



17
2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MEXICO

CAMPUS ARAGON

FALLA DE ORIGEN
" CONCRETOS DE ULTRA ALTA
RESISTENCIA "

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
DAVID CARRILLO HERNANDEZ

DIRECTOR DE TESIS:
ING. GILBERTO GARCIA SANTAMARIA GONZALEZ



SAN JUAN DE ARAGON.

1995



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN

DAVID CARRILLO HERNÁNDEZ
PRESENTE.

En contestación a su solicitud de fecha 13 de septiembre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GONZÁLEZ pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado "CONCRETOS DE ULTRA ALTA RESISTENCIA", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, 26 de Septiembre de 1995
EL DIRECTOR

M en T CLAUDIO C. MEDRINHO CASTRO



c c p Jefe de la Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil.
c c p Asesor de Tesis.

CCMC/AIR/11a.

CONCRETOS DE ULTRA ALTA RESISTENCIA.

Agradecimientos

	Pag.
INTRODUCCIÓN.	1
I.- ASPECTOS BÁSICOS DEL CONCRETO.	
1.1 Definición	3
1.2 Antecedentes	4
1.3 Origen del concreto armado	5
1.4 Origen del cemento Portland	7
1.5 Cemento Portland	8
1.6 Fabricación del cemento Portland	9
1.7 Tipos de cemento Portland	11
1.8 Cementos hidráulicos mezclados	14
1.9 Agregados	20
1.10 Fraguado	21
1.11 Revenimiento	22
1.12 Sangrado	23
1.13 Vibrado	24
1.14 Curado	24
1.15 Trabajabilidad	25
II.- CONCRETOS DE ULTRA ALTA RESISTENCIA.	
2.1 Definición	26
2.2 Clasificación	27
2.3 Aditivos químicos	34
2.4 Adiciones minerales	36
2.5 Economía	38
2.6 Ductilidad	39
2.7 Mezclado	45
2.8 Revenimiento	46
2.9 Transportación	48
2.10 Compactación	49
2.11 Curado	51
2.12 Control de Calidad	52
2.13 Diseño Estructural	55
2.14 Control de la temperatura en C.U.A.R. macizo	69
2.15 Concreto de Ultra Alta Resistencia aligerado	74
2.16 Curado a altas temperaturas en C.U.A.R. aligerado	84
Referencias	89

III.- APLICACIONES.	
3.1 Edificios	93
3.2 Puentes	96
3.3 Plataformas Offshore	100
3.4 Aplicaciones especiales	103
3.5 Perspectivas a futuro	104
Referencias	105
IV.- EXPERIENCIAS EN DIFERENTES PAÍSES DEL MUNDO.	
4.1 Japón	106
4.2 China	112
4.3 E.E. U.U.	119
4.4 Noruega	120
4.5 México	120
Referencias	131
V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	132
BIBLIOGRAFÍA.	134

AGRADECIMIENTOS.

A MIS PADRES:

Porque con esfuerzo y trabajo, lograron darme un apoyo, dedicación y motivación para lograr uno de sus mas grandes anhelos; ser un profesionista.

A MI PADRE FERNANDO:

Porque gracias al esfuerzo que hiciste, infundiste en mi el seguir adelante y no dar marcha atrás para alcanzar lo que tanto deseabas y anhelabas en la vida.

A MI MADRE BEATRIZ:

Por haber dejado en mi tu inolvidable recuerdo y la enorme satisfacción por haber cumplido con uno de tus mayores deseos, Este es un agradecimiento a tu amor, confianza, insistencia y preocupación en el termino de mi carrera.

A MIS HERMANOS JANET Y FERNANDO:

Por el empeño y motivación que me inundaron para llegar a realizar una de mis metas en la vida.

A MIS TÍAS IRMA; ANGELA; ANA; ALICIA Y JOSEFINA:

Por su apoyo, cariño y comprensión que me brindaron en estos años de estudio.

A MIS TÍOS AMADO; GABRIEL; JESÚS Y MIGUEL:

Que me dieron un aliciente de seguir adelante durante mi preparación profesional.

A MA. DE LA LUZ:

Porque así como me brindaste tu amor cariño y comprensión en todo momento, así mismo me brindaste tu apoyo para alcanzar una de mis mas grandes metas en la vida; por esto y muchas cosas mas, te quiero.

A LA FAMILIA ZURITA Y CANCINO:

Por su apoyo y motivación para alcanzar una de mis mas grandes metas fijadas en la vida. Gracias.

A MIS PROFESORES:

Por infundirme sus conocimientos, y prepárame para lograr alcanzar una profesión.

AL ING: GILBERTO GARCÍA:

Por darme de su valioso tiempo para poder asesorar y dirigir este trabajo, a quien siempre estaré en deuda. Gracias.

AL ING: DANIEL Y JUAN CARLOS:

Por la confianza que siempre me tuvieron, pero mas que nada por su apoyo y motivación.

A LA UNIVERSIDAD:

Por haberme dado la oportunidad de pertenecer y ser un Universitario mas que alcanza y logra una de sus metas dentro de esta máxima casa de estudios.

AL CENTRO DE DOCUMENTACIÓN DEL IMCYC:

Por brindarme y darme la facilidad de obtener datos e información necesaria para la realización de este trabajo; en especial al Lic. Molotla.

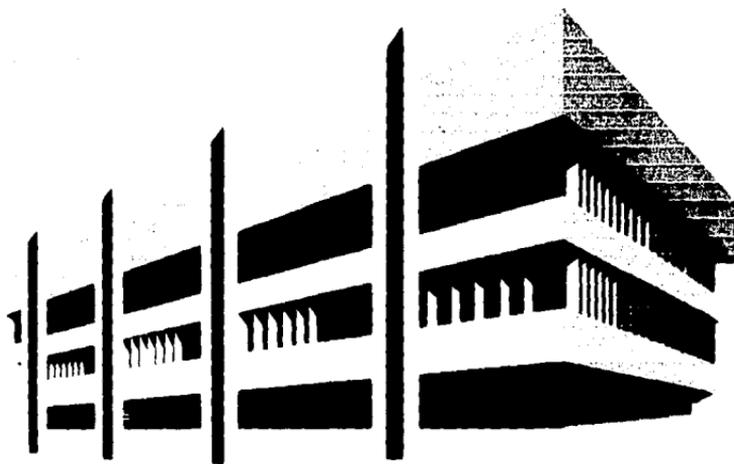
A MIS COMPAÑEROS:

Por su amistad y apoyo en todo momento durante nuestra formación profesional.

A MARGARITA; OLIMPIA Y GABRIELA:

Por su linda y finisima amistad que me brindaron. Gracias.

INTRODUCCION



INTRODUCCIÓN.

Desde su aparición en 1824, el cemento, como parte fundamental del concreto, ha producido un cambio muy importante en la vida del hombre. Las ciudades, antes formadas por edificaciones de baja altura, poco a poco se comenzaron a poblar de edificios de mediana altura construidos con este nuevo material llamado concreto. Pero a medida que aumento el conocimiento sobre este material y su comportamiento, los constructores se volvieron cada vez mas ambiciosos queriendo llegar más alto.

Para lograr estas metas fue necesario desarrollar un material, con características especiales al que se ha llamado Concreto de Ultra Alta Resistencia.

Realizando una breve reseña histórica, se puede notar que, en los primeros años del siglo XX el concreto poseía una resistencia a la compresión de aproximadamente 140 kg/cm². Pero al llegar a los años treinta este valor se había duplicado.

En la década de los años cincuenta, cuando se originó el termino Concreto de Ultra Alta Resistencia se hablaba de concretos cuya resistencia a la compresión estaba en el rango de 340 kg/cm². Tiempo después en la década de los años sesenta la resistencia del concreto se encontraba entre 410 y 520 kg/cm². En la década de los setenta ya se comercializaba con concretos de 620 kg/cm², y al finalizar la década de los ochenta ya se habían alcanzado los 970 kg/cm² de resistencia. Actualmente se han empleado concretos con resistencias a la compresión de 1100 a 1400 kg/cm² para la confección de elementos pretensados y prefabricados en diferentes países del mundo.

Este avance de la tecnología del concreto hace necesario analizar los factores que intervienen en la producción del Concreto de Ultra Alta Resistencia tales como: el empleo selectivo de materiales, procedimientos de diseño de la mezcla, diseño estructural, mezclado, curado, vibrado, transportación, control de calidad, etc.

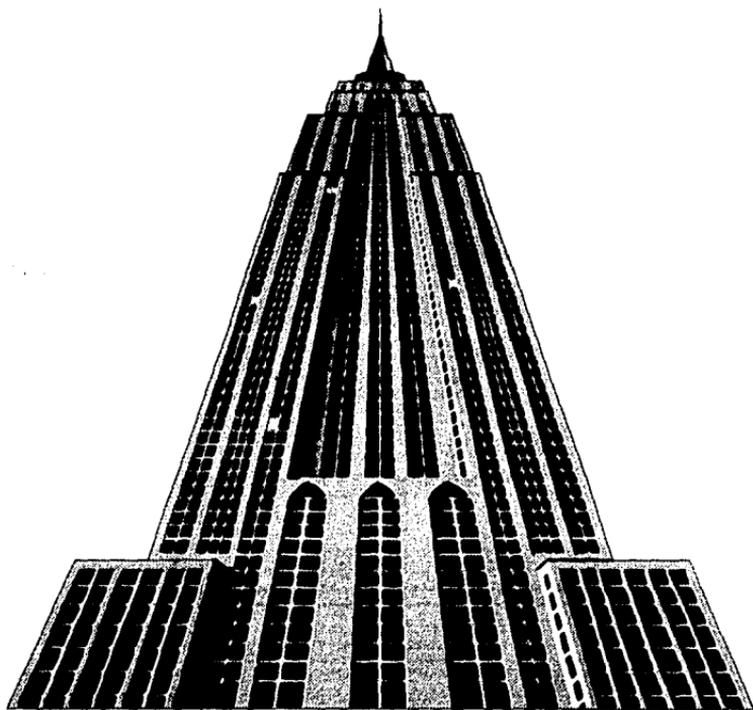
Así las buenas cualidades de los Concretos de Ultra Alta Resistencia, entre las que cabe destacar su resistencia a las acciones mecánicas, durabilidad frente al agua y agentes ambientales, carencia de mantenimiento, posibilidad de adaptarse a cualquier forma y dimensión de los elementos estructurales y posibilidad de incorporar en su masa escorias y puzolanas hacen del concreto un material con grandes ventajas técnicas, además de las económicas, que difícilmente pueden ser superadas por otros materiales.

Se sabe perfectamente que disminuyendo el contenido de agua de la mezcla se pueden alcanzar grandes resistencias, por eso con el desarrollo de nuevos aditivos superplastificantes se han podido obtener relaciones agua-cemento por debajo de 0.30, sin disminuir la trabajabilidad y revenimiento de la mezcla.

Así los nuevos desarrollos en la industria de la construcción no son tan dramáticos ni tan espectaculares como en otras industrias como son: la espacial o la electrónica. Sin embargo, durante los últimos años se han logrado grandes progresos, por lo que es necesario realizar mayores esfuerzos de difusión para que el público sea informado de este nuevo progreso obtenido.

CAPITULO 1

ASPECTOS BASICOS DEL CONCRETO



I.- ASPECTOS BÁSICOS DEL CONCRETO.

1.1 Definición.

El concreto es una mezcla de cemento, agregados pétreos, aire y agua. Es un material temporalmente plástico que puede colarse o moldearse, para más tarde, convertirse en una masa sólida por medio de una reacción química.

Los agregados pétreos generalmente se dividen en dos grupos: Agregados finos y agregados gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 5 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente en una mezcla es el de 19 mm o el de 25 mm.

La selección de los agregados es importante ya que estos constituyen del 60 al 75% del volumen total del concreto. Los agregados deben consistir en partículas con una resistencia adecuada, así como resistencia a condiciones de exposición a la intemperie y sin contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto.

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta (mezcla de cemento, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente). En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado.

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la calidad del concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en relación con la cantidad de cemento. A continuación se presentan algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- Se presenta menor cambio volumétrico causado por humedecimiento y secado.
- Se reducen las tendencias de agrietamientos por contracción.

Entre menos agua se utilice, se tendrá una mejor calidad del concreto a condición que se pueda consolidar adecuadamente.

Las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, se pueden modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida, durante su dosificación.

Después de un proporcionamiento adecuado, así como dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado y curado, el concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, resistente al desgaste y prácticamente impermeable que requiere de un poco o nulo mantenimiento.

1.2 Antecedentes.

Los primeros rastros del empleo y aplicación del concreto se encuentran en el Asia Menor a unos 6000 años antes de Cristo, en una forma primitiva. Se han encontrado, correspondientes a la Cultura Babilónica, centenares de tablas de barro cocidas al sol, empleadas para construcciones de toda índole, con una adecuada adición de finos. Sin embargo, una aplicación más próxima a lo que hoy en día lleva el nombre de concreto, se tiene en torno a los cuatro mil años antes de nuestra era en el antiguo EGIPTO, en donde se empleo en forma general para la unión de bloques de tierra tallada. Las colosales construcciones faraónicas, sobre todo durante las primeras cuatro dinastías, han llegado hasta nuestra era sin daño alguno. Centenares de miles de cubos de piedra unidos por mortero de yeso, conservan sus líneas y niveles originales, aunque recubrimientos exteriores han desaparecido del todo debido a la acción de tormentas de arena.

Unos dos siglos antes de nuestra era se aplicó en China un procedimiento a base de barro con alto contenido de finos sedimentos eólicos, para la construcción de la imponente muralla china. Se consolidaban grandes masas de este sedimento mezcladas con trozos de roca, siguiendo una alineación determinada, agregando solamente la cantidad de agua necesaria para que la mezcla fuese manejable. La muralla China, indudablemente una de las mayores edificaciones humanas, se extendía en una longitud superior a los 2450 Km., por terrenos bastante accidentados, con una altura constante de 16 m y un ancho de 8 m, sin contar una multitud de torres, bastiones, puertas, etc., puede calcularse que el volumen empleado de este sedimento apisonado utilizado en dicha obra es de 260,000,000 de m³.

Cien años antes de Cristo, en la Roma Imperial, fue iniciado el empleo de cal apagada con tierra puzolánica en multitud de obras. Su utilización fue en la construcción de muros y bóvedas. En los muros empleaban el concreto con un material de relleno, formando una especie de cimbra con dos parámetros de piedra.

El arco y la bóveda son dos elementos de construcción que caracterizan a la arquitectura Romana, aunque los inventores no fueron los Romanos. La técnica del colado era utilizada por los Romanos para la construcción de sus bóvedas, aprovechando la economía obtenida en el ahorro del tallado de piedras que les permitió techar grandes superficies.

El concreto de los Romanos estaba compuesto de piedras ligeras, pedaceras de tabique o tovas y ocasionalmente, se han encontrado recipientes cuyo vacío reducía el peso de la cubierta.

Construían las bóvedas sobre una cimbra de madera en la que, primero, formaban arcos de tabique como refuerzo a intervalos regulares y posteriormente, colaban en esos intervalos la masa pastosa de concreto puzolánico. Esas nervaduras no fueron destinadas en su origen, a dar a la bóveda una especie de estructura; más bien se utilizaban para mantener el concreto cuando aún estaba fresco.

Años más tarde con la reconstrucción en el año de 1756 del faro de Eddystone, en la costa sureste de Inglaterra, el ingeniero John Smeaton, fue la primera persona que empleó el concreto después del periodo Romano.

Smeaton empleó en la construcción, un sistema tal que logró un conjunto de gran resistencia. Junto las piedras una con otra y, en cuanto a los cimientos y al material de unión, empleó una mezcla de cal viva, arcilla, arena y escoria de hierro en polvo.

1.3 Origen del concreto armado

El invento del concreto armado se le ha atribuido generalmente al francés J. Monier, con la finalidad de obtener paredes delgadas y sólidas como así mismo impermeables e incombustibles; este tipo de concreto se fabricó con la utilización de mallas de acero recubiertas con mortero de cemento.

Este invento formado de una red metálica empastada con cemento ofrecía:

- Economía de gastos iniciales.
- Economía en mantenimiento.
- Celeridad de ejecución.
- Reparación instantánea en caso de desperfecto.
- Impermeabilidad absoluta.
- Incombustibilidad.
- Solidez.

y el cual era aplicable en aquellos tiempos a:

- Barcos.
- Molinos.
- Escuelas.
- Barcazas.
- Boyas.
- Depósitos de agua.
- Puertas de sótano.
- Cajas para frutas.

En pocas palabras era aplicable a todas las construcciones que pudieran deteriorarse tanto dentro y fuera del agua.

La expansión del sistema Monier comenzó en el año de 1878, cuando una Sociedad Alemana de nombre Sociedad G. A. Wayss et. Cies. de Berlín tuvo experiencias que mostraban las ventajas de la nueva combinación de materiales y al mismo tiempo fijaron los principios a seguir en su aplicación.

No existe una fecha fija para el nacimiento del concreto armado tanto en Estados Unidos como en Inglaterra. El sistema concreto-acero empezó a usarse sobre todo por sus cualidades incombustibles.

El sistema Monier, que fue importado de Francia a Alemania en el año de 1878, se seguía desarrollando en su país de origen, pero no con tanta rapidez como en Alemania. Sin embargo, a los constructores Franceses les estaba reservado tomar la ventaja sobre los éxitos obtenidos por sus colegas extranjeros. En el año de 1892 surgieron dos nuevos sistemas en donde Francois Hennebique y Edmond Coignet hicieron patentar casi simultáneamente sus tipos de vigas de concreto armado.

En 1888, Francois Hennebique, edifico en Lombardzeyde, Bélgica, el primer edificio de concreto armado. Estableció del año de 1880 al de 1894 las reglas y cálculos de un sistema al que dio su nombre. Uno de sus amigos, M. Madoux, le pidió que construyera un edificio incombustible y le propuso una envoltura refractaria. Hennebique sabía que bajo compresión, el concreto es preferible al fierro, y que presentaba al esfuerzo cortante una resistencia considerable, siendo así que esta trabe heterogénea requería del concreto a compresión y del acero a tensión. Lenta y metódicamente, verificando por medio de la experiencia cada una de sus hipótesis, Francois Hennebique elaboró el cálculo de ese híbrido que bautizo con el nombre de Concreto Armado (Betón Armé). Tuvo la idea de elevar las barras inferiores sobre los apoyos, resistiendo así la pieza al esfuerzo cortante y al momento negativo de las vigas continuas. La viga tal y como la conocemos hoy en día data del año de 1889. Así mismo hacia el año de 1894 Francois Hennebique estudio y realizo la ménsula, en 1895 los tanques y pilotes, en 1896 la columna y en 1897 se construye el primer puente de concreto armado en arco.

Francois Hennebique era, además, un experto contratista construyendo en diversas partes de Europa, de entre las cuales: Las fábricas en Nantes, silos en Génova y Estrasburgo, sanatorios en Suiza, etc., además construyó una villa para su recreo en Bourg-la-Reine (Francia) que sirvió como una propaganda para el empleo del concreto armado. La finca demostraba al observador todas las posibilidades del nuevo material.

Los primeros constructores del concreto armado no fueron teóricos; muchos de ellos no tenían ni idea de la estabilidad de las construcciones. El sistema fue estudiado por vías de la experiencia que permitió establecer algunos principios sobre los cuales se basaron las hipótesis. Este papel corresponde a los alemanes en el desarrollo del sistema Monier. Koenen y Wayss dieron a conocer en el año de 1886 y 1887 fórmulas que se aplicaron considerablemente en el empleo y desarrollo del sistema Monier. Eran Fórmulas empíricas que no trataban de explicar los diferentes papeles del acero y del concreto en la resistencia del concreto armado. Los estudios llevados a cabo desde el principio sobre este tema reconocieron que el funcionamiento de las piezas de concreto armado, bajo la acción de las cargas, debería depender de las propiedades elásticas del acero y del concreto.

Desde 1876 M. Mazas aplicó en Francia el cálculo a una construcción de concreto. El problema fue estudiado después por M. Planat, Coignet y De Tedesco, que definieron las propiedades esenciales y el comportamiento estático del nuevo material así como los principios para el cálculo de las estructuras.

Hacia el año de 1890 se construyeron los primeros puentes bajo el procedimiento Monier.

1.4 Origen del cemento Portland

En Inglaterra se empezó a experimentar a principios del siglo pasado, con cementos elaborados a base de barro y piedra caliza como materiales esenciales.

En 1824, Joseph Aspdin produjo en Leeds, Inglaterra el Primer aglomerante hidráulico, el cemento Portland, denominado así por la semejanza de su color con el de las piedras de la cantera de la Isla de Portland. Aspdin obtuvo este aglomerante hidráulico calcinando la mezcla de barro y piedra caliza a una temperatura muy alta.

En sus orígenes se consideró al cemento Portland únicamente como un material que llegaría a reemplazar al estuco. Este cemento se usó en pequeñas cantidades en el túnel del río Thames en Inglaterra en el año de 1828.

El cemento Portland se utilizó en la mayoría de los almacenes de siete u ocho Niveles, construidos por el Ingeniero de Manchester William Fairbairn en el año de

1844. Este sistema de construcción que empleaba perfiles de acero sumergidos en el concreto, se aproximaba muchísimo a la verdadera construcción de concreto armado. Sin embargo tuvieron que pasar 50 años para que el análisis científico revelara la naturaleza exacta de las relaciones entre los dos elementos que componen el concreto armado.

El primer cemento Portland que se usó en Estados Unidos y Canadá fue importado de Inglaterra en el año de 1870.

La primera fábrica de cemento Portland en los Estados Unidos fue construida en el año de 1871 por David Saylor; la cual era una pequeña planta de cemento natural construida en Coplay, al norte de Allentown en el año de 1866. Antes del año de 1871 todo el cemento elaborado en los Estados Unidos era natural, es decir, hecho de ingredientes tomados tal y como existen en la tierra. Un cemento de tipo natural fue usado en la construcción de un acueducto en San Diego, California, en los primeros tiempos de la conquista española.

Saylor el pionero de la industria estadounidense del cemento, usó para la fabricación del cemento Portland, chimeneas verticales abovedadas, similares al tipo que se usaban entonces en Inglaterra. Molían la materia prima mojada en grandes tinas revolventoras y la materia así obtenida se moldeaba en ladrillos y se ponía a secar; posteriormente los ladrillos se colocaban en el horno en lechos alternados para su cocimiento. Después de extinguido el fuego, se quitaba el clinker del fondo del horno y se molía para así hacer un polvo fino. Las primeras plantas de cemento usaron fuerza hidráulica. El horno rotatorio horizontal fue introducido en los Estados Unidos por José de Navarro, en el año de 1889. Sus dos primeros hornos rotatorios fueron cilindros horizontales de 7.50 mts. de largo por 0.90 mts. de diámetro; eran de acero laminado revestidos de ladrillo cocido. Tiempo después Tomás A. Edison introdujo el horno largo de 45 mts., el más grande en el año de 1909. Actualmente se usan hornos de más de 150 mts. de largo.

1.5 Cementos Portland.

Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidráulicos. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. Durante esta reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una pasta de aspecto similar al de una roca.

La hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua. Cada partícula de cemento forma un aumento sobre su superficie, mismo que gradualmente se extiende hasta enlazarse con el aumento de otras partículas de cemento o hasta que se adhiere a las sustancias adyacentes. Esta reconstitución

tiene como resultado la progresiva rigidización, endurecimiento y desarrollo de resistencia. La rigidización del concreto se puede reconocer por una pérdida de trabajabilidad que normalmente ocurre dentro de las tres primeras horas después del mezclado, pero depende más en la composición y finura del cemento, del proporcionamiento y de las condiciones de temperatura.

La hidratación prosigue mientras que se disponga de espacio para los productos de la hidratación y se tengan condiciones favorables de humedad y temperatura (curado). A medida que la hidratación continúa, el concreto se vuelve más duro y más resistente. La mayor parte de la hidratación y del desarrollo de la resistencia tiene lugar durante el primer mes del ciclo de vida del concreto, pero continúa, aunque más lentamente, durante un largo período; que se ha llegado a alcanzar hasta de 50 años.

La invención del cemento Portland se atribuye generalmente a Joseph Aspdin, un albañil inglés, en 1824 obtuvo una patente por su producto, al cual denominó cemento Portland debido a que producía un concreto que en color semejaba a una caliza natural que se explotaba en el Isote de Portland, península en el Canal de la Mancha. El nombre ha permanecido y se emplea en todo el mundo.

1.6 Fabricación del cemento Portland.

El cemento Portland se produce al pulverizar el clinker, que consiste principalmente en silicatos hidráulicos de calcio junto con algunos aluminatos de calcio aluminoferritos de calcio y normalmente contiene una o más formas de sulfato de calcio (yeso), como adición en la pulverización.

Los materiales usados para fabricar cemento Portland deben contener proporciones adecuadas de óxido de calcio, sílice, alúmina y componentes de óxido de hierro.

Las materias primas seleccionadas se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada. Las materias primas son generalmente una mezcla de material calcáreo (óxido de calcio), como la caliza, marga, creta, o coquilla, y un material arcilloso (sílice y alúmina) como la pizarra, esquisto o escoria de alto horno. Se utiliza un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, la molienda y el mezclado se realizan con materiales secos. En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y de mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada.

Luego del mezclado, la materia prima molida se alimenta por el extremo superior de un horno. La materia prima pasa a una velocidad que se controla por medio de la pendiente y velocidad rotacional del horno. En el extremo inferior del

homo el combustible para calcinar (carbón pulverizado, combustóleo o gas), es inyectado; donde las temperaturas de 1420°C a 1650°C transforman químicamente a la materia prima en clinker de cemento, que tiene la forma de pelotillas negro-grisáceas de 12 mm de diámetro.

El clinker se pone a enfriar y posteriormente se pulveriza. En el transcurso de esta última operación se agrega una pequeña cantidad de yeso que sirve para regular el tiempo de fraguado del cemento. El clinker se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar através de la malla No. 200 (75 micras), misma que tiene 6,200 aberturas por centímetro cuadrado. Este polvo gris extremadamente fino es el cemento Portland.

En la siguiente tabla se muestran las materias primas seleccionadas y empleadas para la fabricación del cemento Portland.

Fuentes de materias primas empleadas para la fabricación del cemento Portland

Cal, CaO	Hierro Fe ₂ O ₃	Sílice SiO ₂	Alúmina Al ₂ O ₃	Yeso, CaSO ₄ ·2H ₂ O	Magnesia, MgO
Desechos Industriales	Polvo del conducto de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Desperdicios de mineral de aluminio*	Anhidrita	Roca calcárea
Aragonita*	Arcilla*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio	Caliza
Calcita*	Mineral de hierro*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso	Escoria
Polvo del homo de cemento	Costras de laminado*	Ceniza volante	Arcilla*		
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Escoria de cobre		
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Ceniza volante*		
Arcilla	Esquisto	Loess	Greda		
Greda		Marga*	Granodiorita		
Caliza*		Lavaduras de mineral	Caliza		
Mármol		Cuarcita	Loess		
Marga		Ceniza de cáscara de arroz	Lavaduras de mineral		
Coquilla		Arena*	Esquisto*		
Esquisto		Arenisca	Escoria		
Escoria		Esquisto*	Estaurolita		
		Escoria			
		Basalto			

* Fuentes más comunes.

1.7 Tipos de cemento Portland.

En la actualidad se fabrican diversos tipos de cemento Portland para satisfacer diferentes necesidades químicas y físicas para propósitos específicos. La Norma C. 150 "Especificación estándar para cemento Portland" de la American Society for Testing and Materials (ASTM), estipula ocho tipos de cemento Portland.

Tipo I	Normal.
Tipo I A	Normal, inclusiv de aire.
Tipo II	De resistencia moderada a los sulfatos.
Tipo II A	De resistencia moderada a los sulfatos, inclusiv de aire.
Tipo III	De alta resistencia a edad temprana.
Tipo III A	De alta resistencia a edad temprana, inclusiv de aire.
Tipo IV	De bajo calor de hidratación.
Tipo V	De resistencia elevada a los sulfatos.

Cemento Portland tipo I.

El cemento Portland de tipo I es un cemento de uso general, adecuado para ser empleado cuando las propiedades especiales de los demás tipos de cemento no sean necesarias. Se utiliza en concretos que no estén sujetos al ataque de factores agresivos tales como el ataque de sulfatos existentes en el suelo o en el agua, o en concretos que tengan un aumento cuestionable de temperatura debido al calor generado durante la hidratación. Entre sus usos se incluyen pavimentos, pisos, edificios de concreto reforzado, puentes, estructuras para vías férreas, tanques y depósitos, tuberías, mamposterías y otros productos de concreto prefabricado.

Cemento Portland tipo II.

El cemento Portland tipo II se emplea donde sea necesario tomar precauciones contra el ataque moderado de sulfatos, como ocurre en las estructuras de drenaje, donde las concentraciones de sulfato existentes en las aguas freáticas son mayores de lo

normal, pero sin llegar a ser demasiado severas. El cemento tipo II generará normalmente menos calor a menor velocidad que el cemento tipo I. Si se especifican límites máximos para el calor de hidratación, este cemento puede ser empleado en estructuras de un volumen considerable, como en pilas de gran masa, estribos gruesos y muros de contención. Su uso reducirá el aumento de temperatura, hecho especialmente importante al realizar colados de concreto en climas cálidos.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes tipos de cemento necesarios para concretos expuestos al ataque de sulfatos.

Tipos de cemento necesario para concreto expuesto al ataque de sulfatos.

Exposición a los sulfatos	Sulfatos (SO ₄) en el suelo solubles al agua, porcentaje por peso	Sulfatos (SO ₄) en el agua, ppm	Tipo de cemento
Despreciable	0,00 - 0,10	0 - 150	-
Moderado*	0,10 - 0,20	150 - 1500	II, IP(M.S.), IS(M.S.)
Severa	0,20 - 2,00	1500 - 10.000	V
Muy severa	superiores a 2,00	amba de 10.000	V más puzolana**

* Agua de mar

** Puzolana que haya demostrado por pruebas o por registros de empleo mejoras en la resistencia a los sulfatos cuando se utilice en un concreto que contenga cemento tipo V

Cemento Portland tipo III.

El cemento Portland tipo III proporciona resistencias elevadas a edades tempranas, normalmente a una semana o menos. Químicamente y físicamente es similar al cemento tipo I, excepto que sus partículas han sido molidas más finamente. Se emplea cuando las cimbras deben ser retiradas lo más pronto posible o cuando se tenga que poner rápidamente en servicio la estructura. En climas fríos su uso permite reducir el curado controlado. A pesar que se pueden usar mezclas más ricas de

cemento tipo I para lograr incrementos de resistencia a edades tempranas, el cemento tipo III puede lograr esto mismo satisfactoriamente y con mayor economía.

Cemento Portland tipo IV.

El cemento Portland tipo IV se emplea cuando se tenga que mantener en un valor mínimo la cantidad y velocidad de generación de calor provocado por la hidratación. Desarrolla resistencia a una velocidad muy inferior a la de otros tipos de cemento. El cemento tipo IV se destina para estructuras de concreto masivo, como grandes presas de gravedad, donde el aumento de temperatura resultante del calor generado en el transcurso del endurecimiento se tenga que conservar en el valor mínimo posible.

Cemento Portland tipo V.

El cemento Portland tipo V se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de sulfatos, especialmente donde los suelos o las aguas fráticas contengan fuertes contenidos de sulfatos. Su resistencia es adquirida más lentamente que el cemento tipo I. La elevada resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se atribuye al bajo contenido de aluminato tricálcico (C_3A). La resistencia a los sulfatos se incrementa si se incluye aire o se aumentan los contenidos de cemento (relaciones agua-cemento bajas). El cemento tipo V, al igual que los demás cementos Portland, no es resistente al ataque de ácidos ni de otras sustancias fuertemente corrosivas.

Cemento Portland inclusor de aire.

Corresponden en su composición a los tipos ASTM I (American Society for Testing and Materials), II y III respectivamente, con la salvedad que

pequeñas cantidades de incluso de aire han sido mezcladas junto con el clinker durante su fabricación. Estos cementos producen concretos con resistencias mejoradas contra la acción de la congelación-deshielo y contra la descamación provocada por la aplicación de productos químicos para remover hielo o nieve.

Cemento Portland blanco.

El cemento blanco es un verdadero cemento Portland que difiere del cemento gris exclusivamente en cuanto a su color. Se fabrica conforme a las especificaciones de la Norma ASTM C. 150, normalmente con respecto al tipo I o al tipo III; sin embargo, el proceso de manufactura es controlado de tal manera que el producto terminado sea blanco. El cemento Portland blanco es fabricado con materias primas que contienen cantidades insignificantes de óxidos de hierro y de manganeso que son las sustancias que dan el color gris al cemento. El cemento blanco se utiliza principalmente para fines arquitectónicos, como muros precolados, paneles para fachadas, recubrimientos de terrazo, aplanados, pintura de cemento, pegamento para azulejos y como concreto decorativo. Se recomienda el uso de este cemento siempre que se desee un concreto o un mortero blanco o coloreado.

1.8 Cementos hidráulicos mezclados.

El reciente interés en la conservación de energía ha impulsado el uso de materiales secundarios en el concreto de cemento Portland. Los cementos hidráulicos mezclados se producen al mezclar de manera íntima y uniforme dos tipos de materiales finos. Los principales materiales de mezclado son el cemento Portland, escorias de alto horno molidas, cenizas volantes y otras puzolanas, cal hidratada, y combinaciones previamente mezcladas de cemento con estos materiales. El polvo de horno de cemento, al igual que el humo silíceo y otros materiales se encuentran

actualmente sujetos a investigación para poder ser utilizados en los cementos mezclados. Los cementos hidráulicos mezclados deben concordar con los requisitos de la Norma ASTM C. 595, que reconoce la existencia de cinco clases de cementos mezclados:

- Cemento Portland de escoria de alto horno tipo IS.
- Cemento Portland puzolana tipo IP y tipo P.
- Cemento de escoria tipo S.
- Cemento Portland modificado con puzolana tipo I (P.M.).
- Cemento Portland modificado con escoria tipo I (S.M.).

Cemento mezclado tipo IS.

El cemento Portland de escoria de alto horno, tipo IS, se puede emplear en las construcciones de concreto en general. Al producir este tipo de cemento, la escoria de alto horno granulada de calidad seleccionada se muele junto con el clínker de cemento Portland, o se muele separadamente y luego se muele con el cemento Portland, o se produce por medio de una combinación de molienda y mezclado. El contenido de escoria de alto horno varía entre el 25 y el 70% en peso. se puede especificar inclusión de aire, resistencia moderada a los sulfatos o moderado calor de hidratación agregando los sufijos A, M.S., o M. H. Por ejemplo, un cemento Portland inductor de aire de escoria de alto horno que tenga una resistencia moderada a los sulfatos quedaría designado como Tipo IS-A (M.S.).

Cemento mezclado tipo IP y tipo P.

Los tipos IP y P sirven para designar los cementos Portland puzolana. El tipo IP puede ser empleado en construcciones en general y el tipo P se utiliza en construcciones donde no sean necesarias resistencias altas a edades tempranas. El tipo P se utiliza normalmente en estructuras de concreto masivas, como estribos, presas y pilas de cimentación. Estos cementos se fabrican

moliendo el clinker de cemento Portland con puzolana apropiada; Mezclando cemento Portland o cemento Portland de escoria de alto horno junto con una puzolana; o por una combinación de los dos procesos. El contenido de puzolana de los dos cementos se encuentra entre 15 y 40% en peso. Los ensayos de laboratorio indican que el comportamiento de un concreto elaborado con cemento tipo IP, como grupo, es similar al de un concreto de cemento tipo I, aunque durante los 28 días son ligeramente inferiores para el cemento tipo IP que para el cemento tipo I. Los cementos tipo IP y P se pueden denominar como inclusores de aire, resistencia moderada a los sulfatos o de moderado calor de hidratación si se les añade los sufijos A, M.S. o M.H. Una muestra de cemento tipo IP inductor de aire con resistencia moderada a los sulfatos se denominaría tipo IP-A(S.M.). El cemento tipo P también puede ser designado como de bajo calor de hidratación (LH).

Cemento de escoria tipo S.

El cemento tipo S, de escoria se usa comúnmente en donde se requieran resistencias inferiores. Este cemento se fabrica por medio de alguno de los siguientes procesos:

- 1.- Mezclando escoria molida de alto horno y el cemento Portland.
- 2.- Mezclando escoria molida de alto horno y cal hidratada.
- 3.- La combinación de mezclar escoria molida de alto horno, cemento Portland y cal hidratada.

El contenido mínimo de escorias es del 70% del peso del cemento de escoria. Se puede designar la inclusión de aire en un cemento de escoria a la

cual se le agrega el sufijo A, por ejemplo, Cemento tipo S-A.

Cemento Portland modificado con puzolana tipo I (P.M.).

El cemento Portland tipo I (P.M.) modificado con puzolana, se emplea en todo tipo de construcciones de concreto. El cemento se fabrica combinando el cemento Portland o cemento Portland de escoria de alto horno con una puzolana fina. Esto se puede lograr de la siguiente manera:

- 1.- Mezclando el cemento Portland con la puzolana.
- 2.- Mezclando el cemento Portland de escoria de alto horno con la puzolana.
- 3.- Moliendo conjuntamente el clinker de cemento Portland con la puzolana.
- 4.- Por medio de una combinación de molienda conjunta y de mezclado.

El contenido de la puzolana es menor que el 15%, en peso, del cemento terminado. La inclusión de aire, la resistencia moderada a los sulfatos, o el moderado calor de hidratación se puede designar en cualquier combinación agregando los sufijos A, M.S., o M.H. Un ejemplo de cemento tipo I(PM) inductor de aire y de moderado calor de hidratación sería un cemento tipo I(PM)-A(M.H.).

Cemento Portland modificado con escoria tipo Y (S.M.).

El cemento Portland modificado con escoria, tipo I(S.M.) se puede emplear en todo tipo de construcciones de concreto, y se fabrica por alguno de los siguientes procesos:

- 1.- Combinando durante la molienda el clinker de cemento Portland y alguna escoria granular de alto

horno.

- 2.- Mezclando cemento Portland con alguna escoria granular de alto horno finamente molida.
- 3.- Por la combinación de molienda y mezclado.

El contenido de escoria es inferior al 25% del peso del cemento terminado. El cemento tipo I (S.M.) también se puede designar con inclusión de aire, resistencia moderada a los sulfatos, o moderado calor de hidratación agregándole los sufijos A, M.S., o M.H. Un ejemplo sería el tipo I (S.M.)-A (M.H.), para un cemento Portland modificado con escoria incoloro de aire de moderado calor de hidratación.

Los cementos mezclados se pueden usar en las construcciones de concreto cuando no sean necesarias las propiedades específicas de otros tipos de cemento. Varios de los cementos mezclados tienen una menor adquisición de resistencia a edad temprana si se les compara contra el cemento del tipo I. En consecuencia, si se diluye un cemento mezclado agregándole todavía más puzolanas o escorias, el concreto que se produzca se deberá probar muy cuidadosamente en cuanto a cambios de resistencia, durabilidad, contracción, permeabilidad y otras propiedades. Las bajas temperaturas en el colado y curado pueden disminuir considerablemente el incremento de la resistencia y aumentar el tiempo de fraguado en el concreto de cementos mezclados con fuertes contenidos de escoria o puzolana.

Cementos expansivos.

El cemento expansivo es un cemento hidráulico que se expande ligeramente durante el período de endurecimiento a edad temprana después

del fraguado. Debe satisfacer los requisitos de la especificación ASTM C. 845 en la cual se le designa como cemento Tipo E-1. Comúnmente se reconocen tres variedades de cemento expansivo, mismas que se designan como K, M y S, las cuales se asignan como sufijos al tipo. El cemento tipo E-1 (K) contiene cemento Portland, trialuminosulfato tetracálcico anhídrido, sulfato de calcio y óxido de calcio sin combinar (cal). El tipo E-1 (M) contiene cemento Portland, cemento de aluminato de calcio y sulfato de calcio. El cemento tipo E-1 (S) contiene cemento Portland con un elevado contenido de aluminato tricalcico y sulfato de calcio.

El cemento expansivo también se puede fabricar siguiendo formulaciones distintas a las ya mencionadas. Las propiedades expansivas de cada tipo se pueden variar dentro de un rango considerable. El cemento tipo I se puede transformar en un cemento expansivo adicionándole un aditivo expansor en la planta premezcladora.

Cuando la expansión se restringe, por ejemplo debido al esfuerzo, en concreto de cemento expansivo (Concreto compensador de contracciones) puede ser usado para:

- 1.- Compensar la disminución de volumen ocasionada por la contracción por el secado.
- 2.- Inducir esfuerzos de tensión en el refuerzo (Postensado)
- 3.- Estabilizar a largo plazo las dimensiones de las estructuras de concreto postensado respecto al diseño original.

Una de las principales ventajas de

utilizar cemento expansivo en el concreto consiste en controlar y reducir las grietas de contracción por el secado.

Cementos para pozo petrolero.

Los cementos para pozo petrolero son empleados para sellar pozos de petróleo, que normalmente están elaborados de clinker de cemento Portland o de cementos hidráulicos mezclados. Generalmente deben de tener un fraguado lento y deben ser resistentes a temperaturas y presiones elevadas. Los cementos expansivos se han comportado satisfactoriamente como cementos para pozos.

Así mismo existen un sin numero de tipos de cemento con diferentes aplicaciones en la construcción y con diferentes combinaciones de materiales.

1.9 Agregados.

Debido a que por lo menos tres cuartas partes del volumen total del concreto están ocupadas por los agregados pétreos, no es de extrañar el hecho de que la calidad de los mismos sea de suma importancia. El agregado no sólo limita la resistencia del concreto, sino que además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del concreto.

Los tamaños de agregados utilizados en el concreto van desde unos cuantos milímetros hasta partículas pequeñísimas de décimas de milímetro en sección transversal. El tamaño máximo que se usa en la realidad varía, pero en cualquier mezcla se incorporan partículas de diversos tamaños. La distribución de las partículas según su tamaño se llama granulometría. Cuando se quiere elaborar un concreto de baja granulometría, se usan agregados que provienen de depósitos que contienen gran variedad de tamaños, desde el más pequeño hasta el más grande; denominándosele a esto agregado en bruto. La alternativa más común en la elaboración de un concreto de buena calidad, es la de obtener agregados que entren, cuando más en dos rangos de tamaño. La división principal se hace entre el llamado agregado fino o arena, cuyo tamaño no es mayor de 5 mm (3/16") y el agregado grueso, que comprende material mayor de 5 mm.

Generalmente se dice que la arena tiene un límite de tamaño menor, del orden de 0.07 mm o menos. El material entre 0.06 y 0.002 mm se clasifica como limo y, si son partículas más pequeñas, se les conoce como arcillas.

Todas las partículas de agregado proceden originalmente de una masa de mayor tamaño. Es posible que dicha masa se haya fragmentado por procesos naturales, como el intemperismo o la abrasión, o que la fragmentación haya sido artificial, mediante la trituración. Por lo tanto, muchas de las propiedades de los agregados dependen de las de la roca original, como son sus propiedades químicas, composición mineral, descripción petrográfica, densidad, dureza, resistencia, estabilidad física y química, estructura del poro, color, etc.. Por otra parte, hay propiedades que posee el agregado, pero que están ausentes en la roca original; Entre las cuales tenemos: Forma y tamaño de la partícula, Textura superficial y la absorción.

Sin embargo, aunque se pueden examinar todas las cualidades del agregado por sí mismas, es difícil definir si éste es bueno o no para la elaboración de un buen concreto, ya que se ha observado que ciertos agregados aparentemente inadecuados no causan ningún problema cuando se utilizan para elaborar un concreto.

Desde el punto de vista petrológico de los agregados, ya sean triturados o reducidos a su tamaño por naturaleza, se pueden dividir en varios grupos de rocas que tengan características similares. La clasificación por grupos no implica la conveniencia de ningún agregado en especial para la elaboración de concreto; en cualquiera de los grupos se pueden encontrar materiales inadecuados, aunque algunos grupos tienden a ser mejores que otros.

1.10 Fraguado.

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla, a esto se le denomina fraguado.

Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad tornándose difícilmente manejable; este estado corresponde al fraguado inicial.

Al continuar el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; denominándose a este estado fraguado final.

El proceso de fraguado va acompañado de cambios de temperatura en la pasta del cemento, así en el fraguado inicial existe un rápido aumento de la temperatura, mientras que en el fraguado final es la máxima temperatura originada en la pasta del cemento.

El método para obtener tanto el fraguado inicial como el final se realiza por medio de las Agujas de Vicat; el cual consiste en hacer penetrar una aguja con un diámetro de 1.3 ± 0.05 mm, dentro de la pasta ha una distancia aproximada de 5.0 ± 1.0 mm a partir de la base, sin dejar huella.

El lapso comprendido entre el fraguado inicial y el fraguado final se denomina tiempo de fraguado de mezcla. El tiempo de fraguado inicial alcanza un valor de 45 minutos; mientras que el final es de aproximadamente 10 horas.

Podemos así definir al fraguado como una parte del proceso de endurecimiento de la mezcla de concreto. Por lo tanto es necesario colocar la mezcla en los moldes antes de que se inicie el fraguado, y de preferencia dentro de los primeros 30 minutos de elaborada la mezcla. Cuando se presentan problemas especiales que demandan un tiempo adicional para el transporte del concreto de la fábrica a la obra se recurre al uso de retardantes de fraguado, compuestos de yeso o de anhídrido sulfúrico, de igual manera, puede acelerarse el fraguado con la adición de sustancias alcalinas o sales como el cloruro de calcio.

1.11 Prueba de revenimiento.

Esta es una prueba que se usa en gran medida durante el trabajo en obra en todas partes del mundo. La prueba de revenimiento no mide la trabajabilidad del concreto, pero es muy útil para detectar las variaciones de uniformidad de una mezcla, dentro de determinadas proporciones minerales.

El molde para la prueba de revenimiento es de forma troncocónica, de 30.5 mm de altura. Se coloca sobre una superficie lisa, con la abertura más pequeña hacia arriba, y se llena de concreto en tres capas. Cada una de las capas se apisona 25 veces con una varilla de acero estándar de 16 mm (5/8") de diámetro, redondeada por la punta, y la superficie se va nivelando por medio de movimientos laterales y en redondo de la varilla de apisonamiento. Durante toda la operación se debe mantener firme el molde sobre su base, esto se logra mediante abrazaderas o pedales fijados al molde.

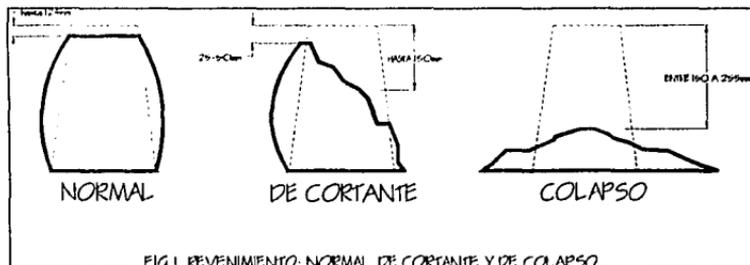
Inmediatamente después de llenarlo el cono se levanta despacio y el concreto, que ya no tiene apoyo, se reviene (de aquí el nombre de la prueba). La disminución de la altura del centro del concreto revenido se llama "Revenimiento" y se mide con los 5 mm más cercanos.

Si en lugar de revenirse uniforme y en forma redonda, como debe ser, y la mitad del cono se desliza en un plano inclinado, se dice que el revenimiento es de cortante y se debe repetir la prueba.

Las mezclas con consistencia rígida tienen un revenimiento nulo, por lo que, en un rango bastante seco, no se pueden detectar variaciones entre mezclas de diferente trabajabilidad. Las mezclas ricas se comportan de manera satisfactoria, ya que su revenimiento es sensible a las variaciones de trabajabilidad. Sin embargo, en mezclas pobres con tendencia a la aspereza, un revenimiento verdadero se puede convertir fácilmente en uno de cortante, y aun llegar al colapso.

Así, la prueba de revenimiento es de mucho provecho en la obra para verificar día a día y hora a hora la variación de los materiales que se introducen en la mezcladora. Por ejemplo, el aumento del revenimiento puede significar que el contenido de humedad de los agregados ha incrementado repentinamente; otra causa podría ser un cambio en la granulometría del agregado, como puede ser una deficiencia en la arena.

A continuación se muestran los tres tipos de revenimiento que se pueden obtener durante la prueba.



1.12 Sangrado.

El sangrado, conocido también como ganancia de agua, es un tipo de segregación en la que parte del agua de la mezcla tiende a subir a la superficie del concreto recién colado. Esto es debido a que los componentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua de mezclado cuando se asientan en el fondo.

Por la causa del sangrado la superficie de cada colado puede quedar demasiado húmeda y, si el agua queda atrapada entre elementos superpuestos de concreto, puede resultar un concreto poroso, débil y poco durable. Por otra parte, si la evaporación del agua de la superficie es más rápida que la magnitud del sangrado, existe un agrietamiento por contracción plástica.

El sangrado no siempre es dañino; si no se interrumpe y el agua se evapora la relación efectiva agua-cemento puede disminuir, dando como resultado un aumento en la resistencia del concreto.

El sangrado del concreto continúa hasta que la pasta de cemento se ha rigidizado lo suficiente para así poder poner fin al proceso de sedimentación.

1.13 Vibrado.

El proceso de compactación del concreto consiste en eliminar el aire atrapado en el, como así mismo el de forzar a las partículas a colocarse más cerca unas de otras, para así poder formar una masa compacta.

El uso de vibradores como medio de compactación permite utilizar mezclas más secas que las que se pueden compactar a mano. De hecho, se pueden vibrar en forma satisfactoria mezclas muy secas y rígidas; por lo tanto, con menor contenido de cemento se puede fabricar un concreto con la resistencia deseada.

Dentro de los diferentes tipos de vibrado existe el vibrado a mano, y el vibrado por medio de aparatos ya sea de combustión interna o eléctricos. Dentro de los vibradores se pueden mencionar los siguientes:

- a).- Vibradores internos.
- b).- Vibradores externos.
- c).- Mesas vibratoras.
- d).- Vibradores superficiales.

1.14 Curado.

Para poder lograr un concreto de buena calidad, la adecuada colocación de la mezcla deberá ir seguida de un curado, en un medio ambiente propicio durante las etapas tempranas del fraguado. Se denomina curado al procedimiento que se utiliza para promover la hidratación del cemento, y consiste en un control del movimiento de temperatura y humedad hacia el interior y el exterior del concreto.

El objeto del curado es el de mantener el concreto saturado, o lo más próximo posible a la saturación, hasta el momento en que los espacios del cemento fresco que originalmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de hidratación del cemento.

La necesidad de curar proviene del hecho de que la hidratación del cemento sólo se logra en capilares llenos de agua. Por eso es necesario evitar la pérdida de humedad en los capilares causada por la evaporación. Además, el agua que se pierde internamente por autodesecación se tiene que reemplazar con agua del exterior; o sea se debe hacer posible el ingreso del agua hacia el concreto.

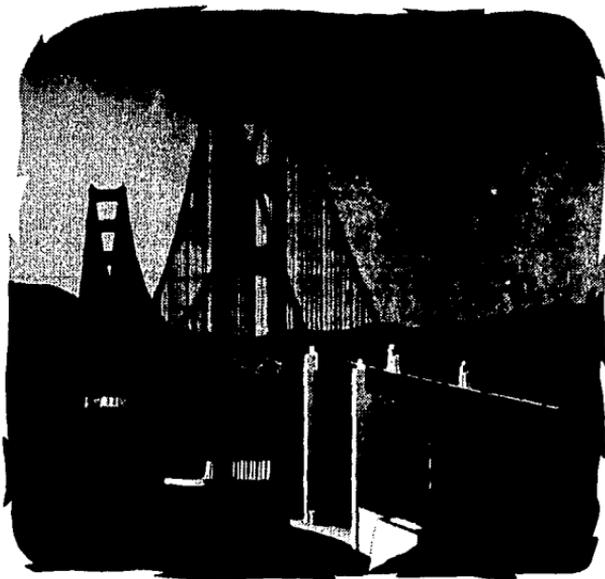
Así mismo, existen infinidad de métodos de curado del concreto; dentro de los cuales se pueden mencionar el de mojar la cimbra (cuando es un volumen pequeño), rociar por manguera hasta humedecer (volumen grande), aspersion, utilizando membranas impermeables, etc.

1.15 Trabajabilidad.

La facilidad de colocar, consolidar y dar un acabado al concreto recién mezclado se denomina trabajabilidad. El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar ni sangrar excesivamente. El aire incluido mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia del concreto fresco a segregarse y sangrar.

CAPITULO 2

CONCRETOS DE ULTRA ALTA RESISTENCIA



II. CONCRETOS DE ULTRA ALTA RESISTENCIA.

2.1 Definición.

Se define como Concreto de Ultra Alta Resistencia (C.U.A.R.) a aquel concreto o mezcla endurecida que es capaz de soportar una carga axial de compresión generalmente superior a los 900 kg/cm^2 , por medio de pruebas realizadas en probetas cilíndricas a 90 días. Este tipo de concreto debe ser capaz de producirse con materiales de fácil disponibilidad y de una alta calidad, usando mezcladoras convencionales, transportes y técnicas de colocación.

Se pueden fabricar Concretos de Ultra Alta Resistencia utilizando varias combinaciones de materiales si es posible disminuir la relación agua-cemento a valores entre 0.20 y 0.30.

Generalmente no es difícil obtener una Ultra Alta Resistencia para tales concretos, lo que es difícil controlar es el revenimiento del concreto durante un periodo suficientemente largo para su colocación en obra.

No hay duda que la utilización de los vapores de sílice (humo sílice) permiten, al mismo tiempo, controlar el revenimiento de los concretos y obtener resistencias a la compresión muy altas.

La obtención de estas resistencias ala compresión no dependen solamente de la relación agua-cemento y de la utilización de los vapores de sílice, sino también de otros factores como la calidad de los agregados gruesos, la reología tanto del superplastificante como del cemento y la eficiencia del mezclado.

Los Concretos de Ultra Alta Resistencia no son solamente interesantes por su muy alta resistencia a la compresión o por su elevado módulo de elasticidad, sino también debido a su comportamiento en relación a la permeabilidad, resistencia a la penetración de iones de cloro, resistencia a la abrasión y costos en términos de precio contra resistencia.

El límite entre los Concretos de Ultra Alta Resistencia y los concretos ordinarios ya ha sido rebasado y actualmente, debido a nuevos avances tecnológicos, se fabrican y se entregan en obra concretos con una resistencia de 1400 kg/cm^2 .

2.2 Clasificación.

Los Concretos de Ultra Alta Resistencia se dividen en cuatro clases diferentes, basándose en las resistencias promedio y en la facilidad con la que estas resistencias se pueden alcanzar:

- Clase I	750 kg/cm ² ± 125 kg/cm ² .
- Clase II	1000 kg/cm ² ± 125 kg/cm ² .
- Clase III	1250 kg/cm ² ± 125 kg/cm ² .
- Clase IV	superiores a 1500 kg/cm ² .

Se sabe muy bien que la resistencia a la compresión del concreto depende de la edad del concreto cuando se efectúa la prueba y en cierta medida de la forma y dimensiones de los especímenes de prueba. Por lo tanto se propone utilizar cilindros de 100 x 200 mm para medir la resistencia a la compresión de los Concretos de Ultra Alta Resistencia.

Dado que, por una parte, la mayoría de los Concretos de Ultra Alta Resistencia contienen aditivos que se hidratan más lentamente que el cemento y que, por otra parte, en la mayoría de las construcciones con Concretos de Ultra Alta Resistencia es menos probable que la carga sea completa a 28 que a 90 días, parece más apropiado medir la resistencia a la compresión a 90 días que a 28. Además, la experiencia muestra que a los 90 días la mayoría de los Concretos de Ultra Alta Resistencia adquieren una resistencia que ya no aumenta prácticamente, ya que toda el agua de amasado que estaba contenida en estos concretos ha reaccionado a esa edad con los cementos y los aditivos utilizados.

Concretos de Ultra Alta Resistencia clase I.

Se pueden fabricar concretos de esta clase si se utilizan materiales de buena calidad tales como los que se utilizan comúnmente para hacer concretos de resistencia normal. Bajo la condición de que sea posible disminuir la relación agua-cemento al rango entre 0.30 y 0.40.

No es necesario utilizar un cemento especial para obtener tales resistencias; la mayoría de los cementos Portland ordinarios pueden ser utilizados. Tampoco es necesario utilizar aditivos; sin embargo si se dispone de cenizas volantes, escorias ó vapores de sílice, a

buen precio, será preferible utilizarlos en tanto resulten económicos. Cuando se utilicen aditivos, la reducción a la resistencia a la compresión, a 24 horas, debido a la sustitución parcial de una cierta cantidad de cemento Portland por un material menos reactivo, no plantea ningún problema ya que la resistencia a la compresión a un día en estos concretos es por lo general más grande o del mismo orden de magnitud que la que los contratistas manejan habitualmente con los concretos ordinarios.

La utilización de un material de sustitución deberá investigarse cuidadosamente en esta clase de concretos si el colado se hace en un estado frío, en época de invierno, ya que la reacción de hidratación puede ser lenta por las bajas temperaturas ambientales y la resistencia a la compresión a muy corto plazo puede disminuir grandemente.

Se puede utilizar un superplastificante para disminuir la relación agua-cemento y facilitar la fabricación de esta clase de concretos y eventualmente, si es necesario, volver a dar al concreto un revenimiento adecuado en la obra, pero también se pueden utilizar los reductores de agua ordinarios bajo la condición de aumentar considerablemente la dosificación en relación a la que se utiliza en los concretos de resistencia normal.

No es necesario utilizar agregados especiales, si éstos están limpios y no son demasiado débiles. También se pueden fabricar con agregados ligeros o con grava de río, no muy lisa; pero esta clase de concretos representa frecuentemente el límite superior de utilización de este tipo de agregados. No

es necesario utilizar una arena especial si la que se usa cumple con las exigencias de limpieza habitual.

También se puede utilizar aire incluido; el contenido de aire deberá, ser del orden de 4 a 5%.

En las siguientes tablas se encuentra la composición típica y las resistencias a la compresión de los concretos comerciales que se venden actualmente en las regiones de Chicago, Toronto y Montreal. Estos concretos se fabrican utilizando cemento Portland ordinario.

Tabla I.
River Plaza Chicago 1974.
Concreto clase I.

Materiales	Cantidad	Edad (días)	Resistencia (kg/cm²)
Agua	195 lts.	7	503
Cemento	505 kg/m ³	28	648
Ceniza volante	60 kg/m ³	56	724
Agregado grueso	1030 kg/m ³	91	786
Agregado fino	630 kg/m ³		
Reductor de agua	975 cm ³		

Tabla II.
Toronto 1988.
Concreto clase I.

Materiales	Cantidad	Edad (días)	Resistencia (kg/cm²)
Agua	145 Lts	7	620
Cemento	290 Kg/m ³	28	905
Escona	110 Kg/m ³	56	828
Vapor de sílice	33 Kg/m ³	91	935
Agregado grueso	1130 Kg/m ³		
Agregado fino	775 Kg/m ³		
Superplastificante	4.01 Lts		
Reductor de agua	817 cm ³		

**Tabla III.
Montreal 1988.
Concreto clase I.**

Materiales	Cantidad	Edad (días)	Resistencia (kg/cm²)
Agua	170 Lts	7	483
Cemento	577 Kg/m ³	28	607
Agregado grueso	950 Kg/m ³	56	655
Agregado fino	715 Kg/m ³		
Superplastificante	3.2 Lts		

**Concretos de Ultra Alta
Resistencia clase II.**

Para obtener un determinado nivel de resistencia a la compresión es necesario reducir la relación agua-cemento a un valor comprendido entre 0.25 y 0.30, utilizando un superplastificante. Todos los ingredientes del concreto deben ser de muy buena calidad.

No es necesario utilizar un cemento especial porque este tipo de concretos se han podido elaborar utilizando cementos ASTM de tipos I, II y III.

Sin embargo, ciertas combinaciones de superplastificante y cemento son mucho más favorables que otras, sobre todo en lo que concierne a las pérdidas de revenimiento. Se recomienda especialmente utilizar aditivos con la mayoría de los cementos Portland porque de esta manera se puede resolver más fácilmente el problema de la pérdida de revenimiento y también porque disminuye de cierta manera el precio de venta del concreto. Sin embargo, con algunos cementos Portland, se pueden fabricar concretos de 1000 Kg/cm² sin utilizar ningún aditivo. Frecuentemente, el control del revenimiento puede obtenerse utilizando un agente retardador. Se han utilizado combinaciones cemento-vapor

de sílice o de cemento-escoria-vapor de sílice, para fabricar concretos de esta clase.

Es necesario utilizar agregados gruesos muy resistentes, lo más cúbicos o redondos posible, de un diámetro máximo de 10 a 12 mm. Los agregados triturados o las gravas glaciares han sido utilizadas principalmente para concretos de esta clase. Los agregados gruesos, producidos por trituradoras de impacto o de martillo, tienen por lo general una forma mucho más cúbica y son más resistentes que los producidos por trituradoras cónicas, ya que estas tienden en general a producir agregados alargados o aplastados, de manera que el concreto fabricado con ellos tiene una manejabilidad menor y una mayor tendencia a atrapar burbujas de aire. Todo incremento de aire incluido disminuye la resistencia.

Es mejor utilizar arena gruesa que tenga un módulo de finura cercano a 3.0. Por lo tanto, la mezcla es suficientemente rica en partículas finas, de manera que no hay necesidad de añadir de nuevo una arena fina para mejorar su manejabilidad y su cohesión. La utilización de un superplastificante es necesaria, combinado o no con un agente retardador según el comportamiento reológico de la combinación cemento-superplastificante. Con los agentes inclusores de aire comerciales actuales, no existe problema para incluir aire en esta clase de concretos.

Se ha podido demostrar que este tipo de concretos en ciertos casos pueden ser durables ante ciclos de congelación y deshielo aun cuando no contengan aire incluido.

No es muy recomendable la producción de tales concretos en plantas de fabricación en donde la mezcla se elabore en camión mezclador, y aun cuando se llegue a realizar esto se debe de tratar con mucho cuidado.

En las tablas siguientes se presentan las composiciones típicas y las resistencias a la compresión de concretos de esta clase.

Tabla IV.
Plaza de Nueva Escocia, Toronto.
Concreto clase II.

Materiales	Cantidad	Edad (días)	Resistencia (kg/cm²)
Agua	145 lts	7	669
Cemento (Tipo I)	315 Kg/m ³	28	834
Escoria	137 Kg/m ³	56	890
Vapor sílice	36 Kg/m ³	91	931
Agregado grueso	1130 Kg/m ³		
Agregado fino	745 Kg/m ³		
Superplastificante	5.9 Lts.		
Reductor de agua	900 cm ³		

Tabla V.
Vaya Diatta, Universidad de Sherbrooke.
Concreto clase II.

Materiales	Cantidad	Edad (días)	Resistencia (kg/cm²)
Agua	145 lts	7	837
Cemento (Tipo III)	570 Kg/m ³	28	921
Agregado grueso	1030 Kg/m ³	91	1031
Agregado fino	720 Kg/m ³		
Superplastificante	16.2 Lts		

Tabla VI.
La Laurentienne, Montreal (1984).
Concreto clase II.

Materiales	Cantidad	Edad (días)	Resistencia (kg/cm²)
Agua	135 lts	7	772
Cemento (Tipo I)	520 Kg/m ³	28	924
Vapor sílice	30 Kg/m ³	56	1048
Agregado grueso	1100 Kg/m ³	91	1084
Agregado fino	700 Kg/m ³	1 año	1194
Superplastificante	14.75 Lts.		
Retardante	1.24 Lts.		

Concretos de Ultra Alta Resistencia clase III.

Actualmente para fabricar concretos de esta clase, es absolutamente necesario utilizar materiales con una calidad excepcional tanto en relación con los aditivos como con el superplastificante y sobre todo con los agregados gruesos. es necesario utilizar técnicas de mezclado muy eficientes y tener un grado muy alto de control de calidad.

La relación agua-cemento debe disminuir al rango entre 0.20 y 0.25 para poder fabricar esta clase de concreto. Es preferible utilizar un cemento de baja reactividad y vapor de sílice de excelente calidad. El mejor agregado es una grava glaciar de 10 mm de diámetro; la arena debe ser gruesa, su módulo de finura debe estar comprendido entre 3.0 y 3.3.

Se deben utilizar muy altos contenidos de dosificación de superplastificante y de agente retardador. La dosificación simultánea de estos dos aditivos puede ser delicada, esta dosificación depende de la reactividad del cemento, de la duración de la liberación y de la resistencia a la compresión deseada a 24 ó 48 horas

En la siguiente tabla se muestra su composición y resistencia a la compresión.

Tabla VII.
Grava glaciar de Seattle, Washington (Resultados Personales).
Concreto clase III.

Materiales	Cantidad	Edad (días)	Resistencia (kg/cm²)
Agua	130 lts	7	759
Cemento (Tipo I y III)	535 Kg/m ³	28	1240
Vapor sílice	42 Kg/m ³	56	1379
Agregado grueso	1200 Kg/m ³	91	1517
Agregado fino	610 Kg/m ³		
Superplastificante	Desconocido		
Retardante	Desconocido		

Concretos de Ultra Alta Resistencia clase IV.

Hasta ahora, estos concretos se han producido únicamente en el laboratorio. El especialista H. H. Bache, de la compañía de cementos Albong de Dinamarca, anuncio que había fabricado un concreto de 2800 Kg/cm². Este era sobre todo un mortero de laboratorio con una relación agua cemento de 0.16. Un nivel tal de resistencia a la compresión sólo pudo lograrse utilizando simultáneamente altas dosificaciones de superplastificante y vapores de sílice (equivalente a 25% en relación con la masa de cemento utilizado). Fue necesario utilizar también un agregado artificial, Bauxita calcinada, de 4 mm de diámetro máximo. Este concreto se curó con agua caliente.

2.3 Aditivos químicos.

Sin el empleo de los aditivos superplastificantes sería imposible conseguir un Concreto de Ultra Alta Resistencia, ya que éstos son los que hacen posible la reducción del contenido de agua, manteniendo o aumentando la deseada

trabajabilidad del concreto. El papel de estos aditivos es el de reducir la porosidad y permeabilidad por la disminución del agua y además de como mejoradores de la trabajabilidad deben ser considerados como mejoradores de la durabilidad.

El empleo de los superplastificantes en los Concretos de Ultra Alta Resistencia es totalmente imprescindible, debido a la tendencia que las partículas de cemento tienen a flocular como consecuencia de la acción de las fuerzas electrostáticas en los granos y la elevada tensión superficial del agua que está a su alrededor.

Los superplastificantes son polímeros policondensados de melamina formaldehído sulfonato o de naftaleno-formaldehído sulfonado, que poseen cadenas de gran longitud y pocas ramificaciones laterales, prácticamente están exentos de impurezas y permiten su uso en dosificaciones elevadas sin poseer, en general, efectos colaterales indeseables. Estos polímeros dan mayor cohesión a la pasta sin alterar su fluidez, pudiendo por tanto producirse concretos de muy baja relación agua-cemento y con una gran plasticidad, dando lugar también a una microestructura muy densa con propiedades equivalentes o superiores a las de las gravas empleadas en el concreto.

Uno de los efectos colaterales de los superplastificantes es la pérdida de consistencia aproximadamente a los 30 minutos de la adición, dependiendo del tipo de fluidificante y de cemento empleado. Este efecto está asociado con la formación de sulfoaluminato cálcico hidratado o etrígita que se precipita incorporando un gran volumen de agua libre.

Los efectos de los superplastificantes en la mezcla de concreto se pueden resumir como los siguientes:

- Para la misma relación agua-cemento y la misma cantidad de agua en la mezcla, obtienen consistencias más bajas, que pueden ser fluidas si se añade una cantidad suficiente de aditivo.
- Permite reducir la cantidad de agua de un 20 a 30%, manteniendo la misma consistencia en la mezcla, obteniendo por tanto mezclas con relación agua-cemento menor y por tanto de mayor resistencia.
- Al reducir la permeabilidad del concreto mejora su durabilidad.

Este efecto del superplastificante tiene una duración limitada, dependiendo de su composición. La pérdida de asiento suele producirse muy rápidamente, aunque puede volver a recuperarse añadiendo una nueva cantidad de aditivo a la masa de concreto.

La forma de añadir el aditivo a la mezcla influye en su efectividad de disminución en la consistencia y en la duración de su efecto. En general, es mejor

repartirlo en dos partes y conseguir una buena homogeneización dentro de la masa de concreto.

La dosificación de superplastificante en las aplicaciones de concreto convencional no suele superar el 1% en peso de cemento. En el Concreto de Ultra Alta Resistencia, y dados los valores de la relación agua-cemento que se requieran alcanzar, es normal superar este valor y utilizar cantidades entre 2 y 3% en peso de cemento.

2.4 Adiciones minerales.

Las adiciones en su mayor parte son minerales provenientes de subproductos industriales considerados como residuos y, su empleo en los concretos presenta elevados beneficios por la economía, consumo de energía, protección ambiental y conservación de recursos naturales. En términos técnicos, los beneficios más importantes se presentan en forma de aumento de resistencias, disminución de permeabilidad y por tanto, aumento de la durabilidad.

Debido a la finura de estos materiales puzolánicos se consiguen mejoras importantes de las propiedades reológicas de los concretos, como son la cohesión y la viscosidad. Por la segmentación que las partículas finas producen de los capilares de flujo de agua se reduce la segregación y exudación, principales fuentes de heterogeneidad en los concretos. Las partículas de las adiciones actúan como puntos de precipitación de los productos de hidratación del cemento, dando lugar a un cierre de poros y concretos más homogéneos. De esta forma se consigue reducir el tamaño de los poros de una forma más eficaz que la que se conseguiría por una simple reducción de la relación agua-cemento que da lugar a los superplastificantes.

Las adiciones minerales más utilizables en los Concretos de Ultra Alta Resistencia son: la Microsilíce y las cenizas volantes.

La microsilíce o humo de sílice es un subproducto que se obtiene en el proceso de fabricación del metal silicio y del ferrosilicio. Al producirse en el horno la reducción del cuarzo, se desprenden unos gases que contienen un polvo de extremada finura, cuya composición química indica que se trata, en un porcentaje muy elevado (normalmente superior a un 90%), de dióxido de silicio. Antiguamente, este polvo se arrojaba a la atmósfera, pero la legislación del medio ambiente obligó a su recolección a través de sistemas de filtrado o filtros. En los laboratorios de investigación se comprobó las ventajas que se obtenían al añadirlo a las masas del concreto.

La microsilíce tiene un doble efecto sobre el concreto; produce un refinamiento de su sistema de poros y además tiene una actividad puzolánica muy intensa,

reaccionando con el hidróxido cálcico desprendido en las reacciones de hidratación del cemento, para producir silicatos de calcio hidratados. Estas dos características que presenta la microsilíce provienen de su composición química (dióxido de silicio casi puro) y de su extremada finura, que la hace altamente reactiva. Aun cuando se paralice su reactividad al consumirse el total del hidróxido cálcico, la parte que queda inerte en el seno de la masa produce una disminución de la porosidad, especialmente de los poros de mayor tamaño. Ambos efectos; puzolanidad y refinamiento, dan lugar a un concreto más compacto y por tanto de mayor resistencia.

Las dosis de microsilíce normalmente empleadas en los Concretos de Ultra Alta Resistencia oscilan entre el 5 y el 10% del peso del cemento, consiguiendo incrementos de resistencia que no suelen superar el 30% respecto a las mismas mezclas sin microsilíce. Sin embargo, se pueden alcanzar mayores resistencias con dosis del 15 al 20%. Para un nivel de resistencia determinado, conviene utilizar el mínimo contenido de microsilíce posible, ya que se trata de un producto que encarece notablemente el precio del concreto. Sin embargo, si se quieren conseguir resistencias cercanas o superiores a los 1000 Kg/cm² es obligado utilizar microsilíce en la dosificación.

Las cenizas volantes se obtienen como subproductos en el proceso de combustión del carbón de las centrales térmicas, al filtrarse electrostáticamente los gases procedentes de la combustión. Tiene un tamaño superior a la microsilíce, y su composición química es muy variada según se trate de la materia prima utilizada en la combustión, siendo menos ricas en sílice reactivo.

Las cenizas volantes se utilizan en el concreto por su acción puzolánica, aunque ésta resulta ser menos activa y más tardía que la producida por la microsilíce, debido al mayor tamaño de las partículas y a una composición más pobre en sílice que la microsilíce. Las cenizas a emplear deben ser de calidad y de probada uniformidad en la fuente de origen. Este es el punto fundamental, ya que existe una gama muy variada de cenizas volantes. Cada central produce unas cenizas con unas características determinadas, que incluso pueden variar considerablemente de unas partidas a otras. No todas las cenizas son aplicables ni siquiera dentro del concreto convencional, por lo que su utilización para conseguir Concretos de Ultra Alta Resistencia exige, conocer muy bien las características y uniformidad de la fuente de cenizas elegidas. Como referencia se puede señalar que, de la clasificación ASTM Americana, han sido empleadas de la clase "C y F" para producir Concretos de Ultra Alta Resistencia.

La adición de cenizas no puede producir un aumento de la resistencia a edades tempranas, aunque se experimenta un aumento con respecto a los concretos de control, es decir, sin cenizas, más allá de los 7 días.

Las dosis de cenizas volantes habitualmente empleadas para producir Concretos de Ultra Alta Resistencia suelen ser superiores a las que se emplean con microsilíce. Son porcentajes normales del 15 al 25% en peso del cemento. En total, la

cantidad de material cementoso (cemento más adición mineral) empleado en las mezclas con cenizas es bastante superior al utilizado en las de microsilíce.

Para poder elegir como adición las cenizas volantes o la microsilíce hay que tener en consideración diversos factores:

- **Calidad y uniformidad de la fuente, que suele ser muy superior en el caso de la microsilíce.**
- **Disponibilidad en la zona de excedentes de una u otra adición.**
- **Precio en el mercado de cada una de ellas. En este punto hay que considerar el precio conjunto de todos los elementos de la mezcla, ya que la microsilíce suele ser más cara que las cenizas, sin embargo, se emplea en cantidades inferiores y con un contenido de cemento normalmente inferior también.**
- **Si se necesitan altas resistencias a edades tempranas (por ejemplo en el caso de elementos pretensados) parece más apropiado utilizar la microsilíce en lugar de las cenizas volantes.**
- **El concreto con microsilíce tiene un calor de hidratación superior al que se obtiene cuando se utiliza como adición cenizas volantes.**

2.5 Economía.

Hablando sobre economía el Concreto de Ultra Resistencia es el más económico en el sentido de resistencia a la carga axial, siendo esto una ventaja para la construcción de columnas lo más económicas y pequeñas. Tradicionalmente esto es aplicable a columnas de armado convencional.

Como un ejemplo de esto tenemos que el costo relativo aproximado de 300 y 600 kg/cm² de resistencia del concreto, contra un acero de grado 350 (3450 kg/cm²), para poder resistir la misma carga axial; se puede observar en la siguiente tabla, en donde se visualizan las ventajas económicas de este tipo de concreto.

Costos relativos de diferentes materiales para resistir la misma carga.

Concreto de 300 kg/cm ²	Concreto de 600 kg/cm ²	Acero de grado 350
1.5:	1:	2:

Así mismo los costos relativos de un concreto de resistencia de 1000 kg/cm^2 que resiste una carga específica utilizando costos de concreto común pueden ser tan bajos hasta llegar a un valor de 0.75. Estas consideraciones han desarrollado la habilidad que produce este concreto ya comercial para determinadamente llegar a ser unas ventajas en la Industria de la Construcción.

De cualquier modo, con la utilización únicamente de acero o de concreto no se puede realizar un buen acabado a las columnas de una construcción, ya que el concreto necesita refuerzo, encofrado o molde, revestimiento y pintura; en tanto el acero necesita una protección contra el fuego, revestimiento y pintura. Realizando un comparativo entre estos tres elementos se obtiene que el Concreto de Ultra Alta Resistencia es el mas apropiado para elaborar columnas lo mas económicas.

Por medio de grandes pruebas encaminadas hacia la economía se obtuvo que existen dos opciones de columnas económicas; la primera opción que se da consiste en una columna de concreto reforzado de Ultra Alta Resistencia, mientras que la segunda es una columna compuesta que consiste en ahogar concreto dentro de un tubo de acero encajando puntales de acero. Dentro de estas dos opciones tenemos que si se incrementa la cantidad de acero en la columna automáticamente se incrementan los costos.

Los estudios mas recientes sobre este tipo de columnas compuestas fueron mostrados en el proyecto de un edificio de 43 niveles en Melbourne, Australia denominado como Casselden, en donde se utilizaron columnas elaboradas con tubos de acero rellenas con concreto como una protección contra el fuego, siendo esta una construcción de alrededor del mismo costo de una columna de concreto reforzado de Ultra Alta Resistencia.⁽¹⁾

Con esta nueva tecnología se reduce la fabricación de edificios que sean completamente de acero para dar paso al Concreto de Ultra Alta Resistencia, ya que el acero en comparación con el concreto es de un costo mas elevado.

2.6 Ductilidad.

El concreto simple no es en particular un material dúctil, diferentes refuerzos y elementos de concreto prefabricados tienen una variación y una disminución de la ductilidad; esto es visto en varios sentidos por medio de códigos, usando inclusive diferentes factores reductores de la resistencia. Por ejemplo, el código Australiano AS3600 sobre las estructuras de concreto muestra un factor de reducción de la resistencia para vigas, de 0.8, comparándose con un factor de 0.6 para la menor dúctil, en columnas cargadas axialmente. En el Código del ACI (American Concrete Institute) 318-89, los mismos efectos son reflejados en el factor de reducción de la resistencia, con el factor para vigas por el momento de 0.90 y de 0.70 para columnas.

El Concreto de Ultra Alta Resistencia es menos dúctil que el concreto de resistencia normal, aunque las ductilidades relativas de los dos materiales cuando son reforzados son menores.

Este aprovechamiento ha sido usado para mejorar la ductilidad de columnas de concreto en donde substancialmente es necesario el uso de acero de refuerzo adicional (estribos). Esto ha sido usado en el diseño de columnas de edificios que requieren ser diseñados para cargas de terremotos.

El Código común del ACI y el australiano AS3600 se dirigen únicamente al acero que es requerido durante el problema del pandeo del refuerzo longitudinal y pueden ser mostrados para tener un pequeño efecto en los límites de los centros de las columnas de concreto. Una columna puede ser mucho más dúctil cuando existe un incremento del volumen del armado en esta misma. Si es utilizado suficiente armado, una substancial y restante resistencia se presenta en las caras externas del concreto el cual es completamente descantillado.

Por esto, es lógico que un incremento en el factor de reducción de resistencia debería ser apropiado si se adiciona armado que estuviera proporcionado para una columna de resistencia normal. Esta lógica puede ser seguida completamente para columnas de Concretos de Ultra Alta Resistencia, intentando proporcionar una ductilidad comparable para el mismo factor, o diversificando ambos para proporcionar adecuados factores de reducción de capacidad para la ductilidad de columnas.

Un adecuado método de diseño para Concretos de Ultra Alta Resistencia en columnas es el siguiente:

- 1.- Determinación y adecuado factor de reducción de resistencia para ser usado con Concretos de Ultra Alta Resistencia. Esto puede ser necesario para variar las resistencias y ser menores que factores los comunes.
- 2.- Determinación de la cantidad de armado que debería ser requerido para proporcionar una ductilidad comparable con aquel proporcionado por la existencia de un armado requerido para 500 kg/cm² de resistencia del concreto.
- 3.- Permitir proyectos para diseñar columnas armadas que proporcionen un incremento en la ductilidad y al mismo tiempo incrementar los factores de reducción de resistencia para que esta ductilidad mejore.

Crawley⁽²⁾ sugiere que la capacidad de los límites del centro de una columna (Fig. 1), después del descantillamiento del concreto externo debería ser de 0.9, edad de la última capacidad, usando el método propuesto por Mander, Priestley y Park.⁽²⁾



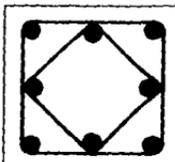
FIG.1 MUESTRA DE LA SECCION DEL CENTRO DE UNA COLUMNA.

Aunque el descantillamiento de las capas externas es más probable en Concretos de Ultra Alta Resistencia, el proponer requerimientos es considerado como excesivo, como si requiriera de una resistencia restante muy alta que debiera ser el caso para proyectos de columnas con requerimientos de códigos comunes. Considerando una columna de 600 x 600 mm (Tabla 1.), con un 1% de refuerzo, y dos estribos, el mínimo acero requerido para esta columna por el código AS3600 debería ser acero R10 a cada 360 mm (acero de 3/8" a 14") en los centros, que deberían tener una restante capacidad en el centro de 0.73, edad de la máxima resistencia. El centro de la misma columna con 1200 Kg/cm² de resistencia del concreto debe tener 0.70, edad de la máxima resistencia.

En aceros mínimos y con un pequeño efecto limitante, se mejora ligeramente la resistencia del centro de una columna de 300 Kg/cm². Pero esto no ha mejorado virtualmente efectos en el centro de una columna de 1200 Kg/cm², ya que el efecto es proveniente por medio de un acero mas pesado para mejorar la resistencia del centro. Para tener mejoras en una relación de la capacidad, de 0.9, el acero en 300 Kg/cm² de resistencia en columnas, debe ser incrementado a un acero Y16 a 200 mm (acero de 5/8" a 8"), mientras que para 1200 Kg/cm² de resistencia deben de ser aun más aumentados a un acero Y32 a 200 mm (acero de 1 1/4" a 8") para tener el mismo efecto. Este refuerzo requerido parece muy extracto, dando sobre todo a aquellos diseños de columnas comunes que no deben mejorar las medidas de ductilidad requeridas.

La necesidad para proporcionar acero adicional en columnas de Ultra Alta Resistencia es probable, aunque no tiene una disminución clara. El nivel de ductilidad implícito con requerimientos de acero común y factores de reducción de resistencia, también no son claros para el uso de Códigos comunes en práctica.

Tabla 1. Requerimientos de acero para una columna de 600 x 600 mm.



Resistencia a la compresión del concreto			
	300 kg/cm ²	600 kg/cm ²	1200 kg/cm ²
Acero requerido por el ACI 318-89	R 10 - 300 3/8" @ 12"	R 10 - 300 3/8" @ 12"	R 10 - 300 3/8" @ 12"
Acero requerido por el AS 3600	R 10 - 360 3/8" @ 14"	R 10 - 360 3/8" @ 14"	R 10 - 360 3/8" @ 14"
Capacidad del límite de la sección /Capacidad de la sección llena	0.73	0.72	0.70
Acero requerido para proporcionar una relación de capacidad de 0.9* (recomendado por Crawley)	Y 16 - 200 5/8" @ 8"	Y 24 - 200 1" @ 8"	Y 32 - 200 1 1/4" @ 8"
Acero requerido para proporcionar una relación de capacidad de 0.8*	Y 12 - 200 1/2" @ 8"	Y 16 - 200 5/8" @ 8"	Y 24 - 200 1" @ 8"

* Calculado usando el método de Mander, Priestley y Park

Algunas relaciones en base a la ductilidad son las siguientes:

- Límites en relación al esfuerzo longitudinal.
- Límites en espacio de varillas y armado longitudinal.
- Requerimientos detalladamente en juntas.
- Algún volumen calculado de acero de refuerzo dependiendo de la resistencia del concreto.
- Posibles cambios en el factor de reducción de la resistencia.

Aparentemente, el descantillamiento del concreto ocurre más fácilmente en los Concretos de Ultra Alta Resistencia, porque en estos existen bajos contenidos de agua.

Costos de columnas tipo.

Los costos de los diferentes tipos de columnas son comparados en la figura 2. Tres diferentes columnas usan concreto con resistencia de 1200 Kg/cm²,

en donde dos columnas son con concreto reforzado convencional y una con concreto relleno en un tubo de acero.

FIG. 2
COSTOS RELATIVOS DE DIFERENTES TIPOS
DE COLUMNAS PARA RESISTIR LA MISMA CARGA.

No.		COLUMNA	COSTO REL.
1		DE CONCRETO REFORZADO DE 600 Kg/cm ² 840 x 840 mm. (6 VARELLAS DE 1") ACERO REQUERIDO POR EL A53600 (R10-360)	1.0
2		DE CONCRETO REFORZADO DE 1200 Kg/cm ² 600 x 600 mm. (8 VARELLAS DE 1") ACERO PROPUESTO POR CRAWLEY (1989) (Y52-200)	0.79
3		DE CONCRETO REFORZADO DE 1200 Kg/cm ² 660 x 660 mm. (8 VARELLAS DE 1") ACERO REQUERIDO POR EL A53600 (R10-360)	0.77
4		CONCRETO EN UN TUBO DE ACERO DE GRADO 250 Y UNA RESISTENCIA DE 600 Kg/cm ² 29" DE DIAMETRO POR 5/8" DE ESPESOR	0.98
5		CONCRETO EN UN TUBO DE ACERO DE GRADO 250 Y CON UNA RESISTENCIA DE 1200 Kg/cm ² 25" DE DIAMETRO POR 5/16" DE ESPESOR.	0.71
6		COLUMNA DE ACERO DE GRADO 350 600 x 40 PATIN (24" x 1 1/2") 520 x 40 ALMA (21" x 1 1/2")	2.21

La primera columna con 1200 Kg/cm² de resistencia utilizo la recomendación para armado por Crawleys y un factor de reducción de resistencia de 0.6, que es el requerido por el código AS3600. En la segunda columna el factor de reducción de resistencia es idealmente reducido hasta 0.5, con un armado mínimo que es proporcionado por el código común.

Algunas ventajas de este tipo de columnas mostradas en la figura 2, son las siguientes:

- 1.- Las columnas de acero son de un costo más alto que cualquier otro tipo de columna.
- 2.- El tubo de columna puede ser fabricado para un costo aproximadamente igual que las columnas de concreto reforzado convencional.
- 3.- Los 1200 Kg/cm² de resistencia en columnas proporcionan desde un 20% hasta 25% en economía tanto para el acero como así, a la reducción del factor de resistencia a 0.5.
- 4.- El acero adicional es substancialmente un costo a desventaja y encaminado a una columna con 21% más de área, es ligeramente más barata.
- 5.- El tubo columna es relativamente más competitivo debido a la resistencia incrementada por el concreto.
- 6.- El tubo columna ofrece el potencial para reducir tamaños de

columnas, siendo así más baratas.

Esto es que una columna de 800 x 800 mm con 800 Kg/cm² de resistencia y con un 1% de acero es tan resistente como una de 750 x 750 mm de 800 Kg/cm² y con 4% de acero.

2.7 Mezclado.

Cuando se fabrica un Concreto de Ultra Alta Resistencia con baja relación agua-cemento, el procedimiento de mezclado es de gran importancia. La experiencia⁽⁶⁾ demuestra que incluso pequeños cambios en los procedimientos de mezclado producen variaciones en los factores de trabajabilidad. A diferencia de los concretos tradicionales en los que habitualmente se efectúa el mezclado completo del concreto previamente a su llegada a la obra y, por consiguiente, no se considera admisible ninguna modificación a pie de encofrado de la dosificación de planta, en los Concretos de Ultra Alta Resistencia es conveniente la incorporación del aditivo en dos fases: una primera en planta, en cantidad suficiente para permitir la obtención de una masa con la consistencia adecuada para posibilitar su transporte; y una posterior en obra, en la que se ajustará la cantidad necesaria para obtener la consistencia previa.

En ocasiones, es necesaria la incorporación de una cantidad de aditivo superior a la inicialmente prevista para compensar la pérdida de asiento experimentada por la masa de concreto durante su transporte. En tales casos, la operación de mezclado debe completarse en la propia obra con posterioridad a la incorporación del aditivo, recomendándose una velocidad de rotación de la cuba superior a la del régimen mantenida durante dos minutos.

A excepción de la consideración anterior, relativa al procedimiento de incorporación del aditivo, el proceso general de mezclado de los Concretos de Ultra Alta Resistencia es muy similar al de cualquier concreto tradicional. Así mismo algunos investigadores consideran que el tiempo de mezclado, cuando se fabrican Concretos de Ultra Alta Resistencia, se debería incrementar un 50% con respecto al especificado para concretos tradicionales, a fin de obtener los mejores efectos de los agentes superplastificantes.

El control en obra debe ser muy estrecho; por lo tanto se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Debe exigirse uniformidad a todos los elementos de la mezcla y controlarse perfectamente su dosificación, especialmente la del agua.

- El curado del Concreto de Ultra Alta Resistencia debe hacerse mediante métodos que aporten agua al concreto. Está desaconsejado el uso de compuestos de curado. El periodo de curado mínimo debe ser de 3 días.

2.8 Revenimiento.

Hasta hace pocos años, el concepto de concreto de alta calidad estaba implícitamente relacionado con el concreto de reducido revenimiento. Como consecuencia de la incompatibilidad generalmente admitida entre sobreabundancia de agua de amasado y resistencia elevada, las consistencias "seca" y "plástica" eran las habitualmente exigidas cuando se pretendía la obtención de los concretos de alta calidad. En los Concretos de Ultra Alta Resistencia el panorama cambia radicalmente. Con la incorporación de los superplastificantes a los componentes del concreto, el fenómeno de consistencia de una masa queda parcialmente desligado de su contenido de agua, al posibilitar aquéllos la obtención de concretos extraordinariamente fluidos con relaciones agua-cemento no superiores a 0.30.

Los Concretos de Ultra Alta Resistencia son a menudo utilizados en elementos estructurales como muy altas cuantías de armado, conociendo cuantías de armado superiores a 1000 Kg de acero por m³ de concreto en algunas zonas localizadas de las plataformas "Offshore".⁽⁶⁾ Por consiguiente, es habitual la necesidad de obtener Concretos de Ultra Alta Resistencia con revenimientos iguales o superiores a 200 mm.

La importancia de revenimientos tan elevados en pastas con muy alta dosificación de partículas finas y reducida cantidad de agua puede favorecer la aparición de dos fenómenos a considerar:

- 1.- Las partículas finas no son suficientemente dispersadas en la pasta, con al consiguiente reducción de la tensión superficial entre las partículas sólidas y el agua.
- 2.- Debido a su elevada superficie específica, el exceso de partículas finas en la mezcla puede afectar la consistencia del concreto resultante, observándose, en ocasiones, un concreto "pegajoso" que es imposible de compactar.

En tales casos, es imprescindible reconsiderar los componentes empleados en la dosificación y/o revisar el contenido de agua o el aditivo, de forma que se consiga un concreto de mayor fluidez. Una vez conseguida la consistencia necesaria es fundamental adoptar los medios precisos para mantenerla invariable hasta finalizar la operación completa de puesta en obra.

la importancia de la incorporación del superplastificante en diversos momentos del amasado es destacada por numerosos investigadores. Así, Richard⁽⁶⁾ uno de estos investigadores, expone los resultados de su experiencia consistente en añadir los superplastificantes inicialmente al agua de amasado en una dosificación determinada y, después de un tiempo de amasado de 60 segundos, se observaron diferencias en el asiento inicial del concreto de casi 100 mm.

Callander⁽⁷⁾ y otros investigadores destacan la importancia de la secuencia de adición y describen un sistema de producción de concreto consistente en incorporar el aditivo previsto en la planta para conseguir un revenimiento comprendido entre 100 y 150 mm. En estas condiciones el concreto se transporta a la obra, donde se le incorpora la cantidad de superplastificante precisa para obtener la trabajabilidad requerida.

Aitcin⁽⁷⁾ y otros investigadores reflejan el proceso de fabricación real seguido en una estructura mediante el esquema siguiente:



No es posible dar reglas sencillas que permitan establecer el "tiempo de uso" de una mezcla de concreto, ya que el mismo depende de una considerable cantidad de variables: consistencia inicial, tipo de adiciones incorporadas, clase de aditivo,

dosificación y composición química del cemento empleado, temperatura ambiente, etc.

El riesgo que puede implicar una sobredosificación de superplastificante en ciertos casos es el de reducir las resistencias del concreto debido al tipo de cemento, mientras que en otros en aumenta la resistencia.

2.9 Transportación.

Los equipos y medios de transporte habitualmente utilizados en los concretos normales pueden ser usados en los Concretos de Ultra Alta Resistencia.

La consideración más significativa a tener en cuenta durante el transporte de los Concretos de Ultra Alta Resistencia la constituye la diferencia de consistencia del concreto transportado. El imponer en planta acciones correctoras para posibilitar la llegada del concreto a la obra en las condiciones de docilidad previstas es muy problemático, por lo que, la pérdida de humedad de la masa durante la operación de transporte debe ser corregida en el sitio previamente a la descarga del concreto. A este respecto, cabe destacar que la influencia a la evaporación de agua en estos concretos, tiene una mayor incidencia en la pérdida de trabajabilidad de la masa que la que se produce en los concretos a los que se incorpora menor cantidad de aditivos reductores de agua.

El tiempo máximo recomendable entre la adición del agua de amasado al cemento y los agregados, y la descarga completa del camión no debe exceder el menor de los dos límites siguientes:

- a).- 90 minutos.
- b).- 300 revoluciones del tambor de mezcla.

Al igual que en el caso de los concretos normales cada carga de Concreto de Ultra Alta Resistencia deberá ir acompañada de una hoja de suministro. Los datos cuya constatación se consideran necesarios son los siguientes:

- 1.- Identificación de la central donde se ha fabricado el concreto.
- 2.- Número de serie de la hoja de suministro.
- 3.- Fecha.
- 4.- Matrícula del vehículo de transporte.
- 5.- Nombre del comprador.
- 6.- Designación específica del lugar de suministro (nombre y ubicación).
- 7.- Designación específica de la clase o designación del concreto.
- 8.- Volumen del concreto que compone la carga.
- 9.- Hora de carga.

- 10.- Cantidad de agua inicialmente añadida.
- 11.- Cualquier información adicional que se considere pertinente:
- Tipo, marca y cantidad de cemento.
 - Tipo, marca y cantidad de aditivos.
 - Tipo, marca y cantidad de adiciones minerales.
 - Tamaño máximo del agregado.
 - Peso de la arena y grava incorporados.
 - Toda la información necesaria para poder determinar la cantidad total de agua añadida (Contenido de humedad de los agregados en el momento de su incorporación a la amasada, agua añadida por el operador a la tolva de mezclado).
 - Certificados de idoneidad de los constituyentes empleados.
 - Nombre o firma del representante y del suministrador.

2.10 Compactación.

Debido a la considerable fluidez que generalmente se impone a la masa en fresco de los Concretos de Ultra Alta Resistencia, su puesta en obra puede realizarse más fácilmente que la de los concretos normales. Las principales características de diseño que son habituales en los concretos superfluidificados son:

- Valores de revenimiento iguales o superiores a 160 mm.
- Ausencia de segregación.
- Alta viscosidad.
- Menor tamaño de agregado grueso y suficiente volumen de partículas finas.

Estas características influyen positivamente en la fácil y rápida colocación de los Concretos de Ultra Alta Resistencia.

Las actividades de obra previas a la incorporación del concreto no sufren variación significativa con el uso de este tipo de concreto. Tal vez conviene apuntar la posibilidad de utilizar encofrados menos rígidos y resistentes en el supuesto de utilización de Concretos de Ultra Alta Resistencia debido a la menor energía de Compactación necesaria.

Las operaciones específicas de puesta en obra como: homogeneización, transporte interior, vertido, Compactación y curado, si precisan de alguna consideración en especial que debe tomarse en cuenta.

Es conveniente asegurar al máximo la homogeneidad del concreto previamente a su colocación en obra, por lo tanto resulta necesario la utilización de

camiones-mezcladoras con un dispositivo que impida la descarga del material antes de haber transcurrido el tiempo de amasado mínimo establecido.

Debido a la mayor cohesión existente entre las partículas de sus componentes la segregación del material durante el vertido del mismo es menor. Así mismo bajo condiciones controladas son posibles "alturas de caída" del chorro de descarga de hasta 4.50 mts con poca o ninguna segregación.

El procedimiento habitual de colocación de los concretos superplastificados se realiza mediante bomba. Debido a la naturaleza fluida de la mezcla y a su escaso rozamiento, la presión de bombeo puede ser reducida considerablemente sin afectar al caudal de flujo. La facilidad de bombeo de estos concretos ha quedado patente durante la construcción en el año de 1989 del túnel CAUDERAN NAUJAC en Burdeos (Francia) en el que se alcanzó una longitud máxima de bombeo de 10.50 mts empleando una bomba estacionaria y conducciones de 125 mm de diámetro con agregados de 15 mm de tamaño máximo.

Aun cuando sean los propios condicionantes del concreto y de la obra los que establezcan los criterios y procedimientos de Compactación aplicables, se establecen unas recomendaciones de carácter práctico que se muestran a continuación:

- La energía de Compactación requerida por un concreto superfluidificado es del orden del 25% de la necesaria para un concreto normal con revenimiento comprendido entre 50 y 100 mm.
- El diámetro de la aguja del vibrador no debe exceder de 40 mm y su frecuencia debe ser mayor de 7,000 vibraciones por minuto.
- La profundidad de la vibración está interrelacionada con el espesor de la capa. De todos modos, se han obtenido buenos resultados con una sola penetración en capas de hasta 2 cm de espesor.
- La separación entre puntos de vibración oscila entre 30 y 60 cm.
- El vibrador debe penetrar bajo su propio peso hasta alcanzar el fondo del encofrado o una longitud de cosido de 15 cm dentro de la capa interior, debiendo ser sacado lenta y firmemente. El movimiento repetitivo de arriba hacia abajo debe ser evitado debido a la concentración de arena que causa a su alrededor.
- Con el fin de evitar la segregación y concentración de materiales finos, no se vibrará la armadura ni el encofrado.
- El concreto no debe moverse horizontalmente con el vibrador.

Con el objeto de optimizar la Compactación de elementos superficiales, es habitual una operación de acabado aplicada mediante una regla vibrante que se desliza sobre unos rieles. Esta operación permite eliminar gran parte de las fisuras que pudieran producirse al comenzar el fraguado del concreto.

2.11 Curado.

El elevado calor de hidratación desprendido por el Concreto de Ultra Alta Resistencia como consecuencia de su alto contenido de cemento, implica la necesidad de adoptar procedimientos de curado especialmente efectivos para minimizar los efectos del fenómeno de retracción plástica que experimenta el concreto, a consecuencia de la pérdida de agua por evaporación superficial que se produce durante el proceso de fraguado.

Dentro de este campo existen varias investigaciones realizadas por diferentes investigadores, entre las cuales tenemos las realizadas por ASHVAH⁽⁶⁾ y otros, los cuales indican los procedimientos de curado experimentados por ellos con resultados satisfactorios en el área del Mar Muerto con temperaturas a la sombra de 45°C durante el día y de 25°C durante la noche. Dentro de estos procedimientos se incluían los siguientes:

- Cubrir el concreto colado con láminas.
- Instalar un sistema de tuberías sobre las láminas para asegurar un humedecimiento constante y uniforme.
- Protección del sistema de tuberías mediante una lámina de poliestireno de 400 micras de espesor.
- Instalación de una capa de papel aluminio, sobre la lámina de poliestireno que reflejase las radiaciones del sol. Según los autores, esta capa de papel reduce la temperatura del concreto entre 10°C y 20°C sobre la que se alcanza sin tal protección.

El tiempo necesario para mantener humedecida la superficie del concreto es de al menos 15 días después de haber sido compactada.

Así mismo Aguado y Oliveira⁽⁶⁾ describen el procedimiento de curado aplicado en distintas estructuras de dos pasarelas situadas en las proximidades de la Anilla Olímpica de Barcelona, consistente en mantener un riego por aspersión durante una semana y cubriendo las estructuras con una lámina de plástico. Con ello se manifiesta haber conseguido una especie de cámara climática con alto contenido de

humedad y temperatura superior a la ambiental, que aceleraba el grado de madurez del concreto a las primeras edades.

A pesar del procedimiento de curado empleado, las altas temperaturas detectadas por registradores dispuestos en la masa de concreto (próximas a los 80 °C) y la propia retracción del material, produjeron "pequeñas fisuras en los muros sin ninguna repercusión estructural".

Así mismo el procedimiento de curado, cuan variado fuese resulta no muy complicado siempre y cuando se realicen estudios sobre el control de la temperatura durante el mismo, a fin de evitar y tener las mínimas grietas posibles.

2.12 Control de calidad.

El nivel de calidad exigible a los distintos materiales constituyentes del Concreto de Ultra Alta Resistencia, y a los subsiguientes procesos de dosificación, mezclado, transporte, puesta en obra y curado de dichos concretos, debe extenderse necesariamente, a los diferentes aspectos relacionados con los procedimientos y métodos de control de sus características.

El control de la calidad del concreto habitualmente utilizado en diferentes países, son, cuando menos inapropiados y, en muchas ocasiones ineficaces para conocer la calidad final de cualquier concreto; pero en el caso específico de los Concretos de Ultra Alta Resistencia, resulta inadmisibile este planteamiento.

Así en consonancia con este planteamiento se establece que el laboratorio de ensayos es evidentemente una herramienta indispensable para la realización de un control de calidad, pero no deja de ser una herramienta, que resultara poco útil sino va integrada dentro de una actividad completa de control de calidad.

Este planteamiento conduce en ocasiones, a la obtención de estructuras de concreto con mala calidad, representadas en la documentación de archivo por certificados de ensayos de laboratorio con resultados satisfactorios. En el caso de los Concretos de Ultra Alta Resistencia, incidencias de este tipo pueden ser especialmente peligrosa. Por eso la adopción e implantación de un esquema de control de calidad que cubra todos los aspectos relativos a caracterizaron de materiales, acopios, dosificación, mezclado, transporte y colocación de los Concretos de Ultra Alta Resistencia es de suma importancia. A este respecto se destaca que, durante la construcción del " PACIFIC FIRST CENTER " en Seattle, se constituyo un equipo responsable del control de calidad del concreto integrado por ingenieros representantes de: los proyectistas, el constructor, la empresa independiente del control y el suministrador del concreto. Dicho equipo era responsable del seguimiento y verificación del plan de control de calidad del concreto empleado.

Los resultados finales obtenidos son un claro exponente de la buena coordinación y criterio del equipo (Volumen de concreto = 8000 m^3 , $f_{cm} = 1240 \text{ kg/cm}^2$, coeficiente de variación $V = 1.53 \%$).

Es imprescindible la redacción consensuada de un manual de procedimientos de calidad, en el que se defina con claridad las competencias y responsabilidades de cada una de las partes intervinientes, el procedimiento a seguir en cada caso, y la verificación del seguimiento estricto del plan de control establecido.

Tipos de control.

La elevada capacidad mecánica de los Concretos de Ultra Alta Resistencia suelen conducir, especialmente en piezas comprimidas, a menores cuantías de armadura de las que son habituales en elementos proyectados con concretos convencionales. Este fenómeno se traduce en un mayor grado de participación del concreto en la absorción del esfuerzo de sollicitación de la pieza o elemento estructural. Como consecuencia directa de tal circunstancia, el coeficiente de seguridad global de la pieza es mas sensible a una disminución de la resistencia del concreto.

La importancia de este fenómeno debe tomarse en cuenta a la hora de establecer los Procedimientos de control de estos concretos en los que es necesario definir los objetivos prioritarios:

- Arbitrar los procedimientos necesarios para asegurar al máximo la inexistencia de fallas de calidad del material.
- Establecer un sistema que, en su caso, permita detectar, en el menor tiempo posible, el defecto de producido.

El primero de dichos objetivos implica la necesidad de un CONTROL DE PRODUCCIÓN adecuado, mientras que

el segundo deberá estar definido en el CONTROL DE RECEPCIÓN obligatorio.

Control de producción.

Cumplidas las exigencias relativas a equipamiento, materiales, procesos de mezclado y transporte, la implantación y seguimiento de un procedimiento adecuado de su control de producción proporciona al fabricante del concreto una calidad y oportunidad para poder diferenciar su producto y su servicio; complementariamente, disminuye el riesgo del rechazo del material en el subsiguiente proceso de control de recepción que, a su vez, debe quedar reducido al mínimo imprescindible

Habitualmente existe una cierta confusión sobre el alcance y particularidades de ambos tipos de control. Para algunos,⁽¹⁰⁾ ambos son sinónimos, puesto que son coincidentes en el fin propuesto, buscar la calidad final del producto; mientras que, para otros, son antagónicos, puesto que representan intereses diferentes. Pero para varios investigadores ambos controles no son sinónimos ni antagónicos, sino complementarios y juntos constituyen el entramado básico de la buena calidad.

Control de recepción.

Como complemento al exhaustivo control de producción exigible a los Concretos de Ultra Alta Resistencia, es precisa la implantación de un control de recepción, cuya misión consiste, fundamentalmente en verificar que se alcance la calidad predicha.

En ocasiones, especialmente en aspectos relativos al control de ejecución, el responsable del control de recepción es un profesional calificado.

En los Concretos de Ultra Alta resistencia el desarrollo de resistencias a las primeras edades es muy elevado. Dependiendo del tipo de cemento empleado, es posible alcanzar a los tres días de edad niveles de resistencia próximos al 80% de la correspondiente a 28 días. Ante dicha circunstancia, la implantación de un sistema extraordinariamente ágil en la comunicación de resultados de ensayo se convierte en una necesidad fundamental.

El control de recepción se realiza mediante un muestreo reducido asociado a un nivel de confianza contratado, y es pagado por el propietario de la construcción.

2.13 Consideraciones de diseño estructural.

Los enormes avances en la tecnología del concreto sobre la pasta durante 15 años, ahora elaborados, son posibles para obtener mezclas de concreto con resistencias tan altas, alcanzando una superioridad a 1000 Kg/cm^2 en varios sitios de Norte América. Dichos concretos se utilizan en estructuras intrigantes, surgiendo el problema de la aplicación de procedimientos de diseño tradicional desarrollado por concretos de resistencia normal.

Respuesta a las deformaciones.

La respuesta del concreto a una compresión uniaxial es determinada por medio de cilindros de concreto de 150 mm de diámetro y 300 mm de largo en un lapso de 2 a 3 minutos.

Una expresión conveniente, que con exactitud muestra la forma del creciente ramo de una curva de deformaciones del concreto, era propuesta por Popovics⁽¹¹⁾ en el año de 1973, la cual es la siguiente:

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}'_c} \cdot \frac{\eta}{\eta - 1 \left(\frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}'_c} \right)^\eta} \quad (1)$$

donde:

f_c = Fuerza de compresión, en Kg/cm².

f'_c = Resistencia del cilindro, en Kg/cm².

\mathcal{E}_c = Deformaciones del concreto.

\mathcal{E}'_c = Esfuerzo cuando f_c alcanza a f'_c .

η = Factor de adecuación de la curva, cuando η es elevado la creciente de la curva es propiamente más lineal.

En 1987 Thorenfeldt, Tomaszewicz y Jensen⁽¹²⁾ informaron que el creciente ramo de la curva de deformación de la expresión descrita por Popovics no es elaborada de una caída bastante firme después de la cima de la curva de este tipo de concretos. para incrementar la decaída avanzada de la cima, sugirieron la adición de un factor κ , así aquella ecuación 1 paso a ser:

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}'_c} \cdot \frac{\eta}{\eta - 1 \left(\frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}'_c} \right)^\eta} \quad (2)$$

donde κ es igual a 1 cuando $\frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}'_c}$ es menor que 1; y κ es un número mayor que 1 cuando $\frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}'_c}$ excede el valor de 1.

Collins y Porasz⁽¹³⁾ y Collins y Mitchell⁽¹⁴⁾ sugirieron que cuando $\frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}'_c}$ es mayor que 1 el valor de κ es el siguiente:

$$\kappa = 0.67 + \frac{f'_c}{62} \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (3)$$

y el valor de η :

$$\eta = 0.8 + \frac{f'c}{17} \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (4)$$

La ecuación 2 forma las relaciones entre $f'c$ y $\mathcal{E}'c$ en una función de cuatro constantes: $f'c$, $\mathcal{E}'c$, η y K ; estas cuatro constantes pueden ser determinadas por el cilindro en la curva de deformaciones. Así mismo, en muchas situaciones de diseño únicamente la resistencia del cilindro ($f'c$) es conocida, siendo esta necesaria para obtener los otros tres parámetros. Para el peso normal del concreto η puede ser determinada por la ecuación 4 y K obtenida de la ecuación 3. En dado caso que la inclinación inicial $\mathcal{E}'c$ de la curva de deformaciones sea conocida o pueda ser apreciada, el esfuerzo en la cima de las fuerzas $\mathcal{E}'c$ puede ser establecido por:

$$\mathcal{E}'c = \frac{f'c}{\mathcal{E}c} \frac{\eta}{\eta - 1} \quad (5)$$

donde:

$\mathcal{E}c$ = Módulo de elasticidad del concreto.

En un tiempo $\mathcal{E}c$ dependía fuertemente en la rigidez de los agregados que han sido usados, ahora se sugiere para $\mathcal{E}c$:

$$\mathcal{E}c = 3320\sqrt{f'c} + 6900 \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (6)$$

El resultado de la curva de deformaciones por encima de las ecuaciones para un rango de resistencia del concreto son mostrados en la figura 1.

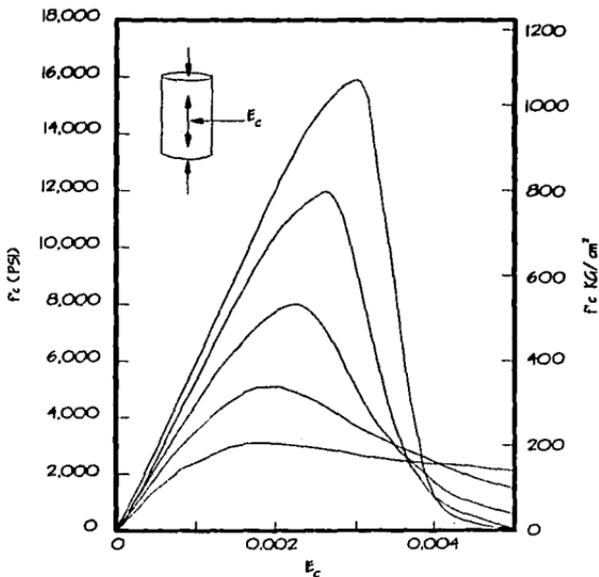


FIG.1 INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO (CURVA DE DEFORMACIONES).

Capacidad de columnas.

Los concretos reforzados en columnas son típicamente diseñados usando cálculos de momentos de carga axial en diagramas de interacción. Un mencionado diagrama puede ser determinado porque el esfuerzo en el concreto varía linealmente a través de la sección, este esfuerzo en el refuerzo es igual para el esfuerzo en el concreto circundante y por conocimiento en las relaciones de deformaciones para el concreto y el refuerzo. en la figura 2 se ilustra la influencia de la resistencia del concreto en el diagrama de interacción de momento de carga axial. Estos diagramas de interacción estuvieron obtenidos por investigaciones de momento máximo que deberían ser resistentes para varios niveles de carga axial.

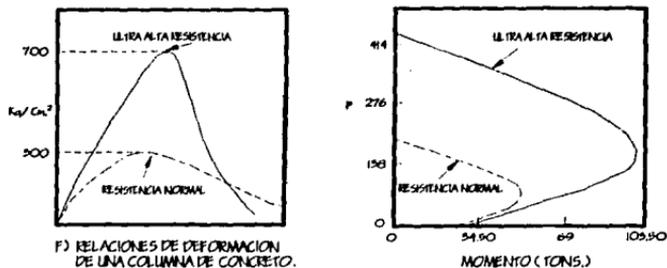
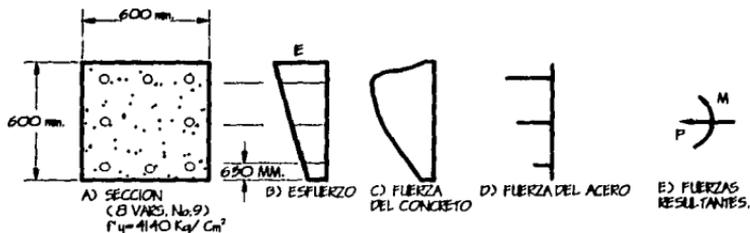


FIG.2 PRONOSTICACION DE UNA CARGA AXIAL EN DIAGRAMAS DE INTERACCION DE MOMENTO.

En 1934 Richart y Brown⁽¹⁵⁾ determinaron que la resistencia del concreto en una columna cargada axialmente es aproximadamente de $0.85 f_c$, en que f_c es la resistencia a la compresión del cilindro. El factor de 0.85 ha sido atribuido para la diferencia en tamaño adoptado entre el refuerzo de la columna de concreto y el cilindro de concreto, para diferencias en el vaciado de concreto, vibrado y curado, y para diferencias en proporción de cargas, ya que las columnas son cargadas más lentamente que los cilindros.

Así mismo la carga última de una columna armada o zunchada cargada axialmente es obtenida por la siguiente expresión:

$$P = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (7)$$

donde:

A_c = Área de la sección transversal de la columna.

A_s = Área total del acero en la sección longitudinal.

f_s = Límite de fluencia del acero.

Un estudio clásico de pruebas realizadas en los laboratorios de la Asociación de Cemento Portland (PCA), estuvieron conducidos por Hognestad, Hanson y Mc Henry⁽¹⁶⁾ en el plano de columnas de concreto sujetas por variación lineal de esfuerzo, para investigar las características de las deformaciones de las columnas de concreto. Estas pruebas se realizaron tiempo después en columnas teniendo altas resistencias en concretos por Karr, Hanson y Capell.⁽¹⁷⁾

Las pruebas estuvieron enfocadas en la determinación de fuerzas en los factores de bloques, K_1 , K_2 , y K_3 , mostrados en la figura 3.

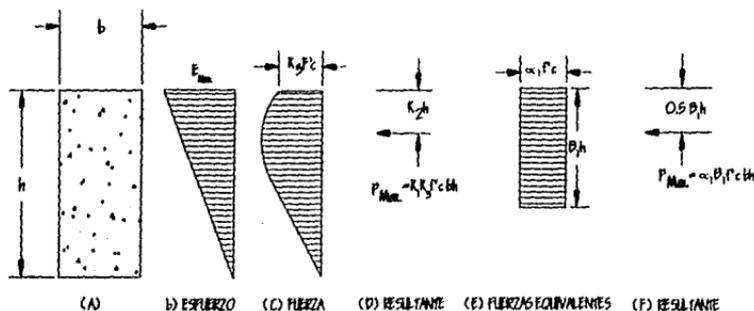


FIG.3 BLOQUES DE FACTORES DE FUERZAS.

Estos autores utilizaron el símbolo K_3 en lugar de C ($C=0.85$) por la relación de la máxima fuerza obtenida (carga última) en columnas de concreto para resistencia de cilindros. Para estas pruebas el factor K_3 era fundamentalmente utilizado con un valor de 1.0 en lugar de 0.85.

Las máximas fuerzas axiales ($P_{máx.}$) pueden ser resistidas por una sección rectangular con una variación lineal del esfuerzo, dependiendo de la forma de las relaciones de deformación. Si la columna de concreto es linealmente elástica y falla a

una fuerza de $K_3 f_c$, la fuerza máxima debería ser de $0.5 K_3 f_c bh$. Por otro lado, si la columna de concreto muestra una parábola en la curva de deformaciones máxima en $K_3 f_c$, la fuerza máxima debería ser de $0.75 K_3 f_c bh$. Las pruebas realizadas por la Asociación de Cemento Portland muestran esa máxima fuerza variada de alrededor de $0.80 f_c bh$ para 210 Kg/cm^2 de resistencia del concreto cerca de $0.58 f_c bh$ para 1030 Kg/cm^2 mostrados en la figura 4. La figura 4 también muestra pronosticaciones de capacidad de las pruebas realizadas por la Asociación del Cemento Portland basadas en la suposición de que K_3 es igual a 1.0, y el concreto en estas columnas es una relación de deformaciones dadas por la ecuación 2

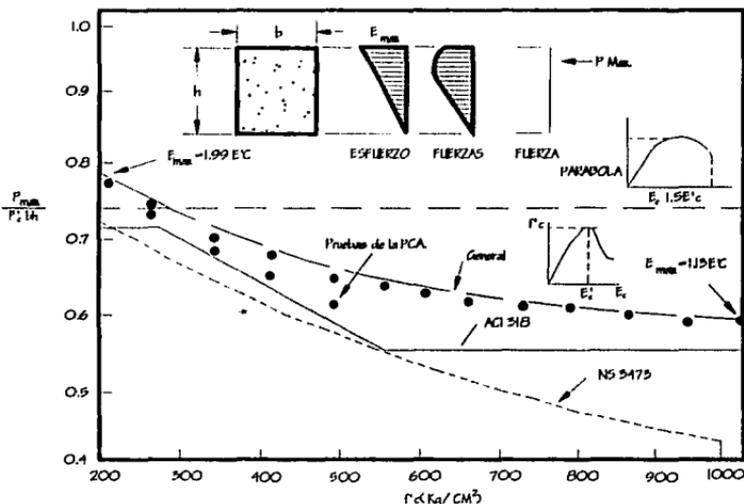


FIG.4 INFLUENCIA DE LA SUPUESTA CURVA DE LA DEFORMACION DEL CONCRETO EN CAPACIDAD DE LA CARGA DE UNA SECCION DE CONCRETO CARGADA AXIALMENTE.

En la figura 3e se muestra un block rectangular de fuerzas equivalentemente similar al block de fuerzas manejado por el código del ACI (American Concrete Institute). Aquí en la figura la fuerza uniforme es tomada como $\alpha_1 f_c$ y la altura del rectángulo es igual a $\beta_1 h$. Los valores de α_1 y β_1 deberían ser seleccionados si la máxima fuerza axial es igual en la figura 3c y 3e, y la línea de acción de la fuerza resultante de la máxima fuerza axial es la misma, en ambos casos:

$$\alpha_1 \beta_1 = K_3 K_1$$

$$0.5 \beta_1 h = K_2 h$$

Considerando la diferencia entre las formas de los blocks de fuerza en la figura 3c y 3e es inverosímil que sea una determinación igual a K_3 . En el código del ACI de blocks rectangulares de fuerzas se define como:

$$\alpha_1 = 0.85 \quad (8)$$

$$\beta_1 = 0.85 \quad \text{para } f_c \leq 300 \text{ Kg/cm}^2.$$

$$\beta_1 = 0.85 - (f_c - 30) 0.008 \quad \text{para } 300 < f_c < 550 \text{ Kg/cm}^2 \quad (9)$$

$$\beta_1 = 0.65 \quad \text{para } f_c \geq 550 \text{ Kg/cm}^2$$

El parámetro de fuerzas en el block $\alpha_1 \beta_1$, obtenido por la ecuación 8 y 9 es representado gráficamente como la línea sólida en la figura 4.

El símbolo $K_3 f_c$ se desearía ser usado para denotar la fuerza máxima cuando de acuerdo con la realidad una curva de deformaciones es usada, como así mismo la ecuación 2 y los símbolos $\alpha_1 f_c$ desearían denotarse en la fuerza uniforme en un block rectangular de fuerzas.

La curva designada como NS 3473 mostrada en la figura 4, da los resultados de aquellas fuerzas máximas que resultan por el uso de las relaciones de deformación recomendadas por la Norma Noruega para Estructuras de Concreto editada en 1985⁽¹⁶⁾. Esta Norma es de particular interés porque ha sido muy usada en el diseño de plataformas petroleras Offshore con Concretos de Ultra Alta Resistencia. La curva NS 3473 recomienda curvas de deformaciones de concreto (Fig 5), en donde el grado del concreto es denotado por la letra "C" seguido por la resistencia del cubo en Kg/cm². Para cada grado de concreto la norma da la resistencia correspondiente al cilindro (f_c), como conveniente, como así mismo la resistencia a la compresión en el sitio que es la máxima resistencia esperada por el concreto en la estructura. La resistencia en el sitio en estas curvas es considerada menor que el f_c , que funciona tan bajo como 0.655 para 940 Kg/cm² de resistencia del concreto. Esto es, el código Noruego asume un valor efectivo de K_3 que varía con la resistencia. Las resistencias que utilizan el código Noruego son considerablemente más bajas que

aquellas obtenidas utilizando el código del ACI, pero superando o igualando la falla de la prueba de carga. La baja falla de carga de estas columnas es parecida para ser asociada con la formación de hendiduras de grietas en la superficie plana de las varillas del refuerzo longitudinal, obteniendo como resultado el descantillamiento de la cubierta de concreto en la superficie más altamente cargada (Fig. 6). En otras veces, la cubierta se habría descantillado, por la sección efectiva reducida no resistiendo la carga aplicada.

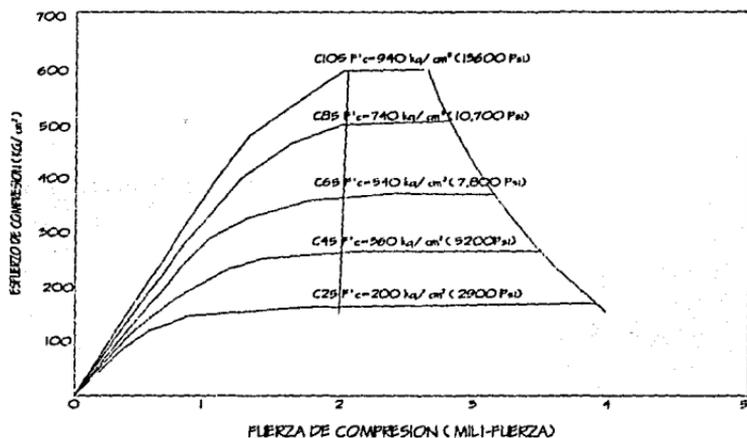


FIG.5 CURVAS DE DEFORMACION DEL CONCRETO RECOMENDADAS POR LA CURVA N5 3-473

Las curvas de interacción de momento de carga axial pueden ser predichas usando la curva de deformación general descrita por la ecuación 2.

Para una prueba de columna en particular el valor de K_3 correspondiente a una curva práctica de deformaciones debería ser establecida semejante a la capacidad, igual a las cargas observadas de falla. Los valores de K_3 son obtenidos por la siguiente expresión:

$$K_3 = 0.60 + \frac{10}{f'_c} \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (10)$$

pero $K_3 \leq 0.85$

La figura 7 es un ejemplo del uso del coeficiente K_3 en pronosticación con la respuesta de un Concreto de Ultra Alta Resistencia en columnas sujetas a una compresión concéntrica.

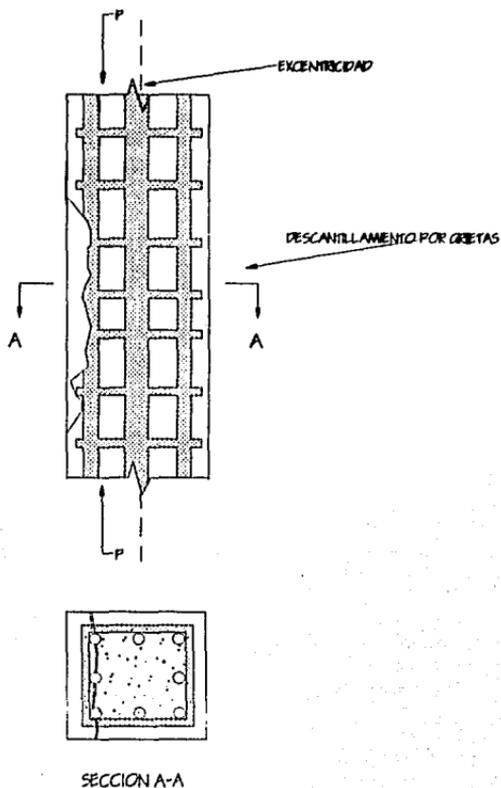


FIG.6 FALLA DE UNA COLUMNA DE CONCRETO DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CARGADA EXCENTRICAMENTE.

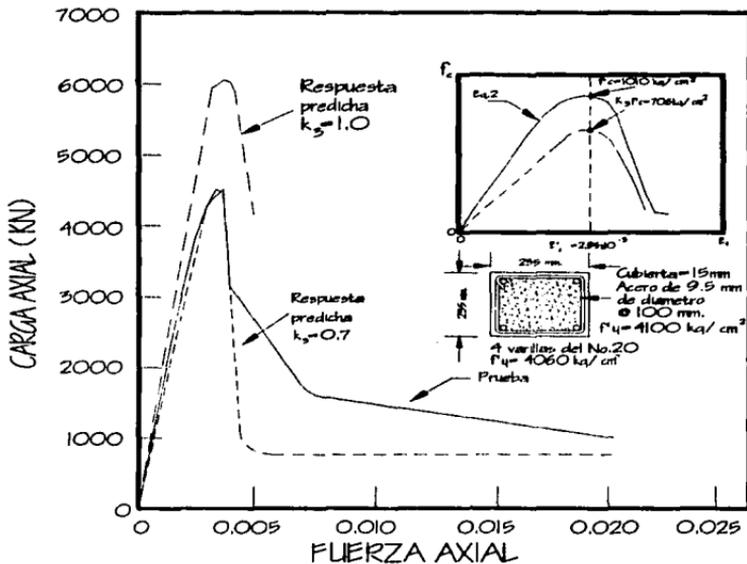


FIG. 7

Refuerzo mínimo y ductilidad en elementos a tensión y flexión.

El código común del ACI prescribe el mínimo seguimiento de cantidades de refuerzo:

a). - Para losas y bases:

$$A_{s,min} = 0.0018A_g \quad (11)$$

Si el refuerzo de grado 60 es usado:

$$A_{s,min} = 0.0018 A_g \frac{400}{f_y} \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (12)$$

Si el refuerzo con un límite de fluencia excede de 4140 kg/cm², es usado:

b).- Para otros elementos a flexión

$$P_{min} = \frac{1.40}{f_y} \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (13)$$

donde:

$$\begin{aligned} A_{s,min} &= \text{Área mínima del refuerzo.} \\ A_g &= \text{Área bruta del concreto.} \\ f_y &= \text{Límite de fluencia del acero.} \\ p &= \frac{A_{s,min}}{bd} \end{aligned}$$

Estos límites tradicionales son deseados para asegurar estos elementos queriendo tener un nivel mínimo de ductilidad y no dejando en una manera frágil la formación de las primeras grietas. En estos tiempos, las cantidades tradicionales de refuerzo mínimo son apropiadas para concretos de resistencia normal, y no siendo suficiente para Concretos de Ultra Alta Resistencia.

Las consecuencias de proporcionar una cantidad demasiada pequeña de refuerzo es ilustrada en la figura 8, que muestra la respuesta de la carga de deformación de un elemento de concreto reforzado probado a tensión por Battista.⁽²⁰⁾ Este elemento de Concreto de Ultra Alta Resistencia de 860 Kg/cm² alcanza esta máxima carga cuando la primera grieta se forma. El espécimen que contiene una relación de refuerzo de 0.002, falla por ruptura del acero atravesando la grieta con una carga considerable por debajo de la carga de agrietamiento. Pero el esfuerzo en la varilla era concentrado en una grieta, el esfuerzo promedio del espécimen de concreto reforzado era menor que 4% cuando la varilla llegó a la ruptura, al igual que las barras de la varilla expuestas a un esfuerzo de ruptura de más de 14% en una prueba normal de tensión.

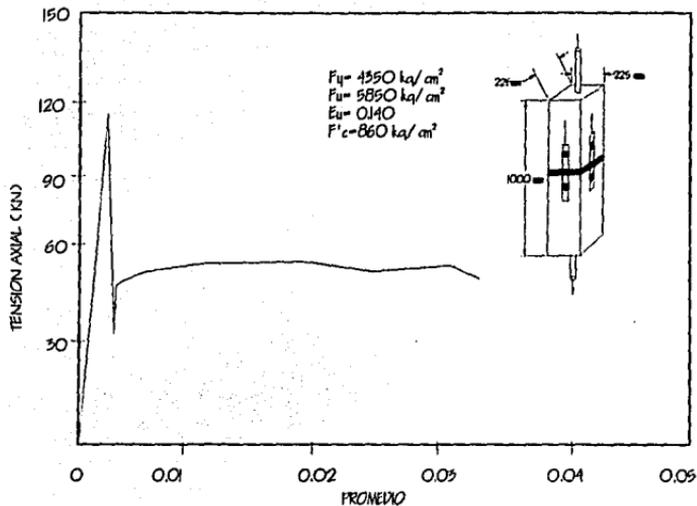


FIG. 8 RESPUESTA DE LA CARGA DE DEFORMACION DE UNA MUESTRA A TENSION PROBADA POR BATTISTA.

Para evitar este tipo de respuesta mostrado en la figura 8, la siguiente expresión es necesaria para asegurar aquella última resistencia excedida del refuerzo, y la resistencia de agrietamiento del concreto.

$$A_s f_s \geq A_c f_c \quad (14)$$

por lo tanto

$$P_{min} = \frac{f_c}{f_s} \quad (15)$$

Si el esfuerzo de agrietamiento en una tensión directa es asumido para ser (0.33 f'_c en Mpa.), el esfuerzo en el acero en una grieta ($f_{t,\sigma}$) debería ser:

$$f_{t,\sigma} = \frac{0.33\sqrt{f'_c}}{p} \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (16)$$

El mínimo refuerzo para especímenes en flexión, debería asegurar el avanzado agrietamiento de la resistencia a la flexión en el mínimo momento excedente de agrietamiento, esto es:

$$M_n \geq M_{cr} \quad (17)$$

Para secciones rectangulares, asumiendo un esfuerzo de flexión de agrietamiento de 0.63 f'_c \mathcal{E}'_c en Mpa, este requerimiento resulta en una relación de mínimo refuerzo acerca de:

$$p_{min} = 0.133 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (18)$$

Para asegurar en la pasta agrietada una resistencia excedente el momento, de agrietamiento, del comité del ACI 363⁽²¹⁾ propone unas recomendaciones mínimas, entre las cuales:

$$p_{min} = 0.224 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} \geq \frac{1.38}{f_y} \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (19)$$

Pero para elementos de Concreto de Ultra Alta Resistencia el comité del ACI 363 recomienda una área mínima de refuerzo de:

$$p_{min} = 2.7 \frac{\sqrt{13900}}{70750} = 0.00500$$

$$A_{s,min} = 0.00500 \times 1000 \times 124 = 620 \text{ mm}^2$$

Resistencia al esfuerzo cortante.

En el código del ACI la resistencia nominal al esfuerzo cortante de vigas es especificada como:

$$V_n = V_c + V_s \quad (20)$$

donde para elementos no comprimidos, y no sujetos a una carga axial,

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} b_w d \quad \text{en unidades de Mpa.} \quad (21)$$

Este comité del ACI 363 ha sugerido un margen de seguridad contra la falla al esfuerzo cortante para vigas designando por la ecuación 21 y es menor este margen para vigas de Concreto de Ultra Alta Resistencia que para vigas de concreto de resistencia normal. Así mismo el margen de seguridad contra la falla al esfuerzo cortante en vigas es la disminución de estribos, como el incremento en el tamaño de la viga.

2.14 Control de la temperatura en C.U.A.R. macizo.

Para poder controlar esta temperatura se realizaron pruebas en vigas de Concreto de Ultra Alta Resistencia aplicadas a un proyecto reciente en Toronto.

Estas vigas macizas eran necesarias para soportar un edificio de concreto de gran altura apoyadas sobre el área comercial de la planta baja. Estas vigas transfieren las cargas relativamente cerca de las columnas de tabloncillos ensamblados, apropiadas para un claro de escalones de caracol localizadas mas abajo del espacio comercial. Las vigas de concreto reforzado fueron diseñadas usando Concretos de Ultra Alta Resistencia; cada una con dimensiones de sección transversal de 1.37 mts de ancho por 2.80 mts de alto.

Control de la medición.

Una muestra de la sección de una viga transferida era moldeada fuera de su sitio para determinar los efectos de las grandes dimensiones y las especificaciones de Ultra Alta Resistencia. Se colocaron pares

termoeléctricos del centro de la masa de concreto al centro de la superficie de arriba, como así mismo al centro de la superficie de abajo.

Los extremos de la cimbra fueron aislados con 50 mm (2") de unicel para simular la continuidad de la longitud completa de la viga, así mismo los lados de la cimbra y la superficie de arriba de la viga muestra, fueron cubiertos con una manta aislante para minimizar los efectos esperados de fluctuación a una temperatura ambiente.

El monitoreo del par termoeléctrico indicó el desarrollo de una temperatura máxima de 68.50°C ocurrido a 33 horas después de la colocación del concreto. La máxima temperatura diferencial (no necesariamente ocurre en el tiempo de la máxima temperatura) era de 37.50°C. La máxima temperatura y máxima temperatura diferencial obtenidas exceden los límites de especificación. Además el alto contenido de cemento, que en un determinado tiempo libera una temperatura de 19°C, es un factor que contribuye en la máxima temperatura

Al encontrarse aislado el concreto no presentó una resistencia a la tensión de ruptura (grietas).

Con la obtención de estos datos se formularon los siguientes parámetros:

- La longitud corta de la muestra en realidad no era representativa de las vigas actuales.
- Aún cuando los extremos de la sección de la viga muestra estaban aislados para simular la continuidad de la longitud total de la viga, los

efectos de la generación de calor de la adyacente continuidad del concreto en las vigas no estaban presentes.

-La relativamente ligera, integrada y moldeada losa de piso, que puede sufrir por algunas fuerzas térmicas agrietamientos, no se tomo en cuenta.

Debido a estas consideraciones se redujo el proporcionamiento de la cantidad de materiales de la mezcla de concreto; donde de 450 Kg/m³ de cemento Portland normal se redujo a 420 Kg/m³, de 110 Kg/m³ de ceniza volante tipo F y vapor de sílice a 103 Kg/m³, la relación agua-cemento de 0.28 aumento a 0.30 y la medida del agregado máximo era aumentada de 10 mm (3/8") a 20 mm (3/4").

El más grande significado del diseño de esta nueva mezcla es, el de permitir un incremento admisible de un gradiente de temperatura conforme a las consideraciones dadas por Bamforth, las cuales están basadas en las propiedades térmicas de los agregados y grados de restricción. Estas recomendaciones respecto a las temperaturas diferenciales del concreto, indican que las colas, a menudo dan muchas veces el valor de 20°C generado por la grava agregada al concreto. Para concretos elaborados con un agregado que tiene un bajo coeficiente de expansión térmica y una capacidad superior de esfuerzo, este valor es conservativo. La grava agregada al concreto tiene un coeficiente térmico en la región, de $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, y una capacidad de esfuerzo a la tensión de 70×10^{-6} , mientras que el agregado de piedra caliza, tiene un coeficiente térmico de aproximadamente $8.60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ y una capacidad de esfuerzo a la tensión de 90×10^{-6}

aproximadamente 8.60×10^6 $^{\circ}\text{C}$ y una capacidad de esfuerzo a la tensión de 90×10^6

Una guía más amplia en el análisis térmico de las secciones gruesas del concreto era obtenida por un informe de Thurston, Priestly y Cooke, sobre la liberación de calor de hidratación y transferencia de calor en la superficie. Un estudio completo sobre estas consideraciones fue realizado por Gordon E. Brown, investigador del concreto en Toronto. Estos estudios están guiados en la adopción y proposición de un gradiente máximo de temperatura de 30°C con una máxima temperatura de 60°C controlados por medio de una cubierta aislante.

Para poder obtener datos más amplios de la temperatura en el concreto, y poder controlarla, se colocaron pares termoelectrónicos en cuatro secciones de vigas diferentes, para ser así monitoreados. El concreto fue colocado durante un ambiente de baja temperatura, la mezcla era calentada previamente a una temperatura liberada de 15 a 16°C . Las condiciones ambientales alrededor del área de construcción era de 14 a 23°C estando en el rango de temperatura.

Lectura de Temperaturas.

A cada una de las secciones se le instalaron 7 pares de termoelectrónicos en orden, para obtener la lectura de las temperaturas, la ubicación de estos pares era arriba, abajo, y al centro de la viga (Fig.1).

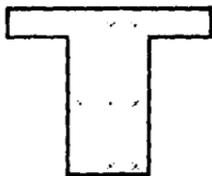


FIG. 1 POSICION DE LOS PARES
TERMOELECTRICOS EN LA SECCION
DE LA VIGA.

La mas extrema condición de temperatura del concreto ocurrió en el centro de la sección de la viga. La temperatura máxima en el centro de esta sección fue registrada a 62.6°C aproximadamente, después de 53 horas de la colocación del concreto. Mientras que las otras secciones monitoreadas registraron una temperatura interna que se conservaba por debajo de los 60°C .

El gradiente máximo de la temperatura en el centro era notablemente de 20.60°C , al mismo tiempo el gradiente de temperatura de los pares termoelectrónicos de la superficie, era solamente de 9.10°C .

En la figura 2 se muestra un análisis simplificado de las lecturas de tres notables pares termoelectrónicos.

El monitoreo continuo hasta que la temperatura del concreto de las superficies exteriores de la viga se encontraron dentro de 12°C .

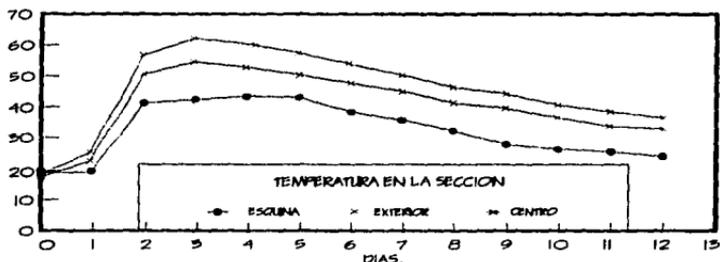


FIG. 2 LECTURA DE LA TEMPERATURA EN TRES POSICIONES.

2.15 Concreto de Ultra Alta Resistencia aligerado.

Para uso estructural del concreto aligerado, una densidad del concreto es siempre mas importante que la resistencia. Una disminucion de la densidad con el mismo nivel de resistencia permite el ahorro absoluto de la carga para el diseño estructural y cimentación.

Desde 1890 las investigaciones sobre el Concreto de Ultra Alta Resistencia Aligerado han sido reformadas gracias al rápido desarrollo de la tecnología del concreto durante los años recientes, donde ahora el Concreto de Ultra Alta Resistencia puede ser fácilmente elaborado por medio del uso de aditivos químicos y adiciones minerales.

Los primeros estudios sobre este tipo de concreto fueron realizados por Shildeler quien reporto la producción y propiedades del concreto aligerado con una resistencia a 28 días superior a 580 kg/cm^2 . Tiempo después Hanson y Capell reportaron las características de deformación de un concreto aligerado con una resistencia superior a 860 kg/cm^2 ; ambos estudios estuvieron basados en mezclas sin revenimiento.

Para obtener datos mas amplios sobre este tipo de concreto se realizaron experimentos y estudios detallados.

Experimentos.

La composición de nueve mezclas de concreto elaboradas y probadas son

mostradas en la tabla 1. El contenido de cemento varia de 400 a 600 kg/m³ de concreto. El humo sílice era usado en una dosificación de 9.0% como sustitución del cemento. La relación agua-cemento vario de 0.28 a 0.44. En las mezclas de 5 a 9 únicamente se utilizaron agregados finos ligeros, mientras que en las mezclas 1 a 4, casi el 40% de los agregados finos eran substituidos por arena natural. El agregado grueso ligero era usado en todas las mezclas. Cinco diferentes tipos de agregados ligeros eran usados en orden para desarrollar concreto con diferentes niveles de densidad. Así mismo, se utilizo un 4% de una naftalina, basada en un agente dispersor y 5% de un carboxílico y ácido hidroxílico basado en un retardante, todo esto por peso de materiales cementantes.

Tabla 1 Proporcionamiento de mezclas de Concreto de Ultra Alta Resistencia aligerado.

Numero de mezcla	Cemento (kg/m ³)	Humo Sílice (kg/m ³)	Relación Agua-Cemento	Proporción de mezcla. C: FA ^a :CA ^b (Volumen)	Tipo de agregado aligerado	Arena Natural (vol. % de FA)
1	600	60	0.28	1:1.02:1.92	Liapor 8	46.8
2	500	50	0.34	1:1.46:2.30	Liapor 8	39.4
3	400	40	0.43	1:2.15:2.88	Liapor 8	33.5
2	500	50	0.34	1:1.46:2.309	Liapor 8	39.4
4	550	0	0.36	1:1.37:2.09	Liapor 8	38.2
2	500	50	0.34	1:1.46:2.30	Liapor 8	39.4
5	500	50	0.36	1:1.46:2.30	Liapor 8	0
5	500	50	0.36	1:1.46:2.30	Liapor 8	0
6	500	50	0.37	1:1.46:2.30	Liapor 7	0
7	500	50	0.40	1:1.46:2.30	Liapor 8	0
8	500	50	0.36	1:1.46:2.30	Leca	0
9	500	50	0.44	1:1.46:2.30	Lyttag	0

^aAgregado fino

^bAgregado grueso

C=Cemento

Un cemento Portland de alta

resistencia Noruego era usado; las propiedades de este cemento son mostradas en la tabla 2. Así mismo, las propiedades del humo sílice son mostradas en la tabla 3.

Tabla 2. Características del cemento.

Composición Química	Porcentaje (%)	Composición Mineral	Porcentaje (%)	Propiedades Físicas	
SiO ₂	22.30	C ₃ S	52.7	Superficie específica	3922 cm ² /g
Al ₂ O ₃	3.74	C ₂ S	24.2	Consistencia Normal	27.7 % W
Fe ₂ O ₃	2.75	C ₃ A	5.3	Tiempo de Fraguado	
CaO	83.90	C ₄ AF	8.4	Inicial	135 min.
MgO	1.97			Final	189 min
SO ₃	3.11			Resistencia a la Compresión	
K ₂ O	0.64			1 día	224 kg/cm ²
Na ₂ O	0.26			3 días	399 kg/cm ²
Libre de Limos	1.342			7 días	508 kg/cm ²
Bajo en ignición	0.96			28 días	620 kg/cm ²
				56 días	674 kg/cm ²
				Resistencia a la Flexión	
				1 día	409 kg/cm ²
				3 días	616 kg/cm ²
				7 días	745 kg/cm ²
				28 días	853 kg/cm ²
				56 días	889 kg/cm ²

Tabla 3 Propiedades del humo sílice.

Composición Química	Porcentaje (%)
SiO ₂	91.70
Al ₂ O ₃	0.20
Fe ₂ O ₃	1.40
MgO	1.40
CaO	0.46
Cl	0.07
C	1.00
S	0.091
H ₂ O	0.44
Bajo en ignición	1.10 g
Superficie Específica	19.8 m ² /g

Una arena natural en dos porciones (0.0 - 0.5 y 0.5 - 2.0 mm) era usada en combinación con los cinco diferentes tipos de agregados ligeros. En la tabla 4 se observa la densidad de las partículas y la absorción de los agregados después de un tiempo de 30 minutos de saturación.

Tabla 4. Densidad y absorción de agua de varios agregados ligeros.

Tipo de agregado	Material	Densidad de la partícula (g/cm ³)	Absorción de agua (%de masa seca)
Liapor 8	Arcilla expansiva	1.37	8
Liapor 7	Arcilla expansiva	1.25	9
Liapor 6	Arcilla expansiva	1.07	12
Leca	Arcilla expansiva	1.30	12
Lytap	Humo sílice	1.44	13

Para todas la mezclas tres diferentes porciones de agregados ligeros fueron usadas (4.0 - 8.0, 0.5 - 2.0 y 0.0 - 0.5), de las cuales las porciones de 0.0 - 0.5 y 0.5 - 2.0 fallaron por compresión. En la figura 1 se muestra el gradiente de la curva para varias mezclas. Todos los agregados ligeros fueron secados a 105°C con un peso constante antes de ser usados.

Para evitar un bajo revenimiento temprano, el agregado grueso era premezclado con aproximadamente la mitad de la cantidad total de agua, por un tiempo de 10 minutos; entonces el cemento, humo sílice y agregados finos, simultáneamente con el resto del agua, el agente dispersor y el retardante fueron adicionados y mezclados por otros 5 minutos.

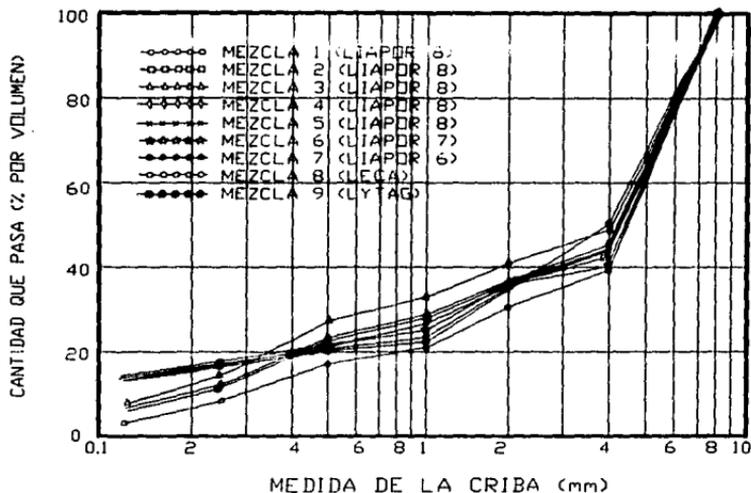


FIG.1 GRADIENTE DE LAS CURVAS DEL AGREGADO

La densidad y contenido de aire del concreto fresco fueron medidos inmediatamente después del mezclado, donde el revenimiento era medido después de 10, 30 y 60 minutos.

Los especímenes de concreto fueron vaciados en moldes de acero y compactados en una mesa vibratoria. Las muestras fueron cubiertas con yute húmedo por 24 horas antes de ser demolidas. Después de la demolición las muestras fueron mantenidas en agua a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ hasta que llegara el momento de probarlas.

La densidad del concreto seco en horno era obtenida por medio del secado de especímenes a 28 días a una

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

temperatura de 105°C por un peso constante.

La resistencia a la compresión era probada en cubos de 100 mm., a edades de 3, 7, 28, 90 y 360 días; que eran en promedio de dos muestras.

Propiedades del concreto fresco.

Las propiedades del concreto fresco son resumidas en la tabla 5. Como la densidad de las partículas de los agregados aumento de 1.07 a 1.44, la densidad de varias mezclas incremento de 1595 a 1880 kg/m³. El incremento del contenido de cemento también incrementa la densidad del concreto fresco, pero este efecto no es tan significativo como la densidad de los agregados. La substitución de 40% de agregado fino ligero por arena natural también incremento la densidad del concreto fresco de 1800 a 1835 kg/m³.

El contenido de aire de varias mezclas se clasifico de 3.0 a 4.4%. sin embargo, después el contenido de aire era medido por el método de presión. En la tabla 5, se muestran todas las mezclas de concreto teniendo una alta fluidificación con un rango de valores de revenimiento de 235 a 275 mm después de 10 minutos. Aquí no son significativamente bajos los revenimientos de 10 a 60 minutos después del mezclado, demostrando que los 10 minutos de premezclado con agua reducen el problema del revenimiento bajo a edades tempranas debido a la absorción de agua.

Tabla 5. Propiedades del concreto fresco.

No de Mezcla	Densidad (kg/m ³)	Contenido de aire (%)	Revenimiento (mm) 10 min.	Revenimiento (mm) 30 min.	Revenimiento (mm) 60 min.
1	1865	3.6	245	255	245
2	1835	3.0	275	255	270
3	1750	3.5	250	210	200
2	1835	3.0	275	255	270
4	1815	3.3	270	260	270
2	1835	3.0	275	255	270
5	1800	3.1	255	255	245
5	1800	3.1	255	255	245
6	1710	3.7	250	245	230
7	1595	4.4	245	250	245
8	1750	3.8	235	230	220
9	1860	4.0	265	235	240

Propiedades del concreto endurecido.

La densidad y resistencia a la compresión son resumidos en la tabla 6. Para varias mezclas la densidad del concreto varía de 1435 a 1735 kg/m³. Así mismo la resistencia a la compresión no es muy afectada por el incremento del contenido de cemento o por la sustitución de cemento con humo silíceo, ni por el uso de arena natural como una sustitución parcial de arena ligera. Los resultados demuestran claramente que este tipo de agregado ligero es el principal factor controlable de la resistencia a la compresión. Para Liapor 8 (mezcla 5), Lytag (mezcla 9), Leca (mezcla 8), Liapor 7 (mezcla 6) y Liapor 6 (mezcla 7) un nivel de resistencia aproximadamente superior a 1000 - 1050, 850 - 900, 800 - 700 - 750 y 550 - 600 kg/cm² eran observados respectivamente.

Para concretos con agregados de alta densidad semejante a Liapor 8, el nivel de resistencia más alto del concreto era alcanzado a una edad temprana debido a la limitación de los agregados.

Después de 28 días la fractura del concreto generalmente contribuye completamente a los agregados, para todas las mezclas excepto la mezcla 4, que estaba basado en un agregado Liapor 8 sin humo sílice. Para este concreto la fractura contribuye en cierto modo alrededor del agregado.

Tabla 6. Densidad y resistencia a la compresión del concreto.

No. de mezcla	Densidad (kg/m ³)			Resistencia a la Compresión del Concreto (kg/cm ²)				
	Fresco	Húmedo a	Seco en horno	3 días	7 días	28 días	90 días	360 días
1	1865	1880	1735	819	989	1024	1032	1096
2	1835	1875	1690	725	842	918	907	988
3	1750	1800	1645	655	773	934	893	960
2	1835	1875	1690	725	842	918	907	988
4	1815	1870	1735	653	740	845	881	945
2	1835	1875	1690	725	842	918	907	988
5	1800	1805	1635	789	872	980	947	1048
5	1800	1805	1635	789	872	980	947	1048
6	1710	1715	1570	658	720	744	768	729
7	1595	1615	1435	526	544	573	590	624
8	1750	1765	1625	667	759	815	851	858
9	1880	1885	1710	636	768	884	918	904

*Concreto curado en agua por 28 días

Para el Concreto de Ultra Alta Resistencia aligerado el modulo elástico del mortero aglomerante es generalmente mas alto que el de los agregados. Si la adherencia es bastante firme, y la resistencia a la tensión del mortero es mas grande que el agregado, el esfuerzo a la tensión en el agregado puede alcanzar esta resistencia a la tensión sin aparecer grietas en el mortero. Esto puede explicar el efecto limitante de un agregado ligero en la resistencia del concreto.

Al igual con un agregado ligero poroso, los resultados de las pruebas demostraron claramente que un concreto con una resistencia a la compresión de mas de 1000 kg/cm^2 se puede obtener. Para materiales mas homogéneos como la cerámica, la resistencia esta estrechamente relacionada con la porosidad total, pero esto no es el caso para un material compuesto semejante a un agregado del concreto ligero.

Cuando el agregado del concreto aligerado es sujeto a una carga a compresión uniaxial, el agregado es sujeto a un confinamiento lateral de los alrededores del mortero. La resistencia del agregado ligero bajo una carga multiaxial es tan alta, como así mismo bajo una carga uniaxial.

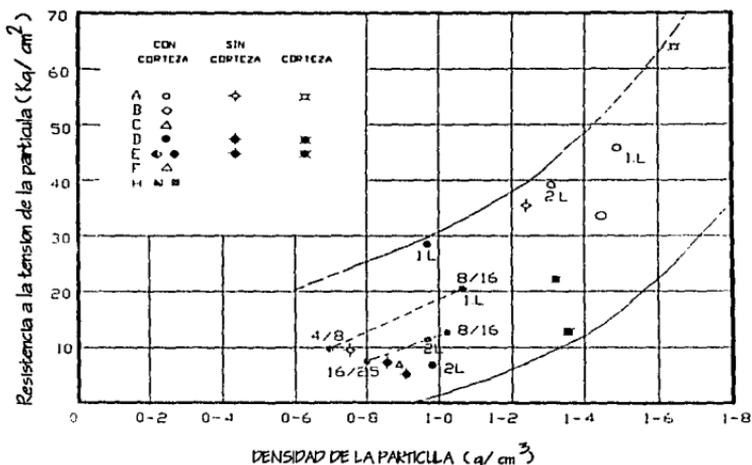


FIGURA 2.- RELACION ENTRE LA RESISTENCIA A LA TENSION DE UNA PARTICULA Y DENSIDAD

Las resistencias de la partícula y rigidez, dependen en la distribución del tamaño del poro, y forma de las cavidades que pueden debilitar la partícula del agregado. La figura 2 muestra las relaciones entre una partícula con resistencias a la tensión y la densidad de los agregados. Así, para densidades de la partícula entre 1.4 y 1.5 g/cm³ el rango promedio de la resistencia de la partícula a la tensión es de 23 a 46 kg/cm². Esto demuestra que la densidad de la partícula no proporciona suficiente información para calcular la resistencia a la tensión del agregado.

Otro factor es el efecto de las condiciones de humedad, donde se ha demostrado experimentalmente que la presencia de agua mejora el crecimiento subcrítico del agrietamiento.

Para arcilla expansiva como agregado ligero, cada partícula tiene una densidad exterior de cuerpo en forma de una corteza. Semejante cuerpo puede incrementar la resistencia de la partícula alrededor de un 10%. Desde entonces la concreción de las partículas de cenizas volantes (Lyttag) no son semejantes a la densidad exterior de cuerpo, explicándose así la baja resistencia observada para concretos con Lytag comparada con Liapor 8.

Para concretos de peso normal la resistencia desarrollada es proporcional a la resistencia del mortero, mientras que la resistencia del concreto aligerado es considerablemente determinada por la resistencia del agregado.

La figura 3 muestra las relaciones entre la densidad del concreto fresco y la resistencia a la compresión a 28 días de

la variedad de mezclas de concreto, mostrando claramente que la resistencia a la compresión tiende a aumentar con el incremento de la densidad del concreto.

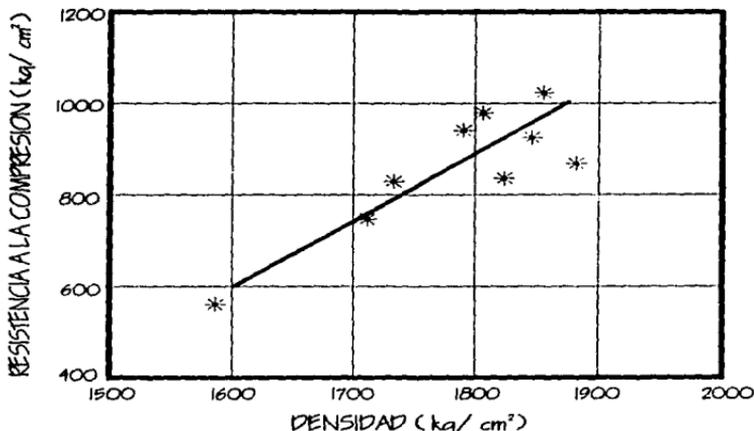


FIG. 3 RELACIONES ENTRE UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 28 DIAS Y LA DENSIDAD DEL CONCRETO FRESCO.

2.16 Curado a altas temperaturas en C.U.A.R. aligerado.

Cuando el concreto de cemento portland es curado a temperaturas ordinarias, los productos de la hidratación tienen amplio tiempo de difundir a precipitarse relativamente uniforme de principio a fin en el espacio intersticial entre los granos de cemento y la pasta de cemento. Sin embargo si la hidratación es acelerada por el curado a altas temperaturas, el aumento en proporción de esta hidratación, no permite un amplio tiempo para semejante difusión. El resultado de la microestructura es caracterizado por la alta concentración de los productos de hidratación en las zonas inmediatamente circundantes, hidratando el cemento en granos dejando grandes poros entre los granos.

El efecto del curado a altas temperaturas; resultando en la hidratación una densa capa alrededor del cemento en granos, y más abierta y porosa la microestructura, puede tener daños implicados tanto en la resistencia como en las propiedades de durabilidad. Esta es una de las razones por la que más códigos de concreto y especificaciones tienen limitaciones con respecto al curado a máxima temperatura.

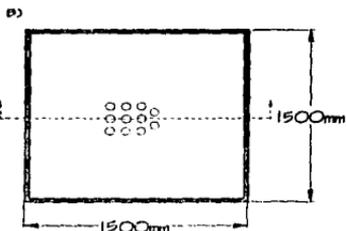
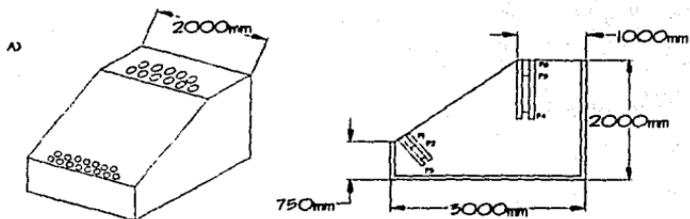
El Concreto de Ultra Alta Resistencia con un alto contenido de cemento puede crear un curado a elevadas temperaturas debido al aumento de calor de hidratación. Aunque puede ocurrir a temperaturas más altas en Concretos de Ultra Alta Resistencia aligerados debido a la baja conductividad termal.

Según el código del concreto de los noruegos, el curado a máxima temperatura para un concreto expuesto a un "muy agresivo ambiente" es de 65 °C, pero en la construcción de plataformas de concreto denominadas como Offshore en los años recientes un curado a una temperatura superior a 70 °C fue aceptado. Sin embargo puede ser difícil de obtener este nivel de incremento de temperatura sin un procedimiento especial semejante a el triturador de hielo. Semejante procedimiento incrementa los costos debido directamente al incremento de las instalaciones técnicas e indirectamente debido a retrasos de producción del concreto.

Recientes experimentos de laboratorio mostraron que un curado a una temperatura de 50 °C que puede incrementar la permeabilidad.

Experimentos.

Para tener un límite de curado a altas temperaturas creado bajo condiciones prácticas es posible, se elaboro un block aislado de Concreto de Ultra Alta Resistencia Aligerado de 9.5 m³ (Fig. 1). Como recomendación, una losa de concreto de 1.50 X 1.50 X 0.30 m también fue elaborada. El concreto obtuvo una resistencia a la compresión de 850 Kg/cm² y un peso específico del concreto fresco de 1800 Kg/m³. El diseño de la mezcla es mostrado en la tabla 1, donde el cemento utilizado fue el cemento portland Noruego de alta resistencia. El superplastificante estaba basado en melamina, y los agregados aligerados fueron una expansión del tipo arcillosa.



SECCION A-A

FIG. 1 A) BLOCK DE CONCRETO

B) LOSA DE CONCRETO

Tabla 1. Mezclas de concreto.

Material	Cantidad (por metro cubico)
Cemento	385 kg
Humo Silice	15 kg
Arena Natural (0 - 5.0 mm)	650 kg
Agregado ligero (4.0 - 8.0 mm)	290 kg
Agregado Ligero (8.0 - 16.0 mm)	360 kg
Agua	170 lts
Superplastificante	61 lts
Agente Retenedor de Aire	0.15 lts

El block de concreto era excesivamente instrumentado y para obtener este limite de curado a altas

temperaturas se realizaron perforaciones de 10 mm (4") a 7, 28 y 90 días, para obtener corazones de concreto y al mismo tiempo las lecturas correspondientes.

Así mismo se realizaron varias pruebas de investigación, incluyendo entre estas la resistencia a la compresión, módulos de elasticidad, análisis de sección y permeabilidad; la cual fue provocada utilizando un acelerante de cloruro. Las pruebas de resistencia a la compresión y módulos de elasticidad eran realizadas de acuerdo al código Noruego.

Resultados.

Las temperaturas típicas desarrolladas son mostradas en la figura 2 en donde las máximas temperaturas se encuentran entre 60 y 85°C, que fueron obtenidas tanto en la superficie como en el interior del concreto respectivamente. En referencia a la losa la máxima temperatura registrada era de alrededor de 48°C.

En lo que se refiere a resistencia a la compresión y módulos de elasticidad, cuando la resistencia a la compresión aumenta, también aumenta la temperatura del curado y los módulos de elasticidad. El análisis de la sección delgada no reveló ningunos efectos dañinos del curado a elevadas temperaturas en términos de microestructura o agrietamiento. Solamente se lograron observar unas pocas microgrietas en algunas de las secciones delgadas; encontrándose distantes unas de otras hasta la superficie exterior de la losa.

Los resultados de las pruebas de permeabilidad indicaron que este efecto no es perjudicial a un curado a una

temperatura máxima mayor de 85°C sobre las propiedades mecánicas del concreto.

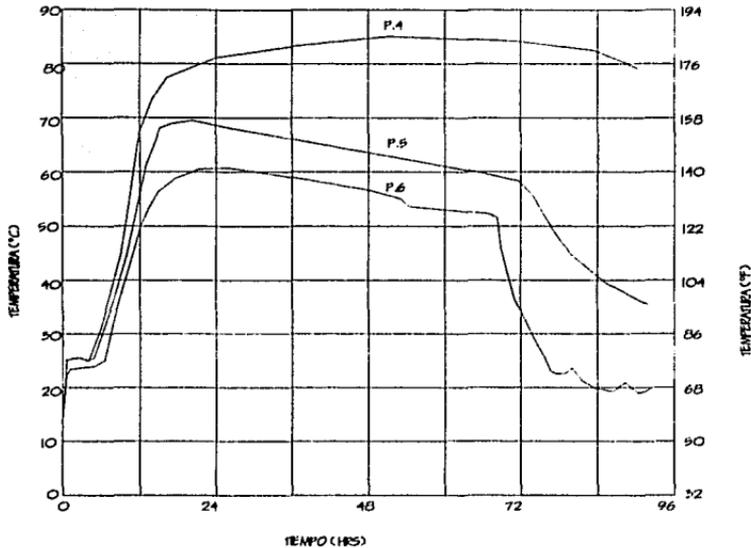


FIG. 2 DESARROLLOS DE LA TEMPERATURA TÍPICA EN EL BLOQUE DE CONCRETO

Por lo tanto el curado a alta temperatura máxima para una estructura específica de concreto no afecta necesariamente la permeabilidad del concreto en una capa de la superficie, y así la durabilidad de la estructura de concreto no es suficientemente ni necesariamente afectada.

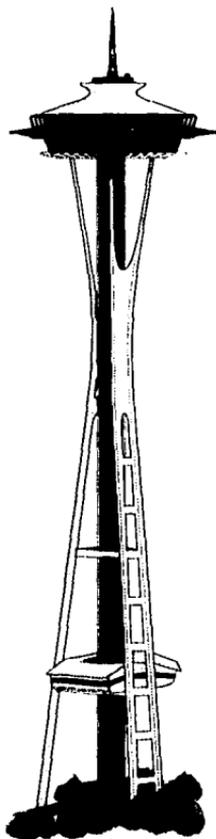
Referencias.

- (1) Webb, J. and Peyton J. J., " Composite Concrete Filled Steel Tbe Columns," 2nd National Structural Engineering Conference, Institution of Engineers, Adelaide, Oct. 1990, Institution of Engineers Australia, Canberra.
- (2) Crawley, D. B. " Very High Strength Concrete for Earthquake Resistant Structures," C.I.A. Biennial Conference, Adelaide, 1989, Concrete Institute of Australia, Sydney, 1989.
- (3) Mander, J. B., Priestley, M. N., and Park, R., " Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," Journal of Structural Engineering, A.S.C.E., Vol. 14 No. 8 pp. 1804-1826.
- (4) Richard E.E.G. Y.; " La experiencia noruega en la fabricación del Hormigón de alta resistencia." Congreso Intercontinental del Hormigón Preparado. Madrid 1992.
- (5) Moksnes, J.; " Symposium Singapore 89." Noteworthy Developments in Prestressed and Precast Concrete. Symposium in Singapore Sep. 1989.
- (6) Callander, I.A.; Clark, H.A.; Lees, T.P.; " Consideraciones internacionales del Hormigón de alta resistencia." Congreso Intercontinental de Hormigón Preparado. Madrid 1992.
- (7) Aitcin, P.C., Laplante, P. y Bedard, C.; " Development and Experimental Use of a 90 Mpa (13000psi)." Field Concrete. A.C.I. SP 98, pp. 51-70.
- (8) Ashvah, G., Orlovski y Irus, G.; " El Hormigón de alta resistencia como Hormigón resistente a la corrosión en la zona del Mar Muerto." Congreso Intercontinental del Hormigón Preparado. Madrid 1992.
- (9) Aguado, A.; Olivier. M.; " Hormigones de alta resistencia. Definición y ejemplo de aplicación." Congreso Intercontinental del Hormigón Preparado. Madrid 1992.
- (10) Calavera, J.; " Aspectos humanos y Psicológicos en la implantación del control de calidad de construcción." European Symposium on Management. Quality and Economics in Housing. Lisboa 1991.
- (11) Popovics, S., " A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 3 No. 5 May. 1973 pp. 583-599.
- (12) Thorenfeldt, E.; Tomaszewicz, A.; and Jensen J. J., " Mechanical Properties of High Strength Concrete and Application in Desing," Proceedings of the Symposium Utilization of High Strength Concrete, Tapir Trondheim, 1987, pp. 149-159.
- (13) Collins, M. P.; and Porasz, A.; " Shear Desing for High Strength Concrete," C.E.B. Bulletin d' information, No. 193 Dec. 1989, pp. 77-83.

- (14) Collins, M. P., and Michell D., " Prestressed Concrete Structures," Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1991, 776 pp.
- (15) Richard, F. E., and Brown, R. L., " An Investigation of Reinforced Concrete Columns," University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin No. 267, June 1934, 91 pp.
- (16) Hognestad, E., Hanson, N. W., and Mc. Henry, D., " Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Desing," A.C.I. Journal, Vol. 52, No. 6 Dec. 1955, American Concrete Institute, Detroit, pp. 455-479.
- (17) Karr, P. h., , Hanson, N. W., and Capell, H. T., " Stress-Strain Characteristic of High Strength Concrete," Douglas Mc. Henry, International Symposium on Concrete and Concrete Structures, A.C.I. S. P.- 55, American Concrete Institute, Detroit, 1978, pp. 161-185.
- (18) Norges Byggstandardiseringsrad (N.B.R.) " Prosjektering av. Betongkonstruksjoner Berengnings-og-Konstruksjonsregler (Concrete Structures Desing Rules) NS 3473," Norges Standardiseringsforbund, Oslo, 1989, 103 pp.
- (19) A.C.I. Committee 318, Building Code Requierments for Reinforced Concrete (A.C.I. 318-89) and Commentary- A.C.I. 318-89, American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353 pp.
- (20) Battista, D. D., " Minimum Reincement Requierments for High Strength Concrete Slabs," Masters Thesis, Departament of Civil Engineering, University of Toronto, 1992, 152 pp.
- (21) A.C.I. Committee, " State-of-the-Art Report on High Strength Concrete," A.C.I. Icommittee Report 363 R-92 American Concrete Intitute, Detroit, 1992.

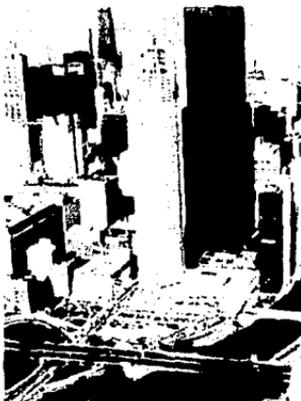
CAPITULO 3

APLICACIONES



III. APLICACIONES.

Durante la última década un número considerable de estructuras se han realizado a partir de la utilización de Concretos de Ultra Alta Resistencia. Sus especiales características de resistencia y durabilidad hacen que estos concretos sean especialmente adecuados para determinadas aplicaciones.



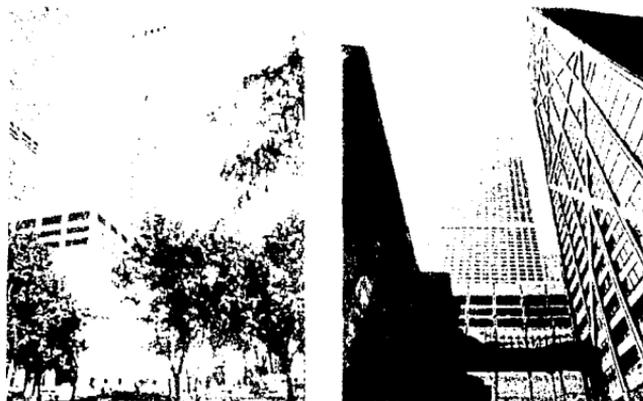
SOUTH WACKER TOWER, Chicago (Vista general y Fachada principal)

En edificios de gran altura, la mayor rigidez que confieren a la estructura y su mejor comportamiento frente a la acción del viento son consideraciones que en la actualidad, están motivando a los proyectistas de E.E. U.U. a establecer soluciones de concreto en sustitución de la tradicional estructura metálica. Según estudios realizados en el 40% de los edificios de gran altura que están siendo construidos en Manhattan se optó por soluciones estructurales de Concreto de Ultra Alta Resistencia.

La necesidad de salvar mayores claros en la construcción de puentes, la posibilidad de diseño de estructuras más esbeltas y durables que las que resultan con el empleo de concretos convencionales como así la inherente reducción en el

peso propio de la superestructura que conllevan, son factores que están potenciando el uso de los Concretos de Ultra Alta Resistencia en estructuras de puentes de grandes vanos.

En comparación entre las estructuras metálicas y las de Concreto de Ultra Alta Resistencia se añade un índole económico.



WATER TOWER PLACE, Chicago (Vista lateral y Fachada principal)

El comité del ACI 363⁽¹⁾ destaca un análisis comparativo de costos efectuados previamente a la construcción de un puente atirantado sobre el río Ohio en E.E. U.U.; la solución a base de una estructura metálica implicaba un costo de 33.3 millones de dólares, mientras que tres alternativas a base de Concretos de Ultra Alta Resistencia oscilaban entre 23.5 y 29.7 millones de dólares. La finalmente adoptada, fue la de Concreto de Ultra Alta Resistencia implicando un ahorro final del 29% sobre el presupuesto de la estructura metálica.

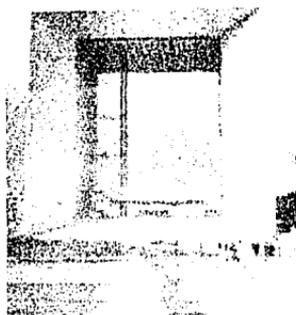
La característica de durabilidad de los Concretos de Ultra Alta Resistencia se convierte en predominante para la construcción de todas las estructuras de las

plataformas Offshore del Mar del Norte, sometidas a la acción continuada de un ambiente especialmente agresivo.

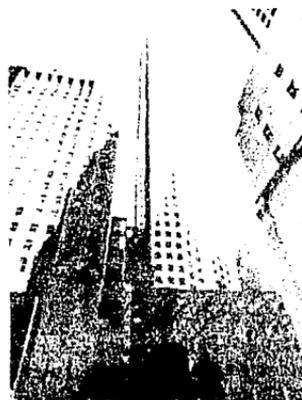
3.1 Edificios.

Sin lugar a duda, la utilización de los Concretos de ultra Alta Resistencia en la elaboración de pilas y columnas en edificios de gran altura representa el más idóneo de utilización en el campo de la edificación.

La importante reducción en las escudarías de los citados elementos estructurales que hacen posible la utilización de los Concretos de Ultra Alta Resistencia es el mejor argumento para su utilización.



GRANDE ARCHE DE LA DEFENSE, Paris



SCOTIA PLAZA, Toronto

También los aspectos relacionados con la facilidad de colocación y compactación de estos concretos se convierte en un aspecto de interés en estructuras con alta cuantía de armado. El colado de los pilares del edificio First Pacific Center se realizó disponiendo de la salida del conducto de bombeo en la parte

inferior de cada tramo del pilar y bombeando sin interrupción hasta incorporar el volumen de concreto necesario. La propia consistencia del concreto empleado (revenimiento de 250 mm) hizo prácticamente innecesario su vibrado posterior.

La facilidad de bombeo de los Concretos de Ultra Alta Resistencia aconsejó su utilización en el Grand Arche de la Défense de Paris, en cuya estructura confluyeron cuantías de armado superiores a 300 kg. de acero por m³ de concreto y distancias de bombeo superiores a 370 mts en trayectoria horizontal y 130 mts en vertical.

En la siguiente tabla se muestra una relación de edificios, exponiendo que las cualidades de estos concretos no son logros teóricos de laboratorio, sino por el contrario, es una evidencia que mediante un cuidadoso proceso de fabricación su producción a escala industrial es posible y, seguramente recomendable.

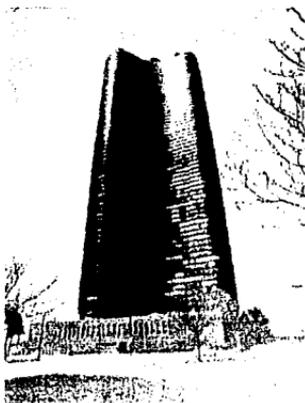
Relación de edificios realizados con Concretos de Ultra Alta Resistencia.

Denominación	Ubicación	año de finalización	No. de Plantas	Resistencia de proyecto (kg/cm ²)
One Wacker Place	Chicago	1990	-	800
Royal Bank Plaza	Toronto	1975	43	935
Scotia Plaza	Toronto	1988	68	700
River plaza	Chicago	1976	56	786
225 W. Wacker Drive	Chicago	1988	30	970
Columbia Center	Seattle	1983	76	660
311 S. Wacker Drive	Chicago	1988	70	840
Interfirst Plaza	Dallas	1983	72	680
Eugene Terrace	Chicago	1987	44	770
900 N. Mich. Annex	Chicago	1986	15	970
Century Square	Seattle	-	29	680
South Wacker Tower	Chicago	1989	79	830
Two Unión Square	Seattle	1989	58	1150
Pacific First Center	Seattle	1989	44	1150
Gateway Tower	Seattle	1989	62	940

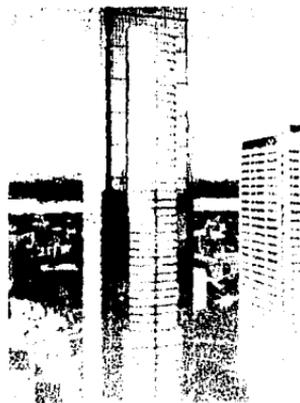
Así mismo existe un gran número de edificios elaborados con concretos de Alta Resistencia, que en relación a su año de finalización se puede decir que son Concretos de Ultra Alta Resistencia, dentro de los cuales se muestran los siguientes:

Relación de edificios realizados con Concretos de Alta Resistencia.

Denominación	Ubicación	Año de finalización	No de plantas	Resistencia de proyecto (kg/cm ²)
1130 S. Michigan Ave.	Chicago	1965	70	520
Lake Point Tower	Chicago	1965	70	520
Trump Tower	New York	-	68	550
Midcontinental Plaza	Chicago	1972	50	620
Colis Place	Melbourne	-	44	550
Frontier Towers	Chicago	1973	55	620
499 Park Avenue	New York	-	27	590
Water Tower Place	Chicago	1975	79	620
Helmsley Palace Hotel	New York	1978	53	550
Skyline Tower	Seattle	1982	28	480
Richmond-Adelaide Center	Toronto	1978	33	610
One Unión Square	Seattle	1979	38	520
Larimer Place Condominiums	Denver	1980	31	550
Broad Building	Seattle	-	-	550
Texas Commerce Tower	Houston	1981	75	520
World Trade Center	Tacoma	1984	-	550
City Center Project	Minneapolis	1981	52	550
S.E. Financial Center	Miami	1982	53	490
Petrocanada Building	Calgary	1982	34	500
Chicago Mercantil Exchange	Chicago	1982	40	620
Pacific Park Plaza	Emeryville	1983	30	450
Grande Arche de la Defense	Paris	1988	-	650



LAKE POINT TOWER, Chicago



TWO UNION SQUARE, Seattle

3.2 Puentes.

Las favorables características de durabilidad frente a la acción de agentes externos que presentan los Concretos de Ultra Alta Resistencia Están incrementando su utilización en pilares y vigas pretensadas de tableros de puentes, generalmente sometidos a la acción continua de un ambiente agresivo. Las especificaciones de durabilidad que son habituales actualmente en distintos países, se encuentran comprendidas entre un período de 100 y 200 años que implica, la utilización de los Concretos de Ultra Alta Resistencia.

Algunas disposiciones de la reglamentación vigente en países Nórdicos de Europa, en los que las condiciones climatológicas predominantes son especialmente adversas, implican la utilización de concretos de características especiales. Así, el Ministerio de Transportes de Noruega exige en puentes el uso de concretos cuya

relación agua-cemento sea inferior a 0.40, con la obligatoriedad de incorporar al concreto cenizas volantes o microsílíce.

Como consecuencia de dichas limitaciones el rango habitual de resistencias de tales concretos oscila entre 550 y 700 kg/cm².

Las especificaciones de proyecto establecidas para la construcción en Bergso y Sundet (Noruega) de un puente de 830 mts de longitud fueron las siguientes:

- Las resistencias en probetas cúbicas deberían de ser próximas a 1000 kg/cm² para concreto de densidad normal y comprendidas entre 750 y 850 kg/cm² para concreto ligero (Densidad en fresco de 1.950 kg/m³).
- La incorporación al concreto de microsílíce debería estar comprendida entre el 8 y el 10% del peso de cemento.

Numerosos puentes prefabricados y pretensados han sido construidos en Japón en la década de los años 70. Como exponente más significativo destaca el puente para ferrocarril AKKAGAWA construido en el año de 1975, que presenta una longitud total de 305 mts y un claro máximo entre pilas de 45 mts. Las especificaciones de proyecto para los elementos prefabricados establecían una resistencia del concreto de 800 kg/cm², habiéndose obtenido durante la producción un valor medio de resistencia de 960 kg/cm² con una desviación estándar de 44 kg/cm².

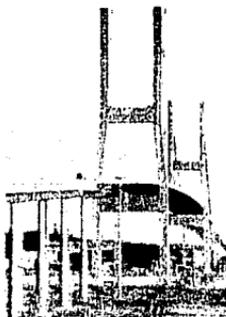
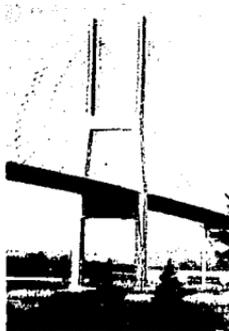
Después del colado de los elementos prefabricados se estableció un proceso de curado al vapor de 65 °C durante las primeras 12 horas, completando con un curado en autoclave a 180 °C y 10 atmósferas de presión durante las 20 horas siguientes.⁽²⁾

El puente Deutzer, construido en 1978 sobre el río Rhin en Colonia, constituye un ejemplo también de las aplicaciones de los Concretos de Ultra Alta Resistencia. Su estructura está configurada por tres vanos de 132, 185 y 212 mts de claro. En el colado de 61 mts del vano central se optó por la utilización de concreto ligero de 550 kg/cm², adoptándose la incorporación de concreto de la misma resistencia y densidad normal en el resto de la estructura.

En la siguiente tabla se incluye una relación de puentes en los que se ha incorporado Concretos de Ultra Alta Resistencia. Como puede verse, a diferencia de los edificios de gran altura fabricados con este tipo de concreto que son patrimonio casi exclusivo de los E.E. U.U., el emplazamiento de los puentes está más diversificado.

Relación de puentes realizados con Concreto de Ultra Alta Resistencia.

Denominación	Ubicación	Año de construcción	Claro máximo	Resistencia de proyecto (kg/cm ²)
Ootanabe Railway Bridge	Japón	1973	24	790
Fukamitsu Higway Bridge	Japón	1974	26	690
Akkagawa Railway Bridge	Japón	1976	46	800
Deutzer Bridge	Alemania	1978	185	690
Pont du Pertuiset	Francia	1988	110	650
Helgelandsbrua	Noruega	1990	425	650



Así mismo, existen otros puentes más que de acuerdo con su año de construcción se puede decir que son fabricados con Concretos de Ultra Alta Resistencia, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Relación de puentes realizados con Concretos de Alta Resistencia.

Denominación	Ubicación	Año de	Claro	Proyecto (Kg/cm ²)
Willows Bridge	Toronto	1967	48	410
Nitta Highway Bridge	Japón	1968	30	590
San Diego To Coronado	California	1969	43	410
Kaminoshima Highway Bridge	Japón	1970	88	590
Selbjorn Bridge	Noruega	1977	212	400
Pasco-Kennewick Intercity	Washington	1978	299	410
Linn Cove Viaduct N.	Carolina	1979	54	410
Parrot Ferry Bridge	California	1979	195	430
Ottamarsheim	Francia	1979	172	300
Houston Ship Chanal	Texas	1981	229	410
Tower Road Bridge	Washington	1981	49	620
Huntington to Proctorville	Ohio	1984	274	550
Pont de Joigny	Francia	1988	-	600
Arc sur la Rance	Francia	1989	-	550
Giske	Noruega	1989	52	550
Sandhomoya	Noruega	1989	154	550
Boknasundet	Noruega	1990	190	600

3.3 Plataformas Offshore.

Los Concretos de Ultra Alta Resistencia han sido utilizados en las estructuras de todas las plataformas Offshore construidas en el Mar del Norte. Desde la construcción de la primera de ellas, a comienzos de la década de los 70, hasta la fecha actual, el término Ultra Alta Resistencia ha implicado en cada momento valores diferentes de la resistencia del concreto, generalmente crecientes en el paso del tiempo hasta alcanzar los que son habituales en la actualidad.

La utilización masiva del Concreto de Ultra Alta Resistencia en las estructuras de las plataformas Offshore está poniendo de manifiesto la actitud del material para soportar la acción continuada de agentes agresivos, unida al menor costo de mantenimiento que se deriva de su mayor durabilidad.



Plataforma "GULLFAKS C"

La facilidad de la colocación en obra de estos materiales, derivando de su elevada docilidad ha permitido el colado de zonas cuya cuantía de armado alcanza los 1000 kg de acero por metro cúbico de concreto.

Por su importancia merece especial atención la plataforma " GULLFAKS C " construida en el año de 1989 en el Mar del Norte. La estructura del concreto presentó una altura total de 262 mts y una superficie en planta de 16,000 m². Las especificaciones del proyecto incluían el uso de 240,000 m³ de concreto con una resistencia característica comprendida entre 650 y 700 kg/cm² para un revenimiento de 240 mm y una cuantía de media de armado de 290 kg de acero por metro cúbico de concreto.



Plataforma "GULLFAKS C"



Plataforma "GULLFAKS A"

Este tipo de concreto es apto para este tipo de plataformas porque resiste ciertas agresiones externas tales como: La acción continuada de aguas heladas, buen comportamiento al choque, resistencia a la abrasión, etc.

En la siguiente tabla se muestra una relación de estructuras Offshore construidas en el Mar del Norte.

Relación de plataformas Offshore realizadas con Concretos de Ultra Alta Resistencia.

Denominación	Año de finalización	Resistencia a 28 días, en kg/cm ² (Probeta cúbica)			
		De proyecto	Media obtenida	Desviación estándar. S.	Resistencia real
T. 300. Testmodel	1984	650	845	70	774
Gullfaks B	1984	55	808	50	735
Oseberg A	1985	600	767	36	715
Gullfaks C	1986	650/700	790	34	790
Gullfaks (Skirts)	-	700	838	54	730

Al igual que los edificios y puentes existen otras plataformas, que de acuerdo con su año de construcción se puede decir que utilizaron Concretos de Ultra Alta Resistencia; siendo las siguientes:

Relación de plataformas Offshore realizadas con Concretos de Alta Resistencia.

Denominación	Año de finalización	Resistencia a 28 días, en kg/cm ² (Probeta cúbica)			
		De proyecto	Media obtenida	Desviación estándar. S.	Resistencia real
Ekofisk 1	1972	400	450	23	416
Beryl A	1974	450	550	30	507
Brent B	1974	450	530	31	481
Brent D	1975	500	542	25	506
Frigg CD P-1	1974	400	430	26	392
Frigg TC P-2	1975	450	560	38	505
Statfjord A	1975	500	546	30	502
Frigg MP-2	1976	400	560	43	498
Ninian Central	1978	500	590	41	531
Statfjord B	1979	550	625	39	569
Statfjord C	1982	550	675	38	620
Gullfaks A	1984	550	652	33	603

3.4 Aplicaciones Especiales.

El campo de aplicación de los Concretos de Ultra Alta Resistencia se extiende a una gran cantidad de estructuras. Numerosos ejemplos de obras muy diversas se encuentran repartidos por distintos países del mundo. A continuación se presentan algunos.

- Estructura de sustentación para tuberías de una conducción de gas construida en 1982 en la expuesta costa oeste de Karmoy (Noruega), con una longitud total de 590 m dispuesta a diferentes profundidades hasta alcanzar una máxima de 30 m. Se emplearon en la construcción de la estructura elementos prefabricados con concretos de resistencia comprendida entre 650 y 750 kg/cm².
- Plataforma circular de 17.5 mts de diámetro, integrante de las estructuras de cimentación de la plataforma Gullfaks B.⁽³⁾ La resistencia de proyecto era de 850 kg/cm², obteniéndose una resistencia media de 1020 kg/cm².
- Elementos prefabricados para el National Day Parade Grandstand en Abu Dhabi (Emiratos Arabes Unidos), construido en 1983. El incremento de la durabilidad necesaria para hacer frente al ambiente especialmente agresivo del entorno, la necesidad de diseño de una estructura esbelta y la necesaria limitación de los valores de retracción y fluencia, hicieron aconsejable una especificación del uso de Concretos de Ultra Alta Resistencia de 600 kg/cm². El valor final de resistencia obtenido fue de 710 kg/cm².⁽⁴⁾
- Estructuras a base de elementos prefabricados de concreto con una resistencia de 750 kg/cm² para protección de carreteras frente a la acción de avalanchas de nieve y materiales sueltos, construidas en Japón.⁽⁵⁾
- Depósitos y cajas fuertes de seguridad utilizando Concretos de Ultra Alta Resistencia comprendidos entre 950 y 1000 kg/cm² construidos en Turín (Italia) en el año de 1988.
- Pilotes enterrados hasta profundidades de 35 m. durante la construcción del centro comercial " Oslo-City" en Noruega. El incremento de la capacidad portante de cada uno de los 250 pilotes construidos (de 1600 kN a 2400 kN) como consecuencia directa del empleo en su fabricación de concreto de 750 kg/cm² en sustitución del inicialmente previsto de 550 kg/cm², posibilitó la reducción de un número importante de pilotes.
- 110,000 m² de Concreto de Ultra Alta resistencia extendidos en firmes de carreteras y autovías Noruegas, con la finalidad de verificar su

comportamiento frente a los esfuerzos de abrasión impuestos por las condiciones de tráfico especialmente agresivas (neumáticos reforzados con clavos metálicos para mejorar su adherencia al pavimento, bajas temperaturas superficiales, ciclos de hielo y deshielo, etc.) obteniéndose después de 6 años de observación y análisis y resultados positivos.

3.5 Perspectivas a futuro.

En nuestros días ha sido posible aumentar la resistencia a la compresión hasta 1400 kg/cm^2 , ya que ha sido posible disminuir la relación agua-cemento hasta 0.20 ó 0.25. Actualmente este nivel de resistencia a la compresión representa el máximo al cual puede aspirarse en una planta de concreto listo para usarse, bajo la condición de que se empleen agregados particularmente resistentes.

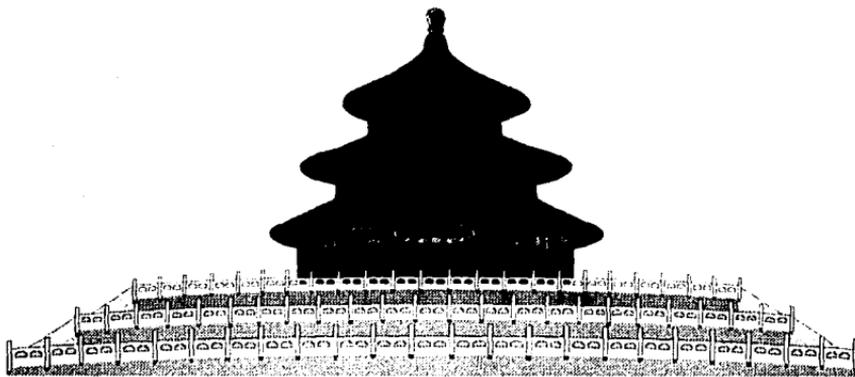
En los países pioneros en la utilización de estos concretos la necesidad de un mejor conocimiento de las características y posibilidades de los mismos les impulsa a demandar nuevos programas de investigación y estudio. Posiblemente sea ese espíritu innovador y progresista el que permite que en la actualidad esté siendo desarrollado el proyecto de un nuevo edificio en Chicago, el cual es el "MEIGLINBEITLERT", con 210 plantas y una altura sobre rasante superior a los 600 mts, en el que está prevista la utilización de un concreto cuya resistencia a la compresión estará próxima a los 1500 kg/cm^2 .

Referencias.

- (1) A.C.I. Committee 363 "State of the Art report on High Strength Concrete 363 R-18."
- (2) Matsumoto y otros; "Precast Prestressed Concrete Truss Railway Bridge Using Extremely High Strength Concrete," I.A.B.S.E. Congress 1976. Final Report.
- (3) NORCEM CEMENT; Noreem NaI No. 21986.
- (4) Bardhan; "Application of High Strength Concrete in the Construction of National Day Parade Grandstand at Abu Dhabi U.A.E." Tenth International Congress of the F.I.P., New Dehli India 1986.
- (5) Ishizuka, W.; High Strength Concrete Sheds and Barriers." Tenth International Congress of the F.I.P., New Dehli, India 1986.

CAPITULO 4

EXPERIENCIAS EN DIFERENTES PAISES DEL MUNDO

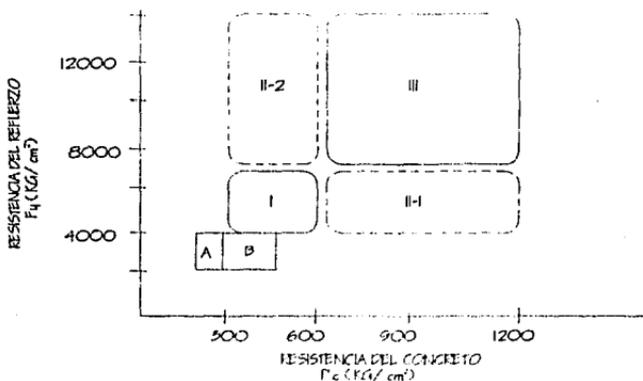


IV.- EXPERIENCIAS EN DIFERENTES PAÍSES DEL MUNDO.

4.1 Japón.

Japón no solamente avanza con la tecnología de la electrónica, sino que ahora compite por la tecnología del concreto, creando un Proyecto Nacional denominado "New R. C. Project", organizado por el ministro de construcción del Gobierno Japonés, para desarrollar edificios avanzados de concreto reforzado utilizando concreto y refuerzo de Ultra Alta Resistencia. Los objetivos de este proyecto son:

- Desarrollar una tecnología para los materiales de construcción y control de calidad.
- Evaluar las propiedades fundamentales de los materiales y el comportamiento de los elementos estructurales.
- Desarrollar un sistema de diseños metodológicos para elaborar unos super edificios de concreto reforzado de gran altura en zonas sísmicas.



- A- EDIFICIOS DE Poca ALtura
B- EDIFICIOS DE GRAN ALtura CONSTRUIDOS EN LA ULtima DECADA
I- CONCRETO DE ALta RESISTENCIA Y REFUERZO
II-1- CONCRETO DE ULtra ALta RESISTENCIA Y REFUERZO DE ALta RESISTENCIA
II-2- CONCRETO DE ALta RESISTENCIA Y REFUERZO DE ULtra ALta RESISTENCIA
III- CONCRETO DE ULtra ALta RESISTENCIA Y REFUERZO

El Concreto de Ultra Alta Resistencia de 900 a 800 kg/cm² ha sido usado para elementos prefabricados; mientras que el de resistencia de 600 kg/cm² para elementos fabricados en el sitio.

El material de resistencia considerado en el proyecto se encuentra en un rango de 300 a 1200 kg/cm² para el concreto y de 9000 a 12000 kg/cm² para el refuerzo longitudinal.

Los resultados de este proyecto deberán ser utilizados como Normas Técnicas para la administración de edificios, como así mismo para alentar el desarrollo de las investigaciones en el avance de la tecnología del concreto reforzado.

Para la elaboración de este proyecto se obtuvo la colaboración y participación del Comité del concreto, Comité del acero de refuerzo, Comité de las estructuras, Comité de diseño estructural, Comité de construcción y manufactura y las Universidades.

Comité del concreto.- El Comité era formado para el desarrollo del concreto de Ultra Alta Resistencia de alta calidad con resistencias comprendidas de 360 kg/cm² hasta 1200 kg/cm² con los siguientes objetivos:

- Buscar materiales propios para el Concreto de Ultra Alta Resistencia.
- Desarrollar especificaciones para el cemento, agregados, aditivos y aglomerantes.
- Evaluar las propiedades del Concreto de Ultra Alta resistencia.
- Desarrollar Normas para proporcionamiento de la mezcla.
- Desarrollar especificaciones para trabajos de concreto.
- Evaluar la durabilidad y resistencia al fuego.

Comité del acero de refuerzo.- El comité estuvo formado para desarrollar al acero de refuerzo de Ultra Alta Resistencia, para ser similar al concreto con los siguientes objetivos:

- desarrollar el acero de Ultra Alta Resistencia.
- Evaluar la propiedades del acero de Ultra Alta Resistencia.
- valuar las propiedades del concreto confinado.
- Desarrollar ecuaciones formadas para elementos de concreto reforzado para el uso en el análisis del elemento finito no lineal.
- Evaluación de las características vinculadas entre el refuerzo y el concreto.

Comité de las estructuras.- El comité era formado para el estudio de las características estructurales de los elementos del Concreto de Ultra Alta Resistencia reforzado con los siguientes objetivos:

- Evaluar las características estructurales (capacidad de resistencia y deformación, característica de histeris) necesarias en un diseño de estructuras y realizar un análisis no lineal de respuesta a un terremoto.
- Detallar posibles dimensiones y refuerzo de elementos de capacidad de deformación requeridos.
- Realizar y evaluar métodos de pruebas de muestras.
- Verificar un sistema de diseño estructural.

Comité de diseño estructural.- El comité era formado para desarrollar unas Normas de diseño estructural para un edificio de concreto reforzado especialmente bajo la acción de un terremoto, para lograr el mejor uso de los materiales de Ultra Alta Resistencia; los objetivos son los siguientes:

- Desarrollar métodos de elementos de modelos estructurales.
- Buscar las estructuras más factibles.
- Definir el diseño de las cargas.
- Desarrollar un criterio para el comportamiento de una estructura durante un terremoto.

Comité de construcción y manufactura.- El comité era formado para el desarrollo de Normas de especificación para el trabajo de concreto reforzado de Ultra Alta Resistencia.

Universidades.- El apoyo de las universidades en este proyecto fue basado en el hecho de la realización de las pruebas de resistencia tanto del concreto como del acero; ya que ciertas Universidades poseen maquinas de prueba de gran capacidad; logrando así reducir el costo de la investigación.

La investigación era realizada en la siguiente secuencia:

- 1.- Desarrollo de materiales de Ultra Alta Resistencia.
- 2.- Evaluación de las propiedades de los materiales de Ultra Alta Resistencia.
- 3.- Evaluación de las propiedades de diseño estructural usando elementos estructurales de Ultra Alta Resistencia.
- 4.- Desarrollo de especificaciones normales para la construcción.

Cemento.

En Japón, el humo sílice fue conocido como una adición mineral para aumentar la resistencia del concreto; el aglomerante del cemento Portland consistía en polvos finos de escoria de alto horno y humo sílice, siendo efectivos para elevar la resistencia. Con un desarrollado aditivo reductor de agua, el Concreto de Ultra Alta Resistencia pudo ser conseguido con una baja relación agua cemento de 0.30 y un revenimiento de 230 mm.

Cemento Portland normal, cemento de alta resistencia a edades tempranas, cemento de calor moderado y cemento de escoria de alto horno habían sido usados sucesivamente para elaborar mortero de Ultra Alta Resistencia. Así mismo, tipos especiales de aditivos químicos se habían desarrollado para su aplicación a Concretos de Ultra Alta Resistencia.

Agregados.

La calidad, forma, tamaño de los agregados finos y gruesos son muy específicos para lograr la resistencia que se requiera del concreto.

El agregado fino apropiado, era seleccionado por medio de pruebas de resistencia a la compresión, realizadas con tres especímenes de mortero con dimensiones de 75 mm. de diámetro por 150 mm. de altura, curados en agua a 20 °C durante 28 días. El agregado también era seleccionado por medio de pruebas de resistencia a la compresión con especímenes de concreto de 100 mm. de diámetro por 200 mm. de alto, usando un apropiado agregado fino.

Agentes reductores de agua.

Los agentes reductores de agua para Concretos de Ultra Alta Resistencia

deben satisfacer el siguiente criterio de comportamiento:

- Revenimiento de 230 mm \pm 20 mm.
- Fraguado a un tiempo inicial entre 5 y 12 horas, y un tiempo final menor que 15 horas.
- Cambio de revenimiento en 60 minutos, menor que 50 mm. y un contenido de aire de 1.5%.
- Módulos relativos dinámicos de elasticidad mayores de 85%.

Propiedades del Concreto de Ultra Alta Resistencia.

Las propiedades necesarias son:

- Propiedades del concreto fresco.
- Propiedades a corto plazo, tales como resistencia a la compresión, descantillamiento, resistencia a la tensión, modulo de ruptura, modulo de elasticidad, relaciones de deformación, incluyendo la descendiente afluencia.
- Propiedades a largo plazo, tales como contracción y deslizamiento, durabilidad y resistencia al fuego.

Las propiedades mecánicas del concreto endurecido deben satisfacer las especificaciones requeridas para mejorar el deseado comportamiento de elementos de la estructura. Por otro lado las propiedades del concreto fresco deben satisfacer los requerimientos para construcción.

Las resistencias del concreto son influenciadas por procesos de curado, el desarrollo de la resistencia puede ser estimado por el método de madurez; una

ascendente y rápida temperatura en una edad fresca del concreto puede causar efectos nocivos en la resistencia del concreto; la resistencia del concreto puede variar en una sección debido a la diferencia en el proceso de curado.

Durabilidad.

El Concreto de Ultra Alta Resistencia es confiable para ser denso y durable por el uso y manejo de una baja relación agua-cemento. El uso de agentes reductores de agua y altos contenidos de cemento pueden afectar las propiedades de agrietamiento y la reacción álcali agregados. La durabilidad del Concreto de Ultra Alta Resistencia era estudiada por medio de pruebas tales como resistencia al congelamiento, contenido de aire, neutralización, resistencia al agua marina, impermeabilidad y reacción álcali agregados. El uso de aire retenido y agentes reductores de agua era recomendado para mejorar la resistencia al congelamiento.

Resistencia al fuego.

Por medio de pruebas realizadas a altas temperaturas durante tres horas, se obtuvo que el Concreto de Ultra Alta Resistencia es un gran aislante y protector del acero de refuerzo, ya que el agrietamiento del concreto causado por las altas temperaturas no era muy significativo. Las pruebas se realizaron con una columna muestra de 500 x 500 mm. curada en seco y con un con una resistencia del concreto de 800 kg/cm².

Trabajabilidad.

La trabajabilidad del concreto fresco es un factor muy importante para el uso práctico en la construcción. Tiempo de fraguado, segregación, pérdida de revenimiento, consistencia y calor de

hidratación fueron estudiados extensivamente obteniéndose datos satisfactorios.

Así, por medio de este nuevo proyecto Japonés (NEW R. C. PROYEC) se dio paso a la utilización del Concreto de Ultra Alta Resistencia en el diseño de edificios y construcciones a prueba de terremotos, gracias a sus favorables características y comportamiento obtenidas por medio de pruebas y estudios, durante los 5 años que duro la investigación (1988 - 1993).

4.2 China.

La producción anual de cemento en China es de aproximadamente 200 millones de toneladas. La producción de concreto ha alcanzado alrededor de 3.5 por ciento de millones de m^3 , aproximadamente 5 millones de m^3 de está existencia es utilizado en elementos prefabricados.

El desarrollo del Concreto de Ultra Alta Resistencia en China ocurrió en dos etapas:

La etapa inicial se dio en los años 50s, cuando el Concreto de Ultra Alta Resistencia era estudiado y aplicado a estructuras de concreto prefabricadas. Al mismo tiempo, debería ser elaborado por medio de dos maneras distintas: Usando un cemento de alta calidad con una resistencia a la compresión de 700 a 800 kg/cm^2 a 28 días; o usando cemento Portland ordinario con una baja relación agua-cemento y un bajo porcentaje de finos.

La resistencia a la compresión de 900 a 1000 kg/cm^2 debería ser realizada usando un cemento de alta calidad. Una resistencia a la compresión de 800 kg/cm^2 era usada para la construcción de cubiertas de vigas reticuladas prefabricadas (puentes), con un claro de 18 m. Un concreto con una resistencia a la compresión de 500 kg/cm^2 era usado para la construcción de arcos de vigas reticuladas compuestas por concreto prefabricado, con claros de 60 mts, con 19 piezas de block de concreto prevaciado. Así mismo tuberías de presión de concreto prefabricado y durmientes para vías férreas también fueron elaboradas con concreto de 500 kg/cm^2 .

Debido a la baja proporción en producción de cemento de alta calidad, el uso de Concretos de Ultra Alta Resistencia en este periodo próximo era limitado porque era dificultosa la colocación del concreto debido al bajo contenido de agua.

El rápido progreso en China durante los años 80s en la investigación y desarrollo con aditivos para concreto y materiales cementantes suplementarios

habían impulsado el Concreto de Ultra Alta Resistencia dentro de esta segunda etapa de desarrollo. Los concretos trabajables de 500 a 800 kg/cm² de resistencia a la compresión no son fácilmente elaborados utilizando cemento ordinario, baja relación agua-cemento y superplastificantes.

Durante 10 años, la pasta de Concreto de Ultra Alta Resistencia ha tenido buenos resultados en una variedad de aplicaciones de proyectos constructivos tales como:

- Un edificio de 31 niveles, con una altura de 101.1 mts.
Una estructura hueca en forma de globo prevaciado con un diámetro de 60 mts.
- Puentes prefabricados para caminos con claros de 110 a 180 mts.
- Una viga encajonada prefabricada con un claro de 40 mts.⁽¹⁾
- Una estructura para tensar un cable reforzado para un puente ferroviario, con un claro de 126 mts.⁽²⁾
- Polos catenarios prefabricados para vías férreas prefabricadas.⁽³⁾
- Un encofrado para una mina de carbón con un fuste de columna de 6 mts. de diámetro y 508 mts. de profundidad.^(3,4)

El Concreto de Ultra Alta Resistencia también puede ser aplicado a postes de concreto prefabricado, pilas para puentes prevaciadas, etc.

Preparación del concreto.

Algunos Concretos de Ultra Alta Resistencia son todavía elaborados en China usando cemento Portland de alta calidad, pero el Concreto de Ultra Alta Resistencia con una resistencia de 500 a 800 kg/cm² no es todavía usualmente elaborados usando el método más conveniente de una baja relación agua-cemento combinado con agentes reductores de agua y superplastificantes.

Desde los años de 1970, los aditivos del concreto fueron usados extensivamente en China. Hoy en día, más de 100 fábricas de aditivos para concreto producen más de 200 tipos diferentes de aditivos con una producción anual de alrededor de 243,000 toneladas.

Como favorable fluidez puede ser lograda por la adición de un agente

reductor de agua o un superplastificante, el Concreto de Ultra Alta Resistencia puede ser bombeado. En China la altura máxima hasta la cual se ha logrado bombear un concreto de este tipo ha sido de 154 mts.

Los aditivos compuestos, semejantes a los aditivos reductores de agua combinados con aire retenido o agentes reductores de fraguado, pueden ser desarrollados o aplicados a construcciones de concreto. Usando estos aditivos compuestos se puede reducir la pérdida de revenimiento de la mezcla preparada de concreto.

Materiales suplementarios de cemento.

A los pocos años después, muchos Concretos de Ultra Alta Resistencia en China fueron elaborados con la adición de humo silice, cenizas volantes y polvo de zeolito, obteniéndose una gran consolidación con la adición de un aditivo reductor de agua o un superplastificante. Estos materiales suplementarios del cemento no solamente fortalecen el concreto, sino que también benefician otras propiedades físicas y mecánicas.

Los Concretos de Ultra Alta Resistencia superiores a 600 kg/cm^2 han sido elaborados con la utilización de arena superfina de río (el módulo de finura es de alrededor de 0.7 y la superficie específica es de $200 \text{ cm}^2/\text{gr}$), aditivo y cemento Portland ordinario con escoria de alto horno. Este tipo de concretos con una menor contracción en seco y sobreencogimiento que los concretos con arena de medida ordinaria, resultan mejores tanto en impermeabilidad y resistencia al congelamiento.

Concretos de Ultra Alta Resistencia aligerados.

El concreto con una resistencia a la compresión de 400 a 500 kg/cm² y una densidad de 15 a 20% menor que el concreto de resistencia normal era elaborado en el laboratorio. Este Concreto de Ultra Alta Resistencia Aligerado era elaborado con el uso de cenizas volantes y un aditivo reductor de agua. El concreto era vibrado a frecuencias variables, porque su módulo de elasticidad era de 60 a 70% y su escurrimiento plástico de 20 a 30% más alto que el equivalente al concreto de resistencia normal después de un año. El Concreto de Ultra Alta Resistencia aligerado no tiene un muy gran uso en elementos prefabricados.

Propiedades físicas y mecánicas de los Concretos de Ultra Alta Resistencia.

Los resultados de las pruebas y conclusiones de los Institutos de Investigación y Universidades en China, sobre las propiedades mecánicas y físicas de los Concretos de Ultra Alta Resistencia principalmente elaborados con la adición de superplastificantes fueron:

- 1.- Generalmente, la resistencia a la compresión a 3 días era casi un 60% de la resistencia a 28 días, y a 7 días era casi un 85% de la resistencia a 28 días. La resistencia a la compresión continuo con incremento, y a 180 días era casi 115% de la resistencia a 28 días; hasta llegar a un año en que llego a 130% de la resistencia a 28 días.
- 2.- En los Concretos de Ultra Alta Resistencia, la resistencia a la compresión aumento a una mucho más rápida velocidad que la resistencia a la tensión y a la flexión. Así, las relaciones de

resistencia a la tensión y resistencia a la flexión contra una resistencia a la compresión son mucho más bajas que aquellas para concretos de resistencia normal. La relación de resistencia a la tensión por hendidura a una resistencia a la compresión es de 1:15 a 1:20. La relación de resistencia a la tensión axial a una resistencia a la compresión era de 1:20 a 1:24 y la relación de resistencia a la flexión a una resistencia a la compresión era de 1:80 a 1:14.

- 3.- El módulo de elasticidad incremento como incrementó la resistencia a la compresión, pero con un valor retardado. El módulo estático de elasticidad para un concreto de resistencia de 600 a 800 kg/cm² era de alrededor de 379915 kg/cm² a 450040 kg/cm². El módulo de elasticidad para un concreto bombeable de Ultra Alta Resistencia con un gran revenimiento era de un 20% más bajo. Los Concretos de Ultra Alta Resistencia elaborados con agregados gruesos de piedra caliza tienen un módulo muy elevado como los elaborados con agregados gruesos de granito.
- 4.- Usando un superplastificante ligeramente incrementa la contracción temprana, pero la desviación de la contracción es menor que 100×10^{-6} . Después de un año la contracción era menor que en un concreto sin la adición de un superplastificante.
- 5.- El grado de escurrimiento plástico (esfuerzo de escurrimiento

plástico por unidad de fuerza) a 300 días de concretos con superplastificantes es mucho mayor que en concretos sin la adición de superplastificante.

- 6.- La densidad de los concretos con superplastificante es igual que los concretos sin superplastificante, y la resistencia al congelamiento e impermeabilidad es mejor.
- 7.- Las pruebas realizadas en China indican que la carbonación no hace ningún efecto dañino en los concretos.

Investigación básica.

En China la investigación básica de los Concretos de Ultra Alta Resistencia incluyen el estudio del efecto de la resistencia en un mejoramiento de la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento endurecida, las características reológicas de los concretos, el mecanismo de efecto de los aditivos reductores de agua, y el mecanismo de un bajo revenimiento por la adición de superplastificantes en el concreto. Las investigaciones tienen además, estudios de la completa curva de deformaciones de los Concretos de Ultra Alta Resistencia por la adición de humo sílice bajo una carga axial de compresión y una ejecutable falla de análisis.

Además, la investigación con polvo de zeolito mineral a los Concretos de Ultra Alta Resistencia ha sido ejecutada. El finamente dividido polvo de rocas naturales de zeolito y una pequeña cantidad de otro material orgánico era usado para desplazar de 5 a 10% (por peso) de cemento Portland ordinario. Con un superplastificante y usando una

tecnología ordinaria de mezclado, un Concreto de Ultra Alta Resistencia era elaborado con una resistencia a la compresión superior a 800 kg/cm^2 . Esta resistencia era de un 10 a 15% más alta que aquella con un concreto sin el polvo de zeolito. Los resultados indican que un agente de fortalecimiento de zeolito inorgánico es un material con gran actividad que puede reaccionar con Ca(OH)_2 para producir Concretos de Ultra Alta Resistencia. De este modo, la estructura del poro de la pasta de cemento así como la orientación y el rango de orientación del Ca(OH)_2 en la superficie de separación en la pasta agregada de cemento es mejorada. Así mismo no únicamente es la resistencia del concreto la que aumenta sino también la durabilidad. Además cuando se le combina con un superplastificante, este agente de fortalecimiento inorgánico puede ayudar a controlar la pérdida de revenimiento. Los resultados en pruebas indican que por el uso de polvo de zeolito el revenimiento del concreto fresco puede ser constante por 2 o 2.5 horas y la resistencia a la compresión a 3, 7 y 28 días es de casi 10% más alto que un concreto sin polvo de zeolito.

Pruebas en la producción de resistencia al esfuerzo cortante de la pasta de cemento, viscosidad, condensación y dispersión de partículas tienen resultados de que el zeolito en polvo es un excelente aditivo para mantener la fluidez de los Concretos de Ultra Alta Resistencia bombeables.

Aunque los Concretos de Ultra Alta Resistencia con una resistencia a la compresión superior a 1000 kg/cm^2 han sido elaborados en el laboratorio de algunos institutos de investigación y

universidades; 800 kg/cm² han sido aplicados a unos pocos proyectos ingenieriles. Por medio de pruebas se ha demostrado que una gran resistencia a la compresión hace más frágil un concreto. Por lo tanto, el uso de los Concretos de Ultra Alta Resistencia superiores a 600 kg/cm² no ha sido difundido en China a fin de evitar accidentes severos inducidos por una falla de fragilidad de la estructura.

En el presente, se encuentran bajo investigación métodos para mejorar la fragilidad de los concretos en China.

4.3 E.E. U.U.

Como se ha visto en el capítulo III dentro de lo que son las aplicaciones, Estados Unidos de Norte América siendo el pionero de la aplicación de los Concretos de Ultra Alta Resistencia a edificios; tiene una infinidad de experiencias, pues sus constructores e investigadores se han evocado a investigar y dar a conocer nuevas tecnologías dentro de lo que es el concreto para proporcionar estructuras económicas y esbeltas.

Dentro de sus nuevas investigaciones se han preocupado por conocer el comportamiento del Concreto de Ultra Alta Resistencia a largo plazo, gracias a que se obtuvieron cilindros de prueba durante la construcción del edificio denominado como Water Tower Place en el año de 1975.

Hoy en día se siguen probando estos cilindros, los cuales han proporcionado datos que indican que la resistencia del concreto después de 20 años aun ha aumentado, aunque mínimamente, y que no existe una variación dentro de sus propiedades químicas.

Así como estas investigaciones existe una múltiple cantidad mas que se encuentra en investigación, y que se espera prontamente sean reveladas a la humanidad.

4.4 Noruega.

Al igual que Estados Unidos de Norte América, Noruega tiene una gran tecnología dentro de lo que son los Concretos de Ultra Alta Resistencia, pues son los pioneros de la aplicación de este tipo de concretos a las plataformas petroleras denominadas como Offshore, colocadas en el Mar del Norte; ya que este tipo de concretos son muy resistentes a la abrasión y al congelamiento y deshielo

Así mismo Noruega se ha encargado de investigar las propiedades del Concreto de Ultra Alta Resistencia aligerado con diferentes tipos de agregados ligeros, obteniendo densidades de hasta 1750 kg/m^3 .

Noruega es también uno de los primeros en utilizar el Concreto de Ultra Alta Resistencia, y conocer sus propiedades físicas y químicas

4.3 México.

En México los datos que se tienen sobre este tipo de concreto han sido obtenidos en los laboratorios del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) donde se han llegado a obtener concretos con resistencias ligeramente superiores a los 1000 kg/cm^2 , utilizando materiales que se encontraran al alcance del área metropolitana de la ciudad de México.

La técnica para producir un Concreto de Ultra Alta Resistencia no se basa exclusivamente en usar mucho cemento, sino más bien en la correcta combinación de aquellos elementos y factores que favorecen el aumento de resistencia. En la siguiente tabla se muestran las diferencias entre concretos con y sin microsilice

Diferencias entre concretos con y sin microsilice.

CONCRETO		
Microsilice	0.00	15.00
cemento (kg/m^3)	495	407.00
Relación Agua/Cemento	0.33	0.33

Para la obtención de datos se elaboraron 29 mezclas con diversas proporciones, las resistencias individuales variaron desde 500 kg/cm^2 a los 7 días, hasta 1030 kg/cm^2 a 56 días y 1050 kg/cm^2 a 90 días en diferentes mezclas ensayadas. Los consumos de cemento variaron de 447 a 590 kg/m^3 .

Cemento.

A lo largo del proyecto se empleó cemento Portland tipos I y II, haciendo notar que no se planteó desde un principio ninguna búsqueda por el mejor cemento para el propósito. Es bien sabido que la resistencia está relacionada directamente con la finura y/o composición química del cemento.

Por lo que respecta al consumo de cemento necesario para alcanzar altas resistencias, depende en gran parte de la técnica que se utilizara para consolidar el concreto. Por ejemplo existen los llamados concretos compactados con rodillos, o los concretos utilizados en la fabricación de durmientes de ferrocarril, donde con dosis de aproximadamente 300 kg/m^3 de concreto se pueden alcanzar resistencias del orden de 700 kg/cm^2 . Si el concreto debe ser fluido y apto para ser colocado en secciones de cimbrado estrechas, como sucede en el caso de concreto reforzado, el consumo de cemento puede variar de 400 hasta quizás 600 kg/m^3 de concreto.

El empleo de altas cantidades de cemento en este tipo de concreto ocasiona una liberación muy rápida de calor durante la hidratación, reduciendo la resistencia del concreto debido a la creación de fisuras y microfisuras producidas por los gradientes térmicos que se presentan. Por lo tanto, es aconsejable, que cuando se produzcan Concretos de Ultra Alta Resistencia, se adicione algún mineral que reduzca el calor de hidratación, como la ceniza volante, o se reduzca el consumo de cemento al mínimo en ultimo de los casos.

Ceniza volante.

En los ensayos se empleó ceniza volante clasificada como tipo "F", elaborándose además algunas mezclas sin este aditivo mineral. La ceniza empleada era proveniente de una planta de energía eléctrica localizada en el estado de Coahuila, resultando de la quema del carbón. Es bien sabido que ésta ceniza no es lo que pudiera llamarse una buena ceniza, sin embargo se le empleó de dos maneras, una, tal y como se le obtuvo en muestra, y la otra después de una molienda en el laboratorio.

Cabe destacar que los beneficios derivados del uso de las cenizas volantes, depende en gran medida de la cantidad de la ceniza, según se mide ésta, por su reactividad al combinarse con la cal libre. En otros países cuando es posible se emplea preferentemente la ceniza clasificada como tipo "C", la cual tiene en su composición química óxido de calcio, ésta contribuye directa y rápidamente a proporcionar un elemento de dureza al hidratarse junto con el cemento, además reacciona a edades tardías como lo hace la ceniza tipo "F". En general, los concretos elaborados con ceniza tipo "C" requieren menos cemento, tal vez del orden de los 350 kg/m³ para resistencias de 700 kg/cm².

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran las resistencias promedio utilizando variación en las cantidades de cemento y utilizando ceniza volante entre 6.5 y 15% del peso de cemento empleado.

P_c PROMEDIO DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, CONSUMO DE CEMENTO 495 KG/M³

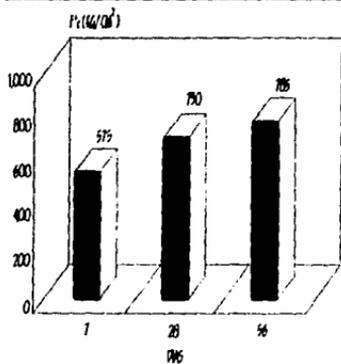


FIG. 2

P_c PROMEDIO DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, CONSUMO DE CEMENTO 495 KG/M³

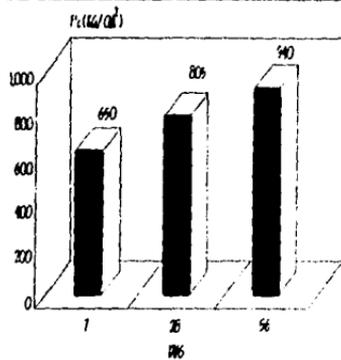


FIG. 3

P_c PROMEDIO DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, CONSUMO DE CEMENTO 590 KG/M³

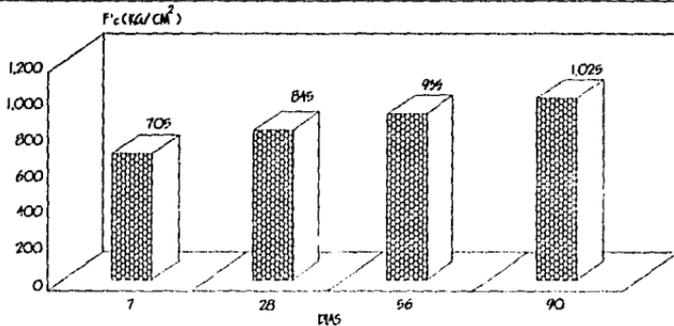


FIG. 4

Microsilíce ó humo sílice.

En otros países ahora es prácticamente común el uso del humo sílice o microsilíce, para elaborar Concretos de Ultra Alta Resistencia. Este material consiste principalmente de bióxido de sílice (SiO_2), y es un subproducto que se obtiene durante la fabricación del silicio y ferrosilicio al capturar los humos que se producen en los hornos. La microsilíce es un material muy peligroso de manejar en estado suelto, debido a su finura, por lo que se le prefiere una en forma de suspensión a base de agua y algunos aditivos reductores de agua, de los llamados de alto rango.

La finura de la microsilíce medida por el método de la porosimetría intrusiva de mercurio, es según Oleck y otros investigadores, del orden de $20.76 \text{ m}^2/\text{g}$ en su estado denso, burdamente la superficie específica de la microsilíce es 100 veces mayor que la del cemento. Howard y otros investigadores, afirman que la superficie específica de la microsilíce es de $20,000 \text{ m}^2/\text{kg}$ en comparación con $500 \text{ m}^2/\text{kg}$ para la ceniza volante, además señala que la microsilíce presenta un contenido de sílice amorfa en un 93 a 98% aproximadamente el doble de lo que se puede tener en una buena ceniza volante.

Algunos investigadores han llegado a coincidir en que la microsilíce tiene dos efectos principales en el concreto:

- 1.- El efecto 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 superfluidificante.

- 2.- "El efecto inherente", que se refleja en una ganancia en resistencia en los concretos elaborados con microsilice, en comparación con aquellos sin microsilice pero con la misma relación agua-cemento.

Los investigadores sostienen que los beneficios de la microsilice se presentan a nivel de interfase entre la pasta y el agregado, según las observaciones realizadas en cuerpos maduros de concreto, el contenido de material no hidratado se reduce significativamente, ésta reducción llega a ser de casi cero a una distancia de 30 microdeformaciones (30×10^6 m/m) en la zona adyacente al agregado.

Este efecto pudiera ser, según los autores, resultado de la densificación de la microestructura en la zona de transición del agregado, originando una mejor adherencia entre la pasta y el agregado y por lo tanto una mayor resistencia del concreto.

Aditivos

El programa contempló el uso de aditivos fluidificantes de alto rango, con el objeto de lograr consistencias adecuadas para poder bombear el concreto durante su colocación. El uso de este tipo de aditivos permite por un lado dar trabajabilidad a la mezcla y por otro lado reducir la relación agua-cemento utilizando menos agua. Las relaciones agua-cemento oscilaron entre 0.21 y 0.31.

En este estudio se obtuvieron pesos volumétricos del orden de 2375 kg/m^3 en promedio en 25 mediciones, el valor más alto fue de 2440 kg/m^3 . Por otro lado, el contenido de aire medido según

el método de la olla de presión dio un promedio de 2.4%, el valor más alto fue de 3.2% y el más bajo de 1.9%. El aditivo usado en la mayoría de las mezclas y que mejor se comportó, fue uno de la familia de los lignosulfonatos, empleándose en dosis que variaron de 3.34 a 6.0% en peso del cemento, siendo más frecuentemente el uso de porcentajes entre 4.0 y 5.0%.

Se observó que valores cercanos y mayores que 6.0% retardan excesivamente el fraguado del concreto (disminuyendo además el revenimiento), por lo que debe tenerse mucho cuidado en la dosificación de este tipo de aditivos.

La rutina en cuanto a la adición del aditivo, consistió en agregarlo al final del mezclado normal de los ingredientes, esto es, después de que se midió el revenimiento de la mezcla sin el aditivo. El revenimiento promedio para dosis de aditivo menores al 6.0% fue de 15 cm, el valor más alto fue de 21 cm, el más bajo fue de 2.0 cm y la desviación estándar fue de 4.8 cm en un total de 24 mediciones. La razón por la cual se debe agregar el aditivo después del mezclado principal, es la de lograr un beneficio más prolongado en el uso del aditivo, guardando toda proporción en cuanto a la secuencia y tiempo empleados en la industria premezcladora.

En la figura 5 se muestra una comparación entre mezclas con ceniza y sin ceniza volante con una proporción igual de cemento.

COMPARACION ENTRE UNA MEZCLA CON CENIZA Y OTRA SIN CENIZA
CON IGUAL PROPORCION (CEMENTO-550 KG/ m³.)

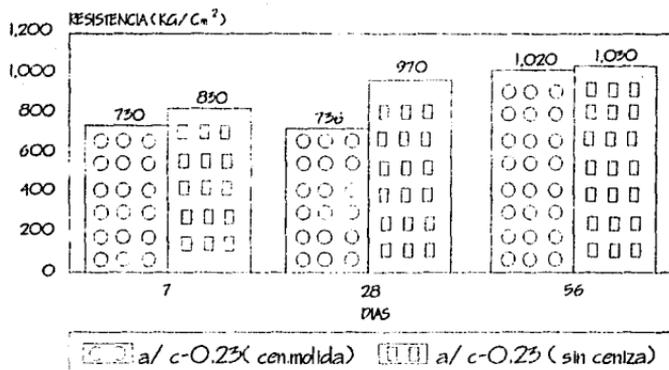


FIGURA 9. COMPARACION ENTRE UNA MEZCLA CON CENIZAS Y OTRA SIN CENIZAS, CON IGUAL PROPORCION

Agregados.

Para producir Concreto de Ultra Alta Resistencia se requirió de buenos agregados, lo suficientemente duros, rugosos y limpios para poder desarrollar una gran adherencia con la pasta de cemento.

-Arena.- Se utilizó arena de mina (Santa Fe) en un 35% de peso, ésta arena requirió de un cribado por la malla No 50, para disminuir un poco los finos y aumentar el módulo de finura al valor promedio de 3.36.

-Grava.- Se utilizó un basalto triturado en un 65% de peso, lavado y cribado por la malla de 3/4". La estructura del basalto es ligeramente porosa con una masa

específica de 2.71. Al principio de los ensayos se utilizó una caliza triturada sin lograr resistencias muy elevadas (660 kg/cm^2 a 56 días), por lo cual se descartó su uso.

La grava del tipo andesita que se encuentra en los alrededores también fue descartada, debido a la mala calidad de éste material.

Concreto.

El concreto elaborado en el IMCYC fue ensayado a los 7, 28, 56 y algunos cilindros a 90 días. En general el tamaño de los cilindros empleados para obtener la resistencia a los 28 días fue de 15 cm de diámetro y de 10 cm para otras edades.

La figura 6 permite aclarar el beneficio de la ceniza volante, los resultados son individuales y pertenecen a tres diferentes mezclas cuyas proporciones y datos son:

-Mezcla sin ceniza.- Contiene 65% de grava, 35% de arena, 135.7 lts de agua y 5.6% de aditivo. Para ésta mezcla se midieron 4.0 cm de revenimiento, un peso volumétrico de 2450 Kg/m^3 y 2.7% de contenido de aire.

-Mezcla con ceniza sin moler.- Contiene 7% de ceniza, 65% de grava, 35% de arena, 147 lts de agua y 4.5% de aditivo. En ésta mezcla se midieron 18 cm de revenimiento, un peso volumétrico de 2400 kg/m^3 y 2.6% de contenido de aire.

-Mezcla con ceniza molida.- Contiene 6.5% de ceniza, 65% de grava, 35% de arena, 147 lts de agua y 3.7% de aditivo. Se obtuvieron de la mezcla 15 cm de revenimiento, un peso volumétrico de 2400 kg/m³ y 2.3% de contenido de aire.

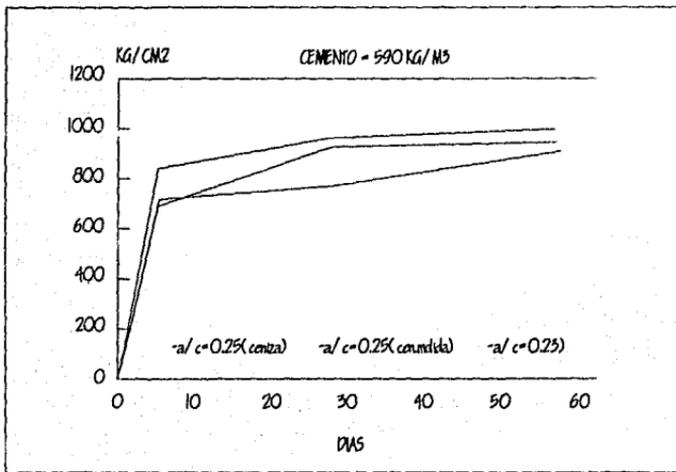


FIG.6

Este tratamiento de molienda es incosteable en un concreto comercial, llevándose solamente acabo en los experimentos para mejorar el comportamiento de la ceniza.

En cuanto al módulo de elasticidad (E_c), se llegaron a obtener valores experimentales de hasta 367,570 kg/cm²

a 56 días. Los resultados se encuentran resumidos en las figuras 7 y 8, donde para efectos de comparación se grafican los resultados experimentales a diferentes edades.

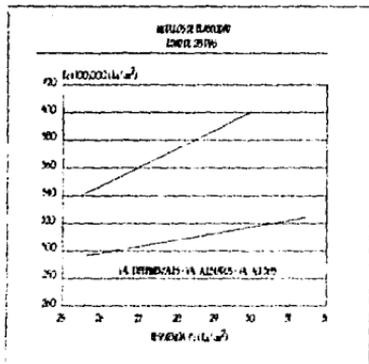


FIG. 7

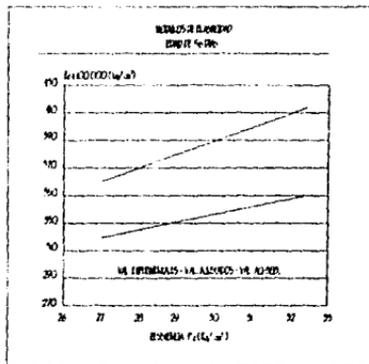


FIG. 8

Aplicaciones.

En México se han construido dos puentes carreteros importantes, el puente Coatzacoalcos con un claro máximo de 280 mts y el puente Tampico con un claro máximo de 360 mts, en ambos puentes se emplearon para su construcción concretos con resistencias hasta de 400 kg/cm².

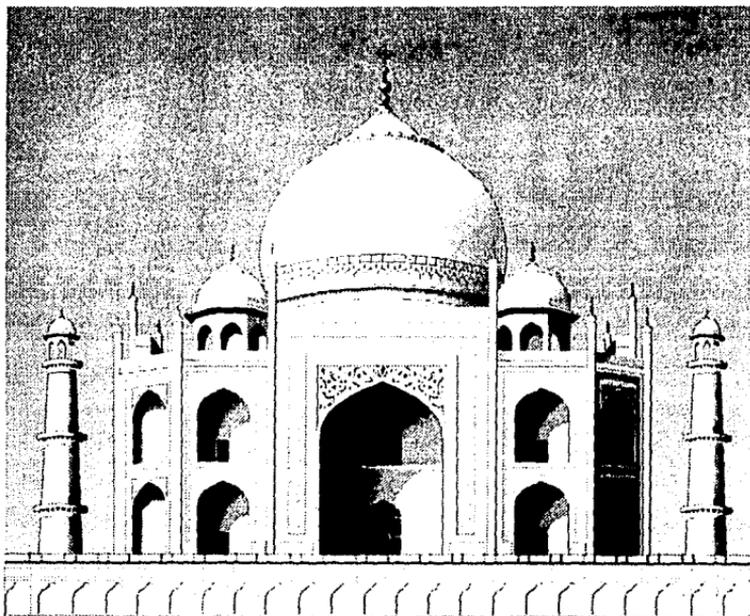
En la actualidad los concretos con máxima resistencia aplicada han sido con una resistencia de 700 kg/cm², y los cuales fueron aplicados al antiguo Hotel de México (ahora World Trade Center), y en uno de los puentes de la nueva autopista México-Acapulco (autopista del sol); en donde se obtuvo la misma resistencia de 700 kg/cm².

Referencias.

- (1) Guomin, Yan, " Desing and Construction of 40 m-Span Ballastless & Sleeperless Simply Supported P.C. Girder Railway Bridges," Proceedings, third International Colloquium on Concrete in Developing Countries, China Civil Engineering Society, Beijing, 1990, pp. 440-447.
- (2) Liangming, Wu, and Qingyu, Xiao, " New Lifting Process for long-Span Cable-Stayed Concrete Structures," Proceedings, third International Colloquium on Concrete in Developing Countries, China Civil Engineering Society Deijing, 1990, pp. 490-497.
- (3) Renjun, Shi; Zhong, Meigin, Zhang, Lumin; and Tiangyu, Pang, " High-Strength Concrete Application to China Railway Engineering," Proceedings, third International Colloquium on Concrete in Developing Countries, China Civil Engineering Society Deijing, 1990, pp. 477-483.
- (4) Jiaqi, Wang, " Rescarch and Application of Materials and Technologies in Concrete Products Used by Chinese Railqays," 2nd International Symposium on Cement and Concrete, 1989 Vol. 3 pp. 185-191.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



V.- Conclusiones y Recomendaciones.

- Los Concretos de Ultra Alta Resistencia representan un gran avance tecnológico en la industria de la construcción, ya que con la aplicación de estos concretos se logran reducir tamaños de sección tanto de columnas como de vigas, obteniéndose así un espacio de área comercial mas amplio y dando una mejor estética a nuestra construcción.
- Para poder elaborar este tipo de concretos se necesita de un complejo y estricto control de calidad, tanto en su control de producción como en el control de recepción, para poder obtener buenos resultados durante su aplicación y vida útil.
- Para poder obtener estas Ultra Altas Resistencias es necesario reducir la relación agua-cemento de 0.20 a 0.40. Entre más baja sea la relación agua-cemento la resistencia a la compresión del concreto será mas alta. Estas relaciones agua-cemento se pueden alcanzar gracias a la utilización de altas dosificaciones de superplastificantes. Así mismo no solamente es la relación agua-cemento la que produce estas Ultra Altas Resistencias sino que es necesario disponer de materiales de buena calidad, especialmente de agregados y muy resistentes, sobre todo para los Concretos de Ultra Alta Resistencia superiores a 1000 kg/cm^2 .
- Dentro de las condiciones de diseño estructural el Concreto de Ultra Alta Resistencia es mas sensible que el concreto de resistencia normal, por esto, se debe diseñar cuidadosamente para evitar posibles fallas del concreto ante diferentes fuerzas naturales que lo afecten.
- En un Concreto de Ultra Alta Resistencia aligerado la densidad del agregado es el primer factor controlador de la densidad del concreto aligerado, así como la resistencia del agregado ligero controla la resistencia del Concreto de Ultra Alta resistencia aligerado; por esto se debe realizar una buena selección de los materiales que llegaran a formar la mezcla de concreto.
- De acuerdo con los avances en la investigación a nivel mundial, el Concreto de Ultra Alta resistencia presenta muchas ventajas estructurales, aun bajo situaciones sísmicas, debido principalmente a su rigidez. Siendo quizás, las ventajas económicas, que son reconocidas en otros países como un aliciente para la aplicación de estos concretos, debería ser una factibilidad para que constructor mexicano junto con el estructurista se compenentren en las posibilidades de aplicar el Concreto de Ultra Alta Resistencia y descubran los beneficios que se pueden tener en pesos, al construir estructuras esbeltas mas rápidamente.

- Los resultados obtenidos en los laboratorios del IMCYC, permiten afirmar que es posible elaborar Concretos de Ultra Alta Resistencia utilizando materiales al alcance de la zona metropolitana del Distrito Federal. Las características indican que estos concretos pueden ser bombeables; por esto en México si se pueden elaborar este tipo de concretos, pero lo que hace falta es difundir mas esta nueva tecnología del concreto hacia los constructores, ya que aun en la actualidad se están utilizando concretos con resistencias comprendidas entre 350 y 400 kg/cm².

Bibliografía.

PIERRE CLAUDE AITCIN, " Concretos de Muy Alta Resistencia." Artículo del mes de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes. México D.F. **Mayo** de 1991.

DR. JORGE GÓMEZ DOMÍNGUEZ, " Concreto de Resistencia Superior." Artículo Publicado en la Revista Construcción y Tecnología del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México 1991.

MICHAEL P. COLLINS, DENIS MITCHELL AND JAMES G. MACGREGOR, " Structural Desing Considerations for High-Strength Concrete." Artículo Publicado en la Revista Concrete International del American Concrete Institute. Enero de 1993.

JOHN WEBB, " High-Strength Concrete: Economics, Desing and Ductility." Artículo Publicado en la Revista Concrete International del American Concrete Institute. Enero de 1993.

PAUL R. BELANGER AND MICHAEL H. SHIRLAW, " Temperature Control in High-Strength, Masive Concrete Girders." Artículo Publicado en la Revista Concrete International del American Concrete Institute. Noviembre de 1993.

MANUEL FERNÁNDEZ CANOVAS, " Composición y Dosificación de los Hormigones de Alta Resistencia." Artículo Publicado en la Revista Hormigón de la Universidad pol. de Madrid España. Agosto de 1992 No. 709.

MALVIN SANDVIK AND ODD E. GJORV, " High Curing Temperatures in Lihweight High-Strength Concrete." Artículo Publicado en la Revista Concrete International del American Concrete Institute. Diciembre de 1992.

STEVEN H. KOSMATKA AND WILLIAM C. PANARESE, " Diseño y Control de Mezclas de Concreto." Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto México 1992.

CLARA BEATRIZ VILLEGAS B., Y. C., " Que Tan Alto Podemos Llegar." Artículo Publicado en la Revista Construcción y Tecnología del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1994

GERMAN GONZÁLEZ ISABEL, " Hormigón de Alta Resistencia." Madrid, Instituto Técnico de Materiales y Construcción (I.N.T.E.M.A.C.), 1993.

WALTER KUNZE, " Nuevos Desarrollos en El Concreto." Artículo Publicado en la Revista Construcción y Tecnología del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1989.

JIANG JIAFEN, " High-Strength Concrete in China." Artículo Publicado en la Revista Concrete International del American Concrete Institute, Enero 1993.

SHUNSEKE OTANI, " Development of Advanced Reinforced Concrete Buildings Using High-Strength Concrete and Reinforcement." New Construction Technology in Japan, Department of Architecture, Faculty of Engineering, University of Tokio, 1993.

GABRIELA DURAN, HUGO CUNEO SIMIAN, " Hormigones de Alta Resistencia." Experiencia Regional. Docentes de la Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

NEVILLE ADAM, " Tecnología del Concreto." México D. F. 1985, Tomo I y II.

GUSTAVO OTTO FRITZ DE LA ORTA, " Concreto Armado." México 1969, Segunda Edición UNAM.

WESTON T. HESTER, " High-Strength Concrete." Second International Symposium. SP 121, del American Concrete Institute, Detroit 1990.