

COMPILACIÓN DE ARTICULOS DE
INVESTIGACIÓN OCTUBRE 2009.

Red Académica Internacional UADY, UAM, WPI.



**CONCRETOS
ESPECIALES EN
LA
CONSTRUCCIÓN**

Mtro. Luís Rocha Chiu

CONCRETOS ESPECIALES EN LA CONSTRUCCIÓN

CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Mtro. Luis Rocha Chiu

Departamento de Materiales UAM – A
rcla@correo.azc.uam.mx

INTRODUCCIÓN

El concreto de cemento Pórtland es actualmente el material de construcción más utilizado en el mundo porque para la mayoría de las aplicaciones ofrece propiedades de ingeniería y estéticas adecuadas a bajo costo. Las mezclas de concreto se pueden diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad que cumplan con los requerimientos del diseño arquitectónico y estructural.

El concreto en estado endurecido soporta de manera adecuada las cargas de compresión, por esta razón la resistencia a compresión del material es la que tradicionalmente se especifica en los proyectos de construcción. Debido a que la resistencia del concreto es una función del proceso de hidratación, que es relativamente lento, las especificaciones y las pruebas para medir la resistencia del concreto se basan en muestras bajo condiciones normalizadas. Se realizan pruebas para diferentes propósitos, pero los dos objetivos principales de una prueba son el control de calidad y el cumplimiento de las especificaciones.

La calidad y las especificaciones difieren de acuerdo con el tipo de aplicación del concreto: edificios, puentes, túneles, pavimentos, pisos, etc. Cuando no se requiere una propiedad especial en el material, se emplea concreto normal con propiedades convencionales. Sin embargo, cada vez es más común especificar características especiales en el concreto debido a complejidades en los proyectos, ya sean por su tamaño como los grandes edificios o puentes, o por condiciones desfavorables de exposición de la estructura como en obras marítimas o plantas de tratamiento de aguas residuales.

Este artículo expone las propiedades más importantes del concreto normal y del concreto de alto comportamiento, en particular se hace referencia al concreto de alta resistencia en cuanto a su forma de producción y sus aplicaciones en edificios altos. Se presentan los resultados del proyecto de investigación sobre concretos de alta resistencia realizados en el Laboratorio de Construcción de la Universidad Autónoma Metropolitana en la Unidad Azcapotzalco.

TIPOS DE CONCRETO

El concreto es una mezcla de cemento, agua, agregados grueso y fino (grava y arena), aditivos y aire (Figura 1). En concretos de características especiales se incluyen en la mezcla adicionantes minerales como la ceniza volante (fly ash) o los colorantes. En estado fresco, es una mezcla fluida que se puede moldear aún después de algunas horas de haber sido elaborada, hasta que se presenta el fraguado inicial del concreto a partir del cual comienza a endurecer, ganando resistencia conforme avanza el tiempo.



Figura 1. Componentes del concreto

Es evidente que las propiedades del concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido, dependen fundamentalmente de las características de cada uno de sus componentes, pero es indudable que la relación agua/cemento, la calidad y naturaleza de los agregados son aspectos que influyen en la mayor parte de dichas propiedades.

Tabla 1. Requisitos del concreto (Reglamento de Construcciones para el D.F.)

Tipo de Concreto	Peso volumétrico (kg/m ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
Resistencia Normal Clase 1	> 2,200	250-400	11,000 $\sqrt{f'c}$ (b) 14,000 $\sqrt{f'c}$ (c)
Resistencia Normal Clase 2	1,900-2,200	200-250	8,000 $\sqrt{f'c}$
Alta resistencia	> 2,200	400-700	8,500 $\sqrt{f'c} + 50,000$ (b) 8,500 $\sqrt{f'c} + 110,000$ (c)
Concreto Ligero	< 1,900	175 *	8,000 $\sqrt{f'c}$ *

(b) Agregado grueso de basalto

(c) Agregado grueso de caliza

* Requisitos del American Concrete Institute

En las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal se establecen los requisitos que debe cumplir el concreto de resistencia normal empleado para fines estructurales y las obras en las que pueden ser utilizados cada una de las clases de concreto. La Tabla 1 presenta los requisitos respecto a propiedades como el peso volumétrico, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad necesarias en las obras donde se especifique concreto normal estructural, concreto de alta resistencia y concreto ligero.

En términos generales, el concreto de resistencia normal es una mezcla de cemento, agua, agregados grueso y fino (grava y arena) y aire, de aplicación convencional en elementos como: cimentaciones, muros, columnas, losas y vigas en edificaciones que requieren resistencias a la compresión entre 150 y 400 kg/cm².

El concreto de alto comportamiento es un material de aplicación especial, de acuerdo con características específicas requeridas en las construcciones, como: alta resistencia, bajo o alto peso volumétrico, resistente a agentes químicos, a condiciones de clima extremo o tránsito intenso. Para dosificar estos concretos se utilizan, además de los materiales convencionales del concreto, aditivos químicos y minerales. Pueden ser necesario emplear técnicas especiales de mezclado, colocación y curado.

Actualmente los concretos de alto comportamiento están siendo usados principalmente en edificaciones como grandes edificios, puentes, túneles y presas, las cuales requieren de una alta resistencia, durabilidad y alto módulo de elasticidad. En la Tabla 2 se mencionan algunas de las propiedades que se pueden requerir en estos concretos.

Tabla 2. Concretos de alto comportamiento

Tipo de Concreto	Aplicación
Alta resistencia	En cimentaciones especiales, edificios de concreto de gran altura y puentes
Alto módulo de elasticidad	En cimentaciones especiales, edificios de concreto de gran altura y puentes
Resistencia a la abrasión	Pavimentos de concreto y pisos industriales con tránsito pesado de maquinaria o vehículos y en obras hidráulicas
Mayor durabilidad y vida útil prolongada.	En obras públicas como: presas, aeropuertos, puertos, puentes, carreteras y túneles
Baja permeabilidad	Concreto que protege al acero de refuerzo de la corrosión como en obras marítimas, plantas de tratamiento y plantas industriales.
Resistencia al ataque químico	Su aplicación puede ser en hospitales, plantas agrícolas o industrias donde se trabaje con sustancias ácidas.
Alta resistencia a la congelación y deshielo	Estructuras de concreto sujetas a clima extremo de bajas temperaturas
Tenacidad y resistencia al impacto	Plantas industriales y talleres mecánicos, donde se requiere de una alta resistencia y dureza superficial del concreto

CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Antecedentes. Cuando se habla de concreto de alta resistencia, es necesario indicar el rango de valores para los que el término debe aplicarse, pero antes de intentar acotar las resistencias para las cuales puede usarse esta acepción, puede ser útil describir cómo se han venido incrementando en las últimas décadas los valores de la resistencia a la compresión. En los años cincuenta, un concreto con resistencia a los esfuerzos de compresión de 350 kg/cm^2 (34.3 MPa) era considerado de alta resistencia; hoy día, este valor es considerado normal. En la siguiente década, valores de los esfuerzos de compresión de 400 a 500 kg/cm^2 (39.2 a 49.1 MPa) eran usados comercialmente en algunos sitios (principalmente en países del primer mundo), y para los ochenta ya se producían concretos con valores que llegaban casi al doble.

El desarrollo del incremento de la resistencia del concreto ha sido gradual, y seguramente las investigaciones que se efectúen encontrarán concretos con resistencias superiores. Hoy día se habla ya de concretos de muy alta resistencia, cuya clasificación se propone en cuatro clases diferentes, basándose en las resistencias promedio y en la facilidad con las que éstas se pueden alcanzar (Tabla 3).

Tabla 3. Concretos de muy alta resistencia

Clase	Resistencia a la compresión	
	(kg/cm^2)	MPa
I	750	75
II	1,000	100
III	1,250	125
IV	Más de 1,500	Más de 150

Pierre Claude Aitcin, "Concretos de muy alta resistencia"

Estas clasificaciones no se definieron simplemente desde un punto de vista académico, ni por representar múltiplos exactos de 25 MPa (255 kg/cm^2), sino porque corresponden a barreras tecnológicas actuales; sin embargo, debe reconocerse que no representan límites absolutos y seguramente se podrán encontrar excepciones.

Como se ha mencionado anteriormente, los concretos de alta resistencia se han podido elaborar desde los años sesenta, en las siguientes décadas se comercializaron principalmente en Norteamérica (en el área de Chicago-Montreal-Toronto y Seattle) y en algunos países de Europa. En los últimos años se han utilizado intensamente en el sudeste asiático y en la actualidad en medio oriente. En estos lugares, la integración de equipos de trabajo formados por arquitectos, ingenieros especializados en estructuras, constructores, empresas de concreto premezclado y laboratorios especializados, ha permitido que se utilice más este material de gran comportamiento, alcanzando cada vez mayores valores en su resistencia. Y por otra parte, se han construido edificios y puentes

de dimensiones y claros más grandes, para los que anteriormente se pensaba por definición en estructuras de acero.

Investigaciones sobre la elaboración de concretos de alta resistencia indican que es necesario el empleo de características especiales en los componentes del concreto y en los procedimientos de mezclado y de dosificación, a continuación se mencionan las más importantes:

- **Cemento.** Son recomendables los tipos I y II, con contenidos significativos de silicato tricálcico (mayores que los normales), módulo de finura alto y composición química uniforme.
- **Grava.** De alta resistencia mecánica, estructura geológica sana, bajo nivel de absorción, buena adherencia, de tamaño pequeño y densidad elevada.
- **Arena.** Bien graduada, con poco contenido de material fino plástico y módulo de finura controlado (cercano a 3.00).
- **Agua.** Requiere estar dentro de las normas establecidas.
- **Aditivos.** Es recomendable emplear alguno o una combinación de los aditivos químicos: superfluidificantes y retardantes; y, de los aditivos minerales, ceniza volante (fly ash), microsíllica (silica fume) o escoria de alto horno.
- **Mezcla.** Relaciones agua/cemento bajas (de 0.25 a 0.35), período de curado más largo y controlado, compactación del concreto por presión y confinamiento de la mezcla en dos direcciones.
- **Procedimientos de mezclado.** Adicionar selectivamente cada uno de los componentes del concreto, mezclar previamente el cemento y el agua con una revolvedora de alta velocidad y utilización de revibrado.

Adicionalmente, para la producción de este tipo de concretos son indispensables el empleo selectivo de materiales, un enfoque diferente en los procedimientos de diseño y elaboración de las mezclas, atención especial en la compactación y un control de calidad más riguroso.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

Primera etapa. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio de Construcción de la Universidad Autónoma Metropolitana relacionados con la elaboración de mezclas de concreto de alta resistencia, en los que se alcanzaron valores de 1,150 kg/cm² de resistencia a la compresión, determinando: dosificación, procedimientos de mezclado y métodos de prueba.

El objetivo de la primera etapa del proyecto de investigación fue obtener la mayor resistencia a la compresión en concretos elaborados con materiales y equipo convencional, tal como se dispone en un laboratorio universitario, tratando de reflejar condiciones semejantes a las de una obra de construcción. El propósito original fue economizar en el costo del concreto y de hacer accesible el procedimiento de mezclado en este tipo de circunstancias.

COMPILACIÓN DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN OCTUBRE 2009

Red Académica Internacional UADY, UAM, WPI.

En primer término se realizaron las pruebas a los materiales de cada uno de los componentes del concreto que cumplieran con las características deseadas y la verificación del valor de sus propiedades mediante las pruebas correspondientes en laboratorio o en las especificaciones del fabricante.

Cemento. La producción de cementos portland en la zona metropolitana de la ciudad de México es muy variada en tipos y marcas, pero todos cumplen con las normas de fabricación. Sin embargo, los cementos disponibles en el país tienen variaciones que obligan a los usuarios a ajustar sus proporcionamientos con el fin de lograr los valores de resistencia y las características requeridas.

Actualmente, uno de los factores en los que existe variabilidad en la producción de cemento se presenta en el proceso de molienda, lo que se refleja en el módulo de finura del cemento envasado, lo que afecta directamente la resistencia de los concretos. Otro factor que genera variación en la producción es la falta de uniformidad de la composición química de los insumos.

Debido a estos factores, se revisaron las especificaciones técnicas del fabricante a tres diferentes tipos de cemento tipo I y II, asimismo se realizaron pruebas mediante análisis químico elemental por absorción atómica en los laboratorios de Química Aplicada de la UAM. Con los resultados obtenidos se seleccionaron dos tipos de cemento para elaborar las mezclas de prueba.

Grava. Se determinaron los probables bancos de agregado grueso con los que se podría contar sin ninguna dificultad en su adquisición de manera comercial, teniendo disponibles en principio piedra triturada de andesita.

Se efectuaron los análisis correspondientes para determinar su granulometría, absorción, peso específico y pesos volumétricos suelto y compacto de cada una de ellas, siguiendo procedimientos normalizados.

Arena. La selección del agregado fino se realizó sobre la base de obtener las mejores condiciones de limpieza en cuanto a materiales contaminantes, teniendo presente que no es tan relevante la granulometría para lograr concretos de alto comportamiento. Es conveniente que el módulo de finura sea cercano a 3.00, estos valores ayudan a obtener una mejor trabajabilidad y resistencia a la compresión. Se analizó la arena proveniente de la mina de Santa Fe, de origen andesítico, conforme a las normas aplicables.

Agua. En la elaboración de concretos normales y de alta resistencia, los requisitos y características del agua sólo deben satisfacer las normas correspondientes. Para verificar las propiedades del agua empleada en las diferentes mezclas, se realizó un análisis químico-biológico en los laboratorios de Ingeniería Ambiental de la propia Universidad.

Aditivos. El proyecto consideró el empleo de aditivos minerales y químicos; en el primer caso, se estimó conveniente el uso de microsíllica, mientras que para los aditivos químicos se emplearon superfluidificantes y reductores de agua de alta eficiencia.

Microsíllica. Es un aditivo a partir de microsíllica compactada y seca que produce en el concreto cualidades especiales en dos aspectos: rellena los espacios entre las partículas del cemento e incrementa la cantidad de gel de silicatos de calcio, mejorando la resistencia y reduciendo la permeabilidad.

Aditivos químicos. El aditivo superfluidificante se empleó en combinación con un reductor de agua de alta eficiencia y retardador del fraguado para mejorar la plasticidad del concreto y controlar el tiempo de fraguado de la mezcla.

En segundo término, se hicieron morteros con los dos tipos de cemento y aditivo químico en diferentes proporciones, con los resultados obtenidos se seleccionó el tipo de cemento con el que se obtuvo mayor resistencia.

Mezcla de prueba. Se diseñó una mezcla base de concreto normal para una resistencia a la compresión de 400 kg/cm², con agregado grueso controlado (lavado y cribado) y sin controlar, esto es, con las condiciones de granulometría de suministro del banco de materiales. El resultado, en términos generales, arrojó resistencias superiores de 15 por ciento a favor de la grava controlada.

Procedimiento de mezclado. A partir de la dosificación de la mezcla base, se realizaron diferentes procedimientos de mezclado y combinaciones de aditivos minerales y químicos (microsíllica y superfluidificante). La técnica de mezclado que en esta etapa ofreció el mejor resultado fue la que se describe a continuación:

1. Agregado grueso (caliza)
2. Agua (15%)
3. Agregado fino (arena)
4. Cemento
5. Microsíllica
6. Agua (85%)
7. Aditivo químico
8. Cuatro litros de agua adicionales a la calculada para la mezcla

El empleo de la dosificación base, de la técnica de mezclado y el control de la granulometría y lavado del agregado grueso permitió incrementar la resistencia a la compresión en 25 por ciento sobre la mezcla base original. En las siguientes tablas se presenta la dosificación base y los resultados de las mezclas representativas de la primera etapa.

Tabla 4. Dosificación Base primera etapa (m³ de concreto)

COMPILACIÓN DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN OCTUBRE 2009

Red Académica Internacional UADY, UAM, WPI.

Cemento	705 kg
Agua	194 lt
Grava	771 kg
Arena	669 kg
Microsílica	106 kg
Aditivo químico	6.42 lt

Tabla 5. Mezcla representativas de la primera etapa

Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	
	28 días	56 días
1	529	551
2	546	581
3	510	662
4	550	666
5	597	709
6	548	679
7	632	732
8	663	783
9	711	801
10	733	806

Segunda etapa. En esta fase del proyecto se decidió emplear cemento Portland puzolana y cemento blanco, grava y arena de origen basáltico, microsíllica y aditivo químico reductor de alto rango.

Aditivo químico. En las primeras mezclas se consideraron cantidades fijas de los aditivos químicos y minerales. La segunda etapa del experimento consistió fundamentalmente en aproximaciones sucesivas, variando la cantidad del aditivo químico y efectuando cambios pequeños en el procedimiento de mezclado, lo que en principio originó resistencias adicionales de 10 por ciento. Empleando grava cribada y lavada, así como ajustes en la cantidad del aditivo químico, se obtuvieron pequeños incrementos en la resistencia, pero sobre todo disminuyó la variabilidad de los resultados.

Aditivo mineral. Una reducción controlada en el proporcionamiento de la microsíllica cercana a una tercera parte arrojó resistencias similares, con la consecuente economía en el costo de la mezcla. El empleo de dos aditivos químicos mezclados en proporciones iguales y manteniendo la cantidad original de microsíllica ocasionó 15 por ciento de resistencia adicional.

Relación agua/cemento. La relación agua/cemento permaneció sin modificaciones durante todas las etapas descritas con anterioridad. En las últimas pruebas se agregó un poco más de cemento, originando resistencias por encima de los 800 kg/cm².

El procedimiento de mezclado que ofreció los mejores resultados en esta segunda etapa fue el siguiente:

1. Agregado grueso (caliza o basalto)
2. Agua (15%)
3. Microsílica
4. Agua (25%)
5. Cemento (50%)
6. Agregado fino (arena)
7. Agua (20%)
8. Cemento (50%)
9. Agua (30%)
10. Aditivo químico diluido en el 10 % sobrante de agua

En la tabla 6 se presenta la dosificación base para esta etapa y en la tabla 7 se aprecian de manera sintetizada los progresos alcanzados en la resistencia conforme se fueron variando los procedimientos de mezclado y la composición de la mezcla. Desde luego, se presentan las mezclas más representativas del trabajo de investigación.

Tabla 6. Dosificación Base segunda etapa (m³ de concreto)

Cemento	454 kg
Agua	136 lt
Grava	912 kg
Arena	839 kg
Microsílica	36-3 kg
Aditivo químico	6.37 lt

Tabla 7. Mezcla representativas de la segunda etapa

Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	
	28 días	56 días
A*	660	709
B*	523	696
C*	538	579
D*	722	775
E*	849	910
F**	873	923
G**	777	831

* Mezclas con cemento puzolana

** Mezclas con cemento blanco

Tercera etapa. Las actividades de la última fase del proyecto de investigación estuvieron encaminadas a perfeccionar las técnicas de mezclado de los componentes del concreto. En especial en esta etapa se emplearon gravas de basalto y caliza, así como un aditivo superfludificante de alto rango.

COMPILACIÓN DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN OCTUBRE 2009

Red Académica Internacional UADY, UAM, WPI.

La técnica de mezclado con los mejores resultados fue la siguiente:

1. Agua (80%) y aditivo químico (50%)
2. Cemento (50%) y microsílca (50%)
3. Grava y arena
4. Aditivo químico (50%) diluido en 10% de agua
5. Cemento (50%) y microsílca (50%)
6. Agua restante (10%)
7. Mezclar 5 minutos

Tabla 8. Dosificación Base tercera etapa (m³ de concreto)

Cemento	450 kg
Agua	159 lt
Grava	835 kg
Arena	805 kg
Microsílca	29 kg
Aditivo químico	10.5 lt

Tabla 9. Mezcla representativas de la tercera etapa

Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²) - 56 días
1	1,130
2	1,154
3	1,035
4	1,108
5	1,086
6	1,121
7	1,066
8	1,140
9	1,160
10	1,064

Efecto de la granulometría del agregado grueso en las propiedades mecánicas del concreto. Al mismo tiempo que se revisaron las propiedades a la compresión de las mezclas de concreto de la segunda y tercera etapa del proyecto de investigación se verificó el efecto de la granulometría y el tipo de agregado grueso (caliza y basalto), así como el comportamiento de la mezcla ante reducciones de la cantidad de agua, con la finalidad de obtener mayores resistencias a la compresión.

Las características de la grava que tienen una mayor influencia en los concretos de alta resistencia son la configuración geométrica, su estado superficial, granulometría, propiedades mecánicas y estabilidad química.

Al utilizar una baja relación agua/cemento, un contenido alto de cemento implica la necesidad de que el agua demandada por los agregados sea lo más baja posible. La demanda de agua de la grava está en función, principalmente, de su forma y tamaño, así como de su composición mineralógica.

En este sentido, esta última fase del proyecto de investigación se fijó como objetivo el análisis del efecto de la granulometría del agregado grueso en las propiedades mecánicas de los concretos de alta resistencia, específicamente, resistencia a la compresión a 56 días, módulo de elasticidad y resistencia a la tensión. Las variables para considerar fueron los dos tipos de agregado, esto es, caliza y basalto, en tres diferentes tamaños, así como reducciones en la cantidad de agua de las mezclas.

Con los datos obtenidos, el basalto resultó ser mejor agregado grueso para alcanzar resistencias a la compresión de mayor magnitud, mientras que la caliza es más apropiada para mayores valores del módulo de elasticidad. Además, podemos decir que con caliza las mezclas resultaron relativamente más manejables. En todas las mezclas se efectuó un control de la granulometría para cada uno de los tamaños empleados. Se destaca, desde luego, que en ambos casos (basalto y caliza), los resultados alcanzados correspondieron con tamaños de gravas "grandes", esto es, tres cuartos de pulgada (20 mm) de tamaño nominal máximo.

EL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS ALTOS

El notable incremento en la resistencia del concreto alcanzado en los últimos años le ha permitido ir desplazando progresivamente al acero en la construcción de edificios altos. Hasta hace unos 30 años, y desde la irrupción de los rascacielos dentro del paisaje urbano, la estructura metálica ha sido la tipología fundamental por lo que se refiere al material

Constituyente de la misma. Sin embargo, el empleo del concreto como material base en las estructuras de los edificios altos se ha incrementado notablemente en los últimos años.

El principal factor que ha permitido esta evolución ha sido el incremento producido en las características mecánicas del mismo. Valores entre 60 y 80 MPa (600 y 800 kg/cm²) son actualmente fáciles de obtener, y con una dosificación aún más estudiada, junto a las adiciones de microsilica, se pueden alcanzar valores superiores a los 80 o 100 MPa (800 o 1,000 kg/cm²).

COMPILACIÓN DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN OCTUBRE 2009

Red Académica Internacional UADY, UAM, WPI.

Un dato objetivo que confirma lo anterior se obtiene del análisis de la relación de los edificios más altos del mundo. De los resultados se observa que se produce no sólo un descenso del porcentaje de edificios construidos con estructura metálica y un aumento de los de estructura de concreto, sino que el número de estos últimos llega a ser superior al de los primeros.

El concreto de alta resistencia puede considerarse un tipo particular de concreto de alto comportamiento. En éste no sólo puede ser la alta resistencia una de sus características, sino también la superior durabilidad. En el caso que nos compete, en su aplicación a las estructuras de edificios altos son, sin embargo, su mayor resistencia y las consecuencias que de ella se derivan el parámetro más significativo.

Ventajas del concreto de alta resistencia en edificios altos. Las alternativas que se plantean habitualmente en este tipo de edificios son la estructura metálica y la constituida con concreto de alta resistencia, entendiéndose por éste el que alcanza una resistencia característica superior a los 50 MPa (500 kg/cm²). De esta última se pueden subrayar las siguientes ventajas frente a la primera:

- Mayor rigidez y, por tanto, mejor comportamiento ante acciones horizontales.
- Mayor amortiguamiento intrínseco.
- Menor costo del material.
- En algunas ocasiones, condicionantes locales y de mercado dificultan el acceso a elementos metálicos en la cantidad necesaria; los materiales constitutivos del concreto prácticamente siempre están accesibles con la calidad mínima requerida.
- Más fácil conservación, sobre todo en estructuras expuestas a la acción de los agentes medioambientales.
- Mejor comportamiento ante la acción del fuego.

Frente a estos argumentos, la tipología metálica puede esgrimir, básicamente, una mayor rapidez de ejecución.

Otra alternativa es la estructura de concreto normal, entendiéndose por tal aquél cuya resistencia característica es igual o inferior a 50 MPa. Sin embargo, y aunque en el proyecto y ejecución de edificios altos se está empleando este tipo de concretos, los primeros presentan frente a ellos las siguientes ventajas:

- Las secciones de las columnas (elementos dimensionados, básicamente, frente a esfuerzos de compresión) son más reducidas.
- Su módulo de deformación es más elevado y, por tanto, tienen un menor acortamiento debido a esfuerzos axiales.
- La deformación de los elementos estructurales horizontales (vigas y entrepisos), para un mismo peralte, es menor.
- El peso propio global de la estructura es inferior, pudiendo suponer cierta reducción de la cimentación.

- El plazo de ejecución de la obra se puede ver reducido al permitir menor tiempo de encofrado, tanto de elementos horizontales como de muros y columnas.
- Aumento de la vida útil de la estructura del edificio. El incremento de la resistencia característica del concreto lleva asociada una mayor capacidad y, por tanto, una mayor resistencia ante el ataque de agentes agresivos externos al mismo.

Frente a estos argumentos, el "concreto normal" presenta un mejor conocimiento tecnológico (dosificación, comportamiento a mediano y largo plazo, etc.) y un precio unitario inferior, si bien el costo total de la estructura no se reduce en la misma proporción que la del concreto de alta resistencia, ya que los volúmenes de concreto empleados son superiores.

Edificios altos de concreto de alta resistencia. La distribución geográfica de este tipo de construcciones se encuentra centrada en tres zonas: Norteamérica (fundamentalmente Estados Unidos), Europa occidental y Sureste asiático. Aunque en la primera se produjeron las realizaciones iniciales y en la segunda se continuaron sus pasos con algunos años de retraso, es en el continente asiático donde se están desarrollando los últimos proyectos.

A continuación se hace una presentación de los edificios más emblemáticos construidos con estructura de concreto reforzado de alta resistencia, se aprecia el incremento en los valores de la resistencia a la compresión y de la participación de este material de alto comportamiento en las partes de la estructura, se agregan comentarios de algunos aspectos particulares de las mismas.

Water Tower Place. Este edificio de concreto de alta resistencia está localizado en el centro de Chicago, fue construido en 1975 hasta una altura de 262 m. El funcionamiento del edificio es de tipo mixto, cuenta con un centro comercial, departamentos y oficinas, en su interior tiene una calle peatonal que comunica las distintas zonas del edificio (Figura 2).

En su construcción se emplearon diferentes mezclas de concreto colocadas por seis grúas, el concreto de mayor resistencia a la compresión se colocó en las columnas, alcanzando un valor de 62 MPa (620 kg/cm²).



Figura 2. Water Tower Place

Este edificio demuestra la capacidad de la tecnología del concreto alcanzada en esa época para edificios altos. El sistema estructural empleado combina un núcleo de concreto reforzado en forma de tubo, columnas interiores de acero y un sistema de losa de acero con concreto.

COMPILACIÓN DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN OCTUBRE 2009

Red Académica Internacional UADY, UAM, WPI.

South Wacker Drive. Este edificio, situado en Chicago y terminado en 1990, tiene 65 plantas y una altura de 293 m. La disposición de su planta varía a lo largo de su altura, siendo un hexágono irregular en las inferiores y un octágono en las superiores (Figura 3).

Por razones técnicas y económicas se eligió una estructura completa de concreto armado, aunque se analizaron estructuras mixtas. La cimentación está constituida por una losa de 2.40 m de espesor, situada sobre 26 pilotes empotrados en el lecho de roca 1.80 metros.

El núcleo central está formado por muros que forman una "C" en planta, los espesores de los mismos varían con la altura. El entrepiso está constituido por vigas de concreto, sobre las que se sitúan vigas pretensadas prefabricadas.

El concreto empleado es variable en función de la altura a la que se encuentre el elemento estructural, disminuyendo su resistencia de proyecto a medida que se asciende. Los tipos empleados son los siguientes:

- Columnas: 84 MPa(640 kg/cm²) en las 13 plantas inferiores; 42 MPa (420 kg/cm²) en la planta más elevada, disminuyendo progresivamente entre ambos límites.
- Muros (núcleo central): 64 a 56 MPa . (640 a 560 kg/cm²)
- Entrepisos: 63 MPa (630 kg/cm²) en las plantas inferiores; 52 MPa (520 kg/cm²) en las plantas superiores.



Figura 3. South Wacker Drive

Two Union Square. Edificio ubicado en la ciudad de Seattle en el oeste de Estados Unidos, construido en 1990, cuenta con 56 pisos y 225 metros de altura (Figura 4). De los edificios de gran altura en el mundo, es posiblemente la construcción en donde se ha empleado el concreto de más alta resistencia. Se empleó concreto de 1,335 kg/cm² (133 MPa) de resistencia a la compresión, el proyectista de la estructura requería un módulo de elasticidad de 420,000 kg/cm² (42 GPa), para lograr este valor era necesario tener una resistencia a la compresión del concreto de la magnitud proyectada, mientras que sólo se requerían 980 kg/cm² (98 MPa) para soportar las cargas estructurales.

Consecuentemente, el diseño de la mezcla estuvo regido por el módulo de elasticidad.



Figura 4. Two Union Square

Petronas Towers. Este conjunto de dos torres se construyó en 1990, de 88 plantas cada una (82 sobre rasante y seis plantas sótano), se encuentra situado en Kuala Lumpur, Malasia. Con sus 450 m, constituye uno de los edificios más altos del mundo. Cada torre tiene planta circular encontrándose adosados a ellas edificios de 38 plantas (Figura 5).

Se plantearon cinco alternativas estructurales para el diseño del edificio, eligiéndose la de núcleo y perímetro de concreto. Las ventajas de esta opción son las siguientes:

- La transmisión de cargas verticales a través de columnas de concreto de alta resistencia se realiza con menor costo que con elementos metálicos.
- Las pantallas de concreto del núcleo sirven de muros compartidos frente al fuego y transmiten a la cimentación las cargas verticales;
- El sistema de concreto frente a las cargas laterales tiene mayor amortiguación que la estructura metálica.



Figura 5. Petronas Towers

La cimentación del edificio está formada por una losa de 4.50 m de espesor apoyada sobre 104 pilotes de profundidad variable.

El esquema estructural está formado, fundamentalmente, por un núcleo central, que sirve también como elemento conductor de las comunicaciones verticales en el edificio, y por una corona perimetral constituida por 16 columnas y las vigas respectivas que las unen en cada planta.

El concreto dispuesto en las columnas, varía en función de la altura, siendo de una resistencia a la compresión de 80 MPa (800 kg/cm²) entre la cimentación y la planta 23, de 60 MPa (600 kg/cm²) entre ésta y la planta 61, y de 40 MPa (400 kg/cm²) hasta la última planta.

Jin Mao Tower. Este edificio, con 88 plantas y 421 m de altura, se encuentra situado en la ciudad de Shanghai, se terminó su construcción en 1999. Su uso es de oficinas en las 50 plantas inferiores y de hotel en las 38 superiores, siendo la superficie total de 280.000 metros cuadrados (Figura 6).

La solución estructural mixta adoptada combina las ventajas del concreto (masa, resistencia, rigidez y amortiguamiento) con las del acero (resistencia, rapidez de construcción, capacidad para claros grandes y ligereza). El esquema estructural está

COMPILACIÓN DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN OCTUBRE 2009

Red Académica Internacional UADY, UAM, WPI.

formado, básicamente, por un núcleo central octogonal de concreto armado y por 16 columnas situadas en las fachadas con una distribución simétrica.

Las columnas perimetrales se encuentran divididas en ocho mixtas y ocho metálicas. La cimentación está constituida por una losa de concreto que transmite la carga al terreno a través de 429 pilotes.

El tipo de concreto puesto en obra, tanto en el núcleo central como en los soportes mixtos exteriores, varía con la altura del edificio de 60 MPa (600 kg/cm²) de cimentación hasta la planta 31, de 50 MPa (500 kg/cm²) entre ésta y la 64, y de 40 MPa (400 kg/cm²) hasta la última planta.

The Plaza 66 Tower. La torre 2 de este conjunto fue terminada en 2007 en Shangai, China, el proyecto hace un balance entre requerimientos de la ingeniería estructural, de la visión arquitectónica y de los aspectos de la construcción. La estructura esta formada por un núcleo, columnas y losas de concreto de alta resistencia de 60 MPa (600 kg/cm²), de 224 metros de altura y 46 pisos de oficinas (Figura 7).

El proceso de análisis y diseño, desde la fase conceptual al diseño detallado, considero los siguientes aspectos: cálculo y mitigación de los efectos de los asentamientos diferenciales de las pilas de cimentación mediante el uso de modelos de elemento finito; determinación de un sistema estructural adecuado revisando opciones múltiples a través de análisis aproximado de comparación de costos; diseño de un puente de acero en forma curvada 65 metros de largo entre las torres 1 y 2; y, diseño del remate en azotea en forma de linterna de un elemento de acero en doble voladizo por medio de un modelo estructural tridimensional.



Figura 6. Jin Mao Tower



Figura 7. The Plaza 66 Tower

La torre 2 del edificio The Plaza 66 es la nueva adición al proyecto de la torre 1 en Shanghai, China. La torre 1, con una altura de 282 metros y 62 pisos, fue terminada en 2001. Ambos edificios fueron diseñados completamente con estructura de concreto de alta resistencia.

Análisis de las soluciones estructurales. Tras la descripción efectuada del sistema estructural planteado en cada uno de los edificios comentados, desarrollados todos ellos con concreto de alta resistencia, en esta parte se exponen aspectos generales sobre los criterios estructurales para su aplicación en futuros proyectos y construcciones, como:

- La tipología estructural responde a una solución "tubo en tubo", o bien a un núcleo central y un pórtico perimetral en la fachada.
- En edificios que superan las 80 plantas y los 400 m de altura se plantea una conexión entre los sistemas estructurales central y perimetral mediante vigas radiales de gran peralte.
- El esquema estructural y el dimensionamiento se encuentran diseñados de tal forma que las acciones horizontales debidas al viento o al sismo sean absorbidas en su totalidad por el núcleo central, o repartidas con el sistema perimetral.
- El núcleo central, en todos los casos, se proyecta de concreto reforzado de alta resistencia.
- Las columnas que constituyen la corona resistente perimetral son de concreto, metálicas o mixtas, combinándose en algunas ocasiones más de una de estas tipologías en el mismo edificio.
- Las vigas perimetrales de concreto se proyectan generalmente con el mismo tipo de concreto que las columnas que unen.
- Los entrepisos están realizados con vigas interiores de concreto armado o metálicas, sobre las que se extiende una losa de concreto colada en sitios.
- El concreto de alta resistencia, entre 60 y 80 MPa (600 y 800 kg/cm²), se utiliza en elementos estructurales que resisten, básicamente, esfuerzos axiales de compresión (muros del núcleo de rigidización y columnas), estando proyectados los elementos horizontales (vigas y entrepisos) con concreto normal, 25 a 35 MPa (250 a 350 kg/cm²) de resistencia a la compresión.
- La resistencia del concreto utilizado en edificios de gran altura varía en función de la altura del edificio, reduciéndose la exigencia de sus características mecánicas a medida que se asciende.

COMPILACIÓN DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN OCTUBRE 2009

Red Académica Internacional UADY, UAM, WPI.

Finalmente, es conveniente señalar que, aunque en algunos edificios altos se ha empleado concreto de alta resistencia, no debe olvidarse que en otros muchos se han utilizado y se utilizan con éxito concretos normales con una resistencia de proyecto entre 40 y 50 MPa (400 y 500 kg/cm²). Éstos permiten una obtención más fácil de las características mecánicas con un precio unitario inferior, manteniendo en gran medida las ventajas de rigidez, amortiguación, confort y costo que los primeros tienen frente a las estructuras metálicas.

REFERENCIAS

1. Diseño y control de mezclas de concreto, Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, Portland Cement Association, 2004.
2. Concretos de alta resistencia, Flores A., González F., Rocha, L. y Vázquez A., Revista Construcción y Tecnología, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, diciembre de 2000.
3. Evolution of Concrete Skyscrapers: from Ingalls to Jin Mao, [Mir M. Ali, *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 1, No.1 \(2001\) pp. 2-14.](#)
4. Structural Design Challenges for Plaza 66 Tower 2, Dennis C.K. Poon, Ling-en Hsiao, Steve Zuo y Yi Zhu, Structures: 2008: Crossing Borders, American Society of Civil Engineers.