso general	
II	Descontinuado	Cuando se requiere un moderado calor de hidratación y una moderada resistencia a los sulfatos	

También se fabrican cementos especiales como el antibacteriano y otros, que no fueron estudiados.

Las opciones. - Solamente aplicables previo acuerdo entre el comprador y el fabricante.

FF	Fraguado falso: la penetración final no debe ser menor del 50% de la inicial, en la prueba por el método de pasta de cemento NOM – C – 132
BA	Bajos álcalis: el contenido de álcalis totales, expresados como Na ₂ O, no debe exceder de 0.60%
MH	Moderado calor de hidratación: se puede especificar alternativamente que la suma C ₃ A + C ₃ S, no exceda de 58%, o bien, que el calor de hidratación no exceda de 70 cal/g a los 7 días, de 80 cal/g a los 28 días. Si se especifica cualquiera de estos requisitos opcionales alternativos, las resistencias a la compresión especificadas a los 3, 7 y 28 días deben reducirse en un 20%.
MS	Moderada resistencia a los sulfatos: el contenido de aluminato tricálcico (C ₃ A) en el cemento (o en el clinker si es Portland – puzolana) no debe exceder de 8%.
AS	Alta resistencia a los sulfatos: el contenido de aluminato tricálcico (C ₃ A) en el cemento (o en el clinker si es Portland – puzolana) no debe exceder de 5%.
EXP	Inhibición de la expansión debida a la reacción álcali – agregado (sólo para cemento Portland – puzolana): la expansión en mortero con vidrio de borosilato como agregado (NOM – C – 180), no debe exceder de 0.20% a los 14 días, ni de 0.05% a los 91 días.

Algunas observaciones: Acerca de las condiciones de producción.

PRODUCCION NORMAL: No significa que el cemento se produzca en todas las fábricas, sino que se encuentra normalmente disponible en el mercado nacional.
PRODUCCIÓN LIMITADA: Significa que no se encuentra normalmente disponible en el mercado nacional, pero puede ser producto por algunos fabricantes mediante un convenio específico con el comprador
PRODUCCIÓN DESCONTINUADA: Significa que el cemento se produjo en el pasado, porque existen normas nacionales aplicables, pero no se produce en la actualidad.

En nuestros días, existen dos procesos que reducen la variabilidad anteriormente indicada: uno es el diagnóstico y dosificación de la materia prima, para ello algunas fábricas han implantado controles automáticos a través de rayos gamma, hacen, un análisis químico de los materiales que ingresan al proceso, en sustitución de las tradicionales reacciones químicas o de los rayos x, donde estos últimos implican correcciones a los lotes ya *fabricados*.

El segundo es mejorar la uniformidad en la molienda, a este respecto el estándar se da en los molinos de bolas, proceso que se está mejorando al cambiar a otro tipo de molinos que reducen aproximadamente en un 10% la variabilidad con respecto a la producida por los molinos estándar utilizados, conjuntamente con ellos, los separadores de cuarta generación aseguran una alta eficiencia en los resultados.

LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

Estudios realizados en México indican que para mejorar las propiedades mecánicas de los concretos que se emplean, es necesario emplear gravas con la menor absorción posible, se toma en cuenta que las gravas calizas tuvieron un comportamiento satisfactorio en cuanto a todas las propiedades mecánicas de los concretos que se habían estudiado (normales). Se debe resaltar que en la producción de agregados gruesos, dentro de la zona metropolitana también existen los de piedra basáltica y los de andesita, que durante muchos años fueron utilizados principalmente por economía.

En México son de fácil acceso los tres tipos de rocas mencionadas, pero como tendencia general, predominan las de tipo ígneo, particularmente en toda la porción occidental del país; en segundo término, se hallan las rocas sedimentarias que abundan en las regiones centro - norte, oriente y sur - sureste; por último, las rocas metamórficas son las más escasas y se ubican en el territorio nacional en forma más o menos errática.

En el siguiente mapa, nos enfocamos al estudio de los suelos de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo y parte de los estados de Chiapas, San Luís Potosí, Nuevo León y Coahuila, ya que están conformados por grandes mantos de roca caliza y la ausencia de rocas duras de diferente origen.

MARCO FISIOLÓGICO DE LA REPÚBLICA MEXICANA⁶



En este mapa de la República podemos notar que la costa oriental, conformada por la sección de la gran llanura de Norteamérica, la llanura costera del Golfo norte, la llanura costera del Golfo sur, incluyendo la península de Yucatán, están formadas por mantos de rocas calizas sedimentarias suaves, que requieren de

6 MI Flores Bustamante. "Marco Fisiográfico de la República Mexicana"

la investigación metodológica en la verificación de las calidades de los concretos ahí utilizados, el cual es el tema del Programa de Investigación DN-50 para la Innovación de la Tecnología, del Grupo de Investigación de Administración para el Diseño y la Tecnología, con el tema de “concretos no convencionales”.

Es oportuno mencionar que, la calidad física de las calizas es muy variable, desde muy mala hasta muy buena calidad -en términos generales-, de acuerdo a la norma ASTM- C294. Por lo que se dice como ejemplo que, una caliza muy suave es la llamada “Creta” la cual se puede localizar en las zonas fisiográficas indicadas, particularmente en la Península de Yucatán, donde se le denomina “sashcab”, sus características particulares la hacen muy poco adecuada como agregado en el concreto de alta resistencia y también cuando contiene porcentajes altos de dolomita, que ocasiona que se vuelva reactiva con los álcalis en el concreto.

En el centro de la República, principalmente en México, la arena más usual en el empleo de concreto es la Andesita de felsítico de las rocas ígneas extrusivas (volcánicas), porque resultan ser las únicas desde el punto de vista económico, viables para la fabricación de los concretos dentro del Distrito Federal⁷. Se recomienda limitar la cantidad de finos (un máximo de un 5%), es decir, los porcentajes mínimos (en peso) del material utilizado que pasa las mallas de 0.3mm (W 50) y de 0.15mm (W 100) que sean reducidos a 5% y 0%, respectivamente, siempre y cuando el agregado se utilice en un concreto con aire incluido que contenga más de 237 kg. de cemento por m³ cuando el concreto no tenga un contenido de aire ‘superior’ de 3%; O bien cuando el agregado se emplee en un concreto que contenga más de 297 kg. de cemento por m³ cuando el concreto no tenga inclusión de aire.

En los casos anteriores se debe usar un aditivo mineral aprobado para compensar la deficiencia del material que pase estas dos mallas. También debe cumplir con otra serie de requerimientos que marca la Norma ASTM-C-33, especialmente en los casos de los finos plásticos que contienen los agregados es necesario para que la contracción lineal de estos finos sea nula, en otras palabras; para que ocurra esto último, deberá de estar exenta de finos plásticos.

Una investigación realizada, declara que un módulo de finura:

1. Abajo de 2.5 en la arena da al concreto una consistencia pegajosa y difícil de compactar.
2. Con módulo alrededor de 3.0 da una mejor maleabilidad y resistencia a la compresión.

ADITIVOS QUÍMICOS Y MINERALES

Dentro de la producción de concretos de alta resistencia los aditivos se utilizan frecuentemente, tanto químicos como minerales, por lo cual una nueva consideración es la optimización del sistema cemento – aditivo; ésta optimización se requiere, porque dependiendo del aditivo usado, se obtendrán diferentes efectos de acuerdo con el tipo y marca de cemento empleado, dado que la reacción es de acuerdo a las cantidades de los componentes químicos, entre otros.

Los químicos más usados para la elaboración de este tipo de concreto son:

- Reductores de agua de fraguado normal, (ASTM-C-494, tipo “A”): Los reductores de agua típicos proveen mejoras en la resistencia sin alterar la velocidad de fraguado del concreto, su selección deberá basarse sobre el desarrollo de las resistencias porque al optimizar la dosificación se tendrán mayores resistencias, al reducir su relación agua/cemento, pero se podría prolongar el tiempo de fraguado.

⁷ Revista IMCYC, Núm. 192, mayo 87.

- Retardantes (ASTM-C-494, tipo B y D): Un aditivo retardante es frecuentemente benéfico para controlar la hidratación temprana, puede controlar la rapidez de fraguado y proveer más flexibilidad en la hora del colado. Debido a que frecuentemente provee un incremento a la resistencia, ésta será proporcional a la relación de la dosificación. Las mezclas pueden ser diseñadas para diferentes cantidades si se supone una diferencia significativa en las proporciones de los materiales que componen el concreto.
- Reductores de agua de alto rango, superfluídificantes o superplastificantes empleados a menudo como sinónimos, (ASTM-C-494, tipos "F" Y "G"): Una de sus aplicaciones consiste en utilizarse para fabricar concretos de baja relación agua/cemento y de alta resistencia con trabajabilidades dentro de los límites normalmente especificados para consolidar por medio de vibración interna. Con su utilización se puede obtener una reducción de agua entre el 12% y 30%, con esta disminución en la relación agua/cemento permite obtener resistencias superiores a compresión tanto a edades tempranas como finales⁸.

DIVISIÓN DE LOS ADITIVOS MINERALES:

- Las cenizas volantes usadas, están clasificadas de acuerdo a la norma ASTM-C-618, en las clases " F " Y " C " : Las primeras son normalmente producidas por la calcinación de antracita o carbón bituminoso y tienen propiedades puzolánicas, pero muy pocas o nulas de tipo cementante. Las segundas se obtienen por la calcinación de lignito o carbón subbituminoso y además de las propiedades puzolánicas tienen algunas propiedades cementantes autógenas. Es de suma importancia que este aditivo mineral sea examinado, aceptado por una investigación detallada y uniforme, para producir resistencias propias y compatibles con los otros materiales en las mezclas de concretos de alta resistencia.
- Humo de sílice o micro sílice: es un aditivo que resulta de la reducción de silicio muy puro con carbón mineral en un horno de arco eléctrico con la manufactura del silicio o de aleaciones de ferrosilicio. Su alto contenido de sílice y su extremada fineza lo hace un efectivo material. El microsíllice reacciona puzolánicamente con la cal durante la hidratación del cemento. Es necesario, en la utilización de este aditivo mineral, la adición de un superplastificante para poder dar el revenimiento requerido, manteniendo así la trabajabilidad en el concreto.

Por último, el cemento de escoria, consiste en una escoria granulada de alto horno molida, fabricada a partir de la escoria de alto horno de hierro, siendo un producto no metálico que consiste principalmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y de otras bases que se desarrollan en la fundición simultáneamente con el hierro en los altos hornos. Dicha escoria se clasifica de acuerdo a la norma ASTM-C-989. Las clases de cementos de escoria portland son cubiertas por norma ASTM-C-595.

AGUA:

Para producir concreto, el agua, como se sabe, debe ser incolora, insípida e inodora, es decir, ser clara y evidentemente limpia, en caso de contener sustancias que la decoloren o le den sabores u olores extraños, indeseables ó sospechosos, no debe utilizarse, a menos que existan registros de concretos elaborados con éstas y que no afecten la calidad del mismo. Los parámetros ideales que deben cumplir las aguas naturales o contaminadas, diferentes de las potables, para el uso y curado del concreto se encuentran en la norma mexicana NOM- C -122

⁸ IMCYC, México, 1992. pp 67-72.

TECNOLOGÍA DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Actualmente no existe una técnica, ni metodología, específica para la elaboración de concretos de altas resistencias, sin embargo, algunos investigadores mencionan en sus reportes y artículos algunos principios básicos, metodología o técnicas para la obtención de estos tipos de concretos,

Tanto en los estudios realizados ya conocidos, como los realizados en los laboratorios de la UNAM y de la UAM Azcapotzalco, se menciona que se puede obtener concreto de resistencia mayor a 815 kg/cm^2 MPa) con la tecnología actual incluyendo métodos complementarios como por ejemplo:

Mezclado previo del cemento y del agua (Lechada) **con una revoladora de alta velocidad**. Uso de aditivos, por ejemplo, superfluidificantes.

Compactación de mezclas muy secas mediante rodillos vibratorios.

Impregnación con polímeros

Limitación o confinamiento del concreto en dos direcciones⁹

Así mismo, basados en sus pruebas y las que menciona Klieger, se recomiendan los siguientes medios para obtener concretos de alta resistencia temprana:

- Uso de mezclas de baja relación agua cemento
- Uso de cemento tipo III
- Uso de vibración mecánica para permitir más agregados por unidad de volumen.
- Uso de vapor saturado a presión atmosférica a temperaturas por debajo del punto de ebullición del agua, junto con aislamiento.
- Control muy cuidadoso de la granulometría del agregado, los pesos de la mezcla de prueba, el mezclado, la compactación y el curado.
- Uso de curado por agua –exclusivamente- durante las primeras horas de la hidratación.¹⁰

Algunos investigadores usan como técnicas para la producción de concretos de alta resistencia su composición, una alta velocidad de mezclado en la mezcla y un revibrado, y la utilización de un aditivo para incrementar la resistencia del concreto.

La composición incluye la adición de un pequeño porcentaje de tierra fina y la hidratación completa del cemento Portland en la mezcla de concreto fresco. Se supone que lo anterior es para ayudar en el incremento a la resistencia al esfuerzo de compresión, sin embargo, el mecanismo por el cual se produce no está plenamente explicado.

El proceso de una alta velocidad de mezclado, involucra el avance de la preparación de la mezcla agua/cemento (lechada), la cual, será combinada con agregados para producir el concreto. Así se obtiene un esfuerzo superior de compresión, es presumiblemente atribuible a la más eficiente hidratación del cemento, resultado del contacto directo de las partículas de éste y el agua, llevado a cabo en el mezclado vigoroso de la pasta.

⁹ Revista IMCYC, núm. 164, 1984

¹⁰ FIORATO, Anthony, E., op. Cit, p.44.

La revibración está determinada a lo complejo del proceso de endurecimiento o al principio del proceso de hidratación del cemento. Dos teorías presentan propuestas para pretender explicar el incremento en el esfuerzo.

1. En la primera, se apoya en que el mortero y concreto, por la revibración, será más densamente consolidado, ello permitirá usos más efectivos de los productos de hidratación.
2. La Segunda, considera que el proceso vibratorio en algunas direcciones acelera y prolonga la producción de hidratos y, consecuentemente, incrementa la resistencia.

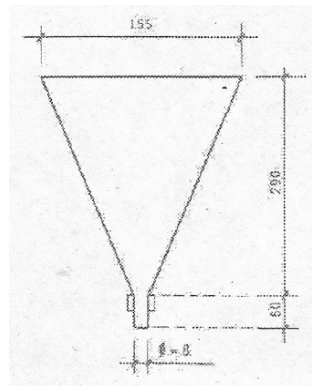
Es de tomar en cuenta que F. De Larrard desarrolla un procedimiento basado en realizar la mayoría de los ensayos sobre materiales modelo: Lechada para los ensayos reológicos y morteros para ensayos mecánicos.

El Proceso de dosificación propuesto por Larrard, es el siguiente:

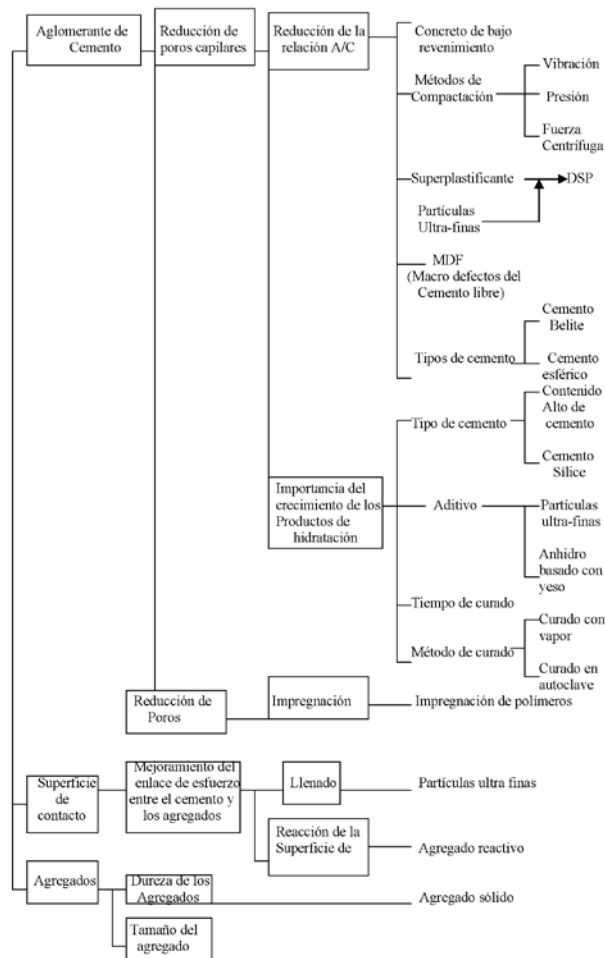
1. Determinada una composición granulométrica de agregados adecuada (definida previamente siguiendo el método experimental de estudio de mezclas, u otro que al menos adopte como referencia una curva granulométrica válida), se dosifica un concreto de control que contenga gran cantidad de superplastificante y una cantidad de cemento que corresponda a la menor demanda de agua – como primera aproximación, pueden adoptarse 425 kg/m³ -. El contenido de agua de este concreto de control debe ajustarse para obtener una trabajabilidad correcta, susceptible de ser controlada mediante un aparato dinámico
2. Se determina la fluidez de la pasta del concreto de control mediante la medida de su tiempo de flujo a través del cono de Marsh. La relación agua/cemento de esta pasta debe establecerse en condiciones controladas de humedad de los agregados.
3. Se dosifican diferentes lechadas mediante la variación de los porcentajes de cemento y agregados.
4. Por cada lechada se añade una pequeña cantidad de superplastificante y se ajusta la cantidad de agua para obtener una pasta adhesiva (sí bien que pase a través del cono en un tiempo de flujo aproximadamente igual a 20 segundos). Con la relación agua/cemento fijada momentáneamente, se añaden cantidades crecientes de superplastificante hasta que el tiempo de flujo no disminuya más. Esta cantidad de superplastificante representa el valor de saturación.
5. Se ajusta el contenido de agua para obtener el mismo tiempo de flujo que en la lechada de control. En consecuencia, la relación agua/cemento debe ajustarse a cada pasta.
6. Se determina la variación de las características de flujo .en el tiempo de duración previsto para la puesta en obra del concreto. Si el tiempo de flujo se incrementa en exceso, debe añadirse un agente retardante para mantenerlo en el valor de referencia.
7. Se determina la resistencia a compresión de los diferentes morteros dosificados, mediante ensayos directos o, estimativamente, utilizando la fórmula de Feret modificada.
8. Se establece una primera dosificación del concreto de alta resistencia usando materiales granulares y el mismo volumen de pasta que en el concreto de control, e incorporando la corrección de agua que corresponda en función de la humedad de los áridos en el momento del mezclado. De acuerdo con el modelo de Farris, el concreto de alta resistencia y el concreto de control tendrán la misma
9. Se verifica la idoneidad de la consistencia y resistencia resultantes.

CONO MARSH (DIMENSIONES ENMM)

Abertura circular superior: 155 mm
 Longitud o altura del cuerpo cónico: 290 mm
 Longitud o largo de la boquilla: 60 mm
 Diámetro de la salida de la boquilla: 8 mm.



TÉCNICA PARA LOGRAR ALTOS ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN EL CONCRETO¹¹



11 Laboratorio de Prueba de Materiales UAM-A. Organigrama del MI Flores Bustamante Antonio.

CONCLUSIONES

En este artículo presentamos tanto la información técnica como los procedimientos recogidos en diversas publicaciones científicas sobre la generación de concretos de alta resistencia que se han venido realizando en diversas partes del mundo desde mediados del siglo XX, hemos también señalado los motivos que nos llevan al estudio de los concretos en nuestro país, aparentemente sencillo, parece ser que sólo bastaría con aplicarlos para que los resultados fueran los indicados en las publicaciones mencionadas, pero al realizar las numerosas comprobaciones, sorprendentemente no se dieron los resultados esperados, prácticamente, no se obtuvieron más que resistencias de concreto normales, y con algunas diferencias marcadas en la velocidad del incremento de la resistencia en relación con el tiempo, de una marca a otra distinta. Es decir, algunas marcas de cemento permitían fabricar concretos que obtenían rápidamente una resistencia elevada y en las siguientes horas el resto de su resistencia lo obtenían lentamente, en otros sucedía totalmente lo contrario. Se hizo necesario realizar numerosos experimentos para ir comprendiendo el orden de aplicación de los materiales, la velocidad de mezclado necesaria, medir cuidadosamente las proporciones de los componentes implicados en cada una de las diferentes resistencias en experimentación, todo ello ha significado un gran esfuerzo por parte de los investigadores, esfuerzo que todavía no terminan, y que requerirán un redoblado impulso para conseguir los resultados esperados.

En México, el crecimiento de la población, lo lleva a buscar asentamiento en lugares con características particulares como las de la península de Yucatán, en donde la falta de los áridos apropiados se dispone de materiales suplentes cuyos resistencias y características no están lo suficientemente investigados, lo que redundo en alto riesgo para la seguridad de dichas personas, sobre este particular, en la investigación DN-50, nuestro grupo está ampliando sus lazos con investigadores que llevan la misma línea en la Universidad Autónoma de Yucatán, para realizar un trabajo mucho más eficiente, con lo que la investigación se extiende a materiales como: arena de tepojal, tezontle y otros materiales regionales; por lo que podemos decir que el trabajo apenas comienza.

En este trabajo no se está presentando un informe técnico de investigación, por lo que sólo se presentan los datos que se consideraron de interés, por lo que no aparecen por ejemplo, fórmulas químicas, ensayos, etcétera. Por último, el presente artículo pretende dos objetivos: Primero, dar a conocer uno de los caminos que la investigación en la Unidad Azcapotzalco de la UAM está siguiendo, con el fin de obtener apoyo económico externo, tal como sucede con la UNAM. Y segundo, interesar a docentes y alumnos en la investigación, con el objeto de obtener profesionistas con más inventiva, para su bien propio, capaces de ingresar con éxito en un mundo competitivo como el actual, y que México está solicitando con urgencia.

BIBLIOGRAFÍA

- CFE, Instituto de Ingeniería UNAM. Manual de Tecnología del Concreto. Sección I, ed. Limusa, México 1994. pp 15 y 16.
- FIORATO, Anthony, E. "PCA Research on High Strenght Concrete", Concrete internacional: Design & Construction, V. II No. 4 Apr., 1989, p.44.
- IMCYC, México, 1992. pp 67-72.
- Laboratorio de Prueba de Materiales UAM-A. Tabla del MI FLORES Bustamante J. Antonio, modificada de MORENO J. "The State of the Art of Hight strength Concrete in Chicago, Congreso Internacional, Concreto 94 IMCYC, Acapulco 94.
- Laboratorio de Prueba de Materiales UAM-A. Tabla del MI FLORES Bustamante Antonio, tomado de Aitcin P C
- Laboratorio de Prueba de Materiales UAM-A. Organigrama del MI FLORES Bustamante Antonio.
- Metha, P. K. Concrete Structures, Properties and Materials, Prentice Hall Inc. 1986.
- Revista IMCYC, núm. 164, 1984
- Revista IMCYC, Núm. 192, mayo 87.