



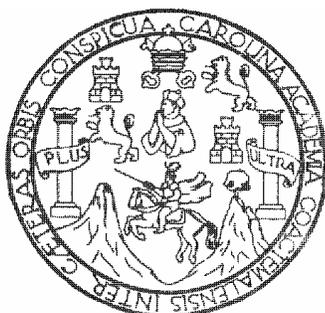
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA (EXPERIMENTACIÓN EN
GUATEMALA)**

CARLOS EDUARDO MORATAYA CÓRDOVA
Asesorado por Ing. Francisco Javier Quiñónez De La Cruz

Guatemala, julio de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA (EXPERIMENTACIÓN EN
GUATEMALA)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS EDUARDO MORATAYA CÓRDOVA

ASESORADO POR ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JULIO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Velíz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herberth René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Bouyssou
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA (EXPERIMENTACIÓN EN
GUATEMALA)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 17 de junio de 2003.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser lo más grande en mi vida y por ser mi fortaleza en cada momento, por sus cuidados y atenciones
Mi asesor	Ing. Francisco Javier Quiñónez, por el apoyo otorgado a esta investigación
Mis patrocinadores	Cementos Progreso S. A. Ing. Emilio Beltranena, por prestarme la atención y apoyo en el tema
Al Sr. Mario Sierra y personal del laboratorio del CETEC	Por toda su ayuda, colaboración para realizar los ensayos
A la Universidad de San Carlos y a la Facultad de Ingeniería	Por mi formación académica

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Sinforoso Morataya Chete
Sandra E. Córdova de Morataya
Por ser el apoyo para mi vida, y en
agradecimiento a cada uno de sus
esfuerzos

Mis hermanos

Jorge Mario, Édgar Alexánder, William
Roberto, con sincero aprecio

Mis abuelitos

En su memoria, Q.E.P.D.

Mis amigos

Con mucho aprecio

Toda mi familia

Que me motiva cada día a seguir
adelante

A mis compañeros de trabajo

Por el apoyo brindado

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IV
GLOSARIO.....	VI
RESUMEN.....	VIII
OBJETIVOS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	X
1. CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.....	1
1.1. Antecedentes históricos del concreto de alta resistencia.....	1
1.2. Definiciones.....	3
1.2.1 Concreto.....	3
1.2.2 Cemento Pórtland.....	3
1.2.3 Agregados.....	4
1.2.4 Aditivos.....	5
1.2.5 Microsilice.....	5
1.2.5.1 Definición.....	6
1.2.5.2 Producción.....	6
1.2.5.3 Características.....	6
1.2.5.4 Empleo de microsilices en el concreto.....	7
1.2.6 Aditivos químicos.....	7
1.3 Características que deben reunir los materiales.....	8
1.3.1 Selección de los materiales.....	8
1.3.1.1 Cementos.....	8
1.3.1.2 Agregados.....	9
1.3.1.2.1 Agregado fino.....	9
1.3.1.2.2 Agregado grueso.....	10
1.3.1.3 Agua.....	11
1.3.1.4 Aditivos químicos.....	11

1.3.1.4.1	Incorporadores de aire.....	12
1.3.1.4.2	Retardadores.....	12
1.3.1.4.3	Reductores de agua.....	13
1.3.1.4.4	Reductores de agua de rango alto....	13
1.3.1.4.5	Aditivos minerales.....	14
1.3.1.5	Aditivos minerales.....	14
1.3.1.5.1	Ceniza volante.....	15
1.3.1.5.2	Microsílice.....	16
1.3.1.5.3	Cemento de escoria.....	17
1.4	Especificaciones y normas.....	17
2.	MEZCLAS.....	21
2.1	Proporciones de mezclas.....	21
2.1.1	Proporciones de agregados.....	21
2.1.1.1	Agregados finos.....	21
2.1.1.2	Agregados gruesos.....	22
2.1.2	Relación agua / cemento (A/C).....	24
2.1.2.1	Contenido de cemento.....	24
2.1.3	Proporciones de Aditivos.....	25
2.2	Resistencias requeridas.....	27
2.3	Preparación, mezclado, transporte y colocación de mezclas.....	28
2.3.1	Mezclado.....	28
2.3.1.1	Tiempo de mezclado.....	29
2.3.1.2	Procedimiento de mezclado.....	29
2.3.2	Transporte.....	30
2.3.3	Colocación.....	31
2.3.4	Curado.....	31
3.	PROPIEDADES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.....	33
3.1	Propiedades del concreto.....	33
3.1.1	Módulo de elasticidad.....	33

3.1.2	Módulo de ruptura.....	35
3.1.3	Resistencia de fatiga.....	36
3.1.4	Unidades de peso.....	37
3.1.5	Propiedades térmicas.....	37
3.1.6	Resistencia con relación a edad.....	38
3.2	Consideraciones y aplicaciones en diseño.....	39
3.2.1	Consideraciones en columnas.....	40
3.2.1.1	Contribución de resistencia de acero y concreto.....	40
3.2.2	Consideraciones en vigas.....	42
3.3	Áreas de aplicación.....	43
3.3.1	Edificios.....	44
3.4	Ventajas.....	47
4.	DESARROLLO DE MEZCLAS.....	49
4.1	Procedimiento para realización de mezcla.....	49
4.1.1	Realización de mezcla tradicional.....	50
4.1.2	Mezcla de concreto de alta resistencia.....	56
4.1.2.1	Características de los materiales y equipo utilizado.....	58
4.1.2.2	Procedimiento de mezcla.....	63
	CONCLUSIONES.....	77
	RECOMENDACIONES.....	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	80
	ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Cálculo de módulo de elasticidad	34
2	Cálculo de módulo de ruptura	35
3	Resistencia a tensión vrs módulo de ruptura	36
4	Resistencia a compresión vrs edad del concreto	39
5	Cilindros de prueba	65
6	Slumps de pruebas	69
7	Cilindro de ensayo de masa unitaria	70
8	Medición de % de aire	70
9	Cilindros ensayados	76
10	Fallas de cilindros	76
11	Precio unitario 1	84
12	Precio unitario 2	85
13	Precio unitario 3	86

TABLAS

I	Volumen de agregado grueso	23
II	Proporción de mezcla	27
III	Proporción de mezcla de algunos concretos de alta resistencia	32
IV	Asentamientos recomendados para concreto	51
V	Relación agua/cemento para distintas resistencias	52
VI	Cantidad de agua de mezcla aproximada y contenido de aire atrapado para diferentes asentamientos y tamaños nominales máximos de agregado	53
VII	Porcentaje de agregado fino sobre agregado total	54
VIII	Características de arenas	60
IX	Características de grava	60
X	Cantidades de materiales para m ³ de concreto de alta resistencia con correcciones en laboratorio (0.04m ³)	64
XI	Materiales utilizados	67
XII	Datos de requerimientos de mezcla	68
XIII	Datos obtenidos de resultados	71

XIV	Diseño de mezcla 2A	73
XV	Resultados de resistencia mezclas Tipo 2	74
XVI	Resultados de resistencia mezclas Tipo 1	75
XVII	Mezcla tipo 2A	81
XVIII	Mezcla tipo 2B	82
XIX	Mezcla tipo 2C	83
XX	Mezcla tipo 1A	87
XXI	Mezcla tipo 1B	88
XXII	Mezcla tipo 1C	89
XXIII	Mezcla tipo 3A	90
XXIV	Mezcla tipo 3B	91

GLOSARIO

Aditivo	Compuesto químico que se agrega al concreto al momento del mezclado, para mejorar sus características y cualidades.
Caliza	Roca sedimentaria de precipitación química, formada por calcita, la cual está compuesta de carbonato de calcio, brillo vítreo y birrefringencia muy fuerte. Es usada para obtener agregado fino y grueso para el concreto.
Espécimen	Porción de concreto que se considera para mostrar las cualidades de la mezcla.
Granulometría	Graduación del tamaño de las piedras o granos que constituyen los agregados fino y grueso. Método para determinar dicho graduación.

Hormigonado	Colocación del concreto dentro de una formaleta. Sinónimo de fundición y de colado de concreto.
Mezcladora	Máquina con motor eléctrico o de combustible, formado por un tambor para mezclar los componentes de concreto.
Oquedad	Espacio vacío dentro del concreto. También se le llama ratonera.
Probeta	Tubo o vaso de cristal o plástico, generalmente graduado y con pie, utilizado para contener y medir líquidos.
Revenimiento	Asentamiento del concreto cuando se ensaya en el cono de Abrams.
Sangrado	Relación entre la cantidad de agua que aparece en la superficie de una muestra y la cantidad total contenida en el concreto colocado.
Segregación	Separación en mortero y agregado grueso, causada por el asentamiento de dicho agregado.
Viscosidad	Propiedad del concreto para adherirse sus agregados entre si.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación presenta lo concerniente a un concreto que, aunque no es muy aplicado en forma tradicional, es de suma importancia para la evolución estructural de grandes edificaciones como edificios, puentes, y otros.

Se presentan las normas y especificaciones que deben de regirse para cada uno de los materiales utilizados. Además se presenta distintas mezclas para 1 m³ de concreto, utilizando la realizada por Master Builders como base, pero sin la utilización de ceniza volante.

En la parte práctica, se realizaron distintas mezclas de comparación entre las que tenemos las comparaciones entre cantidades y tipos de cementos y otras, comparando las distintas arenas, de las cuales se ensayaron cilindros a 7, 28 y 56 días donde se obtuvieron resultados muy favorables.

El concreto de alta resistencia se obtiene en mayor escala, teniendo en cuenta que la relación de agua/cemento utilizada sea considerablemente baja.

OBJETIVOS

General

Evaluar concretos de alta resistencia utilizando cemento, agregados y aditivos locales en Guatemala.

Específicos

1. Dar a conocer todo lo correspondiente a concreto de alta resistencia.
2. Especificar normas que rigen este tipo de concreto.
3. Realizar mezclas con distintas proporciones para ofrecer un estudio comparativo.
4. Comparar ensayos a compresión de cilindros en distintas fechas para ver el avance evolutivo del comportamiento de la resistencia.
5. Establecer el comportamiento de las mezclas en los valores de resistencia del concreto de alta resistencia.

INTRODUCCIÓN

El concreto de alta resistencia (CAR), aunque es un material no utilizado fuertemente en el país, es de mucha aplicación en estos días. Cuando se habla de concretos de alta resistencia se dice que son aquellos cuya resistencia supera los 6,000 psi.(420kg/cm²).

Se entiende que por ser un concreto con características especiales en su desempeño, sus materiales deben tener un estricto control de calidad tanto en sus cantidades como en su mezclado, éste puede realizarse sin ninguna dificultad, siguiendo cada una de las normas que lo rigen.

El presente estudio pretende dar a conocer a la industria de la construcción todo lo relacionado a este tipo de concreto, es decir, sus características, ventajas, aplicaciones, materiales a utilizar, ensayos a practicarle (equipo, procedimiento y manejo de resultados), y las resistencias logradas con mezclas hechas con materiales de nuestro medio

Para la parte experimental se realizaron diferentes mezclas, tomando en cuenta algunos aditivos especiales que ayudan a la reducción de agua y así darle mejor manejabilidad al concreto, también se utilizó microsilice compactada como material cementicio para disminuir la relación de agua/cemento.

1. CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

1.1 Antecedentes históricos del concreto de alta resistencia

Si bien a menudo el concreto de alta resistencia es considerado relativamente un nuevo material, este fue desarrollándose durante estos últimos años. En la década de los 60 y 70 fue introduciéndose en el mercado de los edificios de gran altura de Chicago.

Se le llama concretos de alta resistencia por su elevada resistencia a la compresión que se tenía en comparación con los hormigones convencionales que sólo llegaban a una resistencia a la compresión de unos 15 a 20 MPa (150~200 Kg/cm²). Este concreto fue expandiéndose gradualmente, tanto que en 1997 ya se estaba utilizando alrededor de todo el mundo y despertando a su vez el interés de muchos investigadores por conocer mejor las propiedades de éste nuevo y especial súper-concreto.

En principio, la forma de obtención de una mayor resistencia era disminuir el índice de vacíos del hormigón, dicho de otra forma, una mayor compacidad de éste, lo cual se puede lograr disminuyendo la relación agua/cemento a los niveles mínimos para la hidratación un cemento, utilizando súper plastificantes y reductores de agua para obtener asentamiento inicial de unos 200 mm, pero sólo 75 a 100 mm puesta en obra. Por ello fueron incorporándose los retardadores de fraguado para tratar de mantener un mayor asentamiento en obra. (1-2)

A partir de esas primeras experiencias fueron aumentando los conocimientos de la relación entre la calidad de los agregados y la calidad del concreto: tamaño máximo de los agregados gruesos, módulo de finura de los agregados finos, el tipo de cemento utilizado, el tipo de súper plastificante utilizado y otros agregados que se fueron introduciendo en la elaboración del concreto, que hoy llega a resistencias superiores a los 100 MPa (1000 Kg./cm²), con la utilización de los súper plastificantes a base de polycarboxilatos, la sílica activa (humo de sílice), *filler* calizo, etc.

Un ejemplo de aplicación del concreto de alta resistencia de los últimos tiempos son las torres Petronas de Kuala Lumpur, el edificio más alto del mundo actualmente, con una altura de 451 metros. Construidas con el CAR, que le dieron una mayor rigidez a la estructura, comparada con las construidas con perfiles de acero, que disminuye la oscilación lateral.

Hay que destacar que además de la mayor resistencia a la compresión, también se ve mejorada su durabilidad en comparación del hormigón convencional, a la carbonatación, al ataque de cloruros, etc., por ello, se los denomina también concreto de alto desempeño (CAD). (8-1)

Se ha decidido presentar un trabajo de investigación sobre el concreto de alta resistencia, elaborado con cemento y agregados nacionales.

1.2. Definiciones

1.2.1 Concreto

También llamado hormigón, es una mezcla dosificada de agregados inertes, cemento y agua. El concreto de cemento Pórtland está formado por una parte activa (pegamento) pasta agua-cemento y una parte inerte (agregados). (7-48)

1.2.2 Cemento Pórtland

Es el aglomerante en una mezcla de concreto, actualmente se usan los denominados cementos Pórtland en sus distintos tipos. Este cemento es el resultado de pulverizar piedra caliza y arcilla, la cual se cuece en hornos a una temperatura de 1400 a 1600 grados centígrados, así se obtiene un material gris oscuro llamado clinker, el cual se muele mezclándole cierta cantidad de yeso, que sirve para retardar el fraguado de la mezcla.

Existen cinco tipos de cemento Pórtland, para diversos usos, los cuales son:

Tipo I Cemento Pórtland estándar: para concreto de uso normal, sin propiedades especiales.

- Tipo II Cemento Pórtland modificado: para concretos expuestos a ataques moderados de sulfatos, como en suelos y aguas subterráneas, que tienen un bajo contenido de sulfatos. Se usa en estructuras masivas, en donde la temperatura debe ser controlada durante el proceso de hidratación. Retarda el proceso de hidratación.
- Tipo III Cemento Pórtland de alta resistencia a edades tempranas: es usado cuando se requiere resistencia a edades tempranas y en lugares fríos.
- Tipo IV Cemento Pórtland de bajo calor: cuando el calor durante el proceso de hidratación debe ser mínimo, por ejemplo, las presas de concreto donde se colocan grandes volúmenes de concreto.
- Tipo V Cemento Pórtland de alta resistencia a sulfatos: se usa en concreto que estará expuesto a altas concentraciones de sulfatos, por ejemplo: tuberías de aguas residuales, plantas de tratamientos de aguas residuales etc. (7-50)

1.2.3 Agregados

Se definen como tales los materiales pétreos inertes resultantes de la desintegración natural de rocas o que se obtienen de la trituración de las mismas. Éstos ocupan típicamente las tres cuartas partes del volumen en el concreto, deben estar libres de suciedad, ser durables, y no deben tener sustancias que reaccionen químicamente con el cemento. Se clasifican en: agregado grueso (pedrín o grava) y agregado fino (arena).

La clasificación entre agregado fino y grueso se realiza basándose en su tamaño, de la siguiente manera: el fino tiene un diámetro menor al tamiz número 4 (4.76 mm), pero se recomienda que sea mayor que $74\ \mu\text{mm}$ y el agregado grueso que son las partículas de un tamaño mayor a 4.76 mm.

Según la clasificación de estos por su forma, tenemos: el canto rodado, proveniente de cauces de ríos, forma redondeada, producen concretos de buena calidad y de ventajas como trabajabilidad o docilidad. El agregado triturado, proveniente de la desintegración de rocas en cantera, tiene ventajas por su composición mineralógica más uniforme y cantos angulosos. (7-6)

1.2.4 Aditivo

Es el material que, aparte del cemento, los agregados y el agua empleados normalmente en la preparación del concreto, puede incorporarse antes de o durante la ejecución de la mezcla, con el objeto de modificar alguna o varias de sus propiedades en la forma deseada, aportando un volumen desestimable. Los hay de dos tipos: aditivos minerales y aditivos químicos.

1.2.5 Microsílices

Son un polvo muy fino, obtenido por decantación del humo de chimeneas de altos hornos de aleaciones metálicas de la industria del ferrosilicón, el cual está compuesto del 90% al 95% de dióxido de sílice amorfo y que tiene propiedades puzolánicas que le permiten reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio para formar un gel con notable incremento en las propiedades positivas del concreto, especialmente su resistencia en compresión y su durabilidad. (6-1)

1.2.5 Definición

El Comité 116 del American Concrete Institute define así a la microsilice: “una sílice no cristalina muy fina producida por hornos de arco eléctrico como un subproducto de la fabricación de silicio metálico o ferro silicio”.

1.2.5.2 Producción

Es un subproducto de la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón mineral, el cual es calentado a 2000 grados Centígrados en un horno de arco eléctrico durante la fabricación de aleaciones de ferrosilicio y silicio metálico, siendo la aleación recogida en el fondo del horno.

El cuarzo es calentado conjuntamente con carbón o madera, empleados para remover el oxígeno. Conforme el cuarzo se reduce a aleación, deja escapar vapores de óxido de silicio. En la parte superior del horno estos humos se oxidan en contacto con el oxígeno de la atmósfera y se condensan en microesferas de sílice amorfa.

1.2.5.3 Características de las microsilices

La microsilice es producida como un polvo ultra fino de color gris, el cual tiene las siguientes propiedades típicas:

- a.** Un contenido de por lo menos 90% de SiO_2
- b.** Partículas con tamaño promedio de 0.1-0.2 micrómetros
- c.** Superficie específica mayor de 15,000 m^2/kg

- d. Perfil esférico de las partículas
- e. Mínimo contenido de carbón

1.2.5.4 Empleo de microsílices en el concreto

Estas fueron inicialmente consideradas como un material de reemplazo del cemento y en algunas áreas ese es todavía su único uso.

En general, parte del cemento puede ser reemplazada por una cantidad menor de microsílíce. La adición de esta generalmente incrementa la demanda de agua. Si se desea mantener la misma relación agua/cementante, deberá usarse un aditivo reductor de agua.

Debido a su limitada disponibilidad y su alto precio, referido al cemento Portland u otras puzolanas o escorias, las microsílices han sido empleadas en forma creciente como un material para mejorar las propiedades del concreto, es decir, para proporcionar concretos con muy altas resistencias en compresión o con muy alto nivel de durabilidad.(6-2)

1.2.6 Aditivos químicos

El aditivo superfluidificante se empleó en combinación con un reductor de agua de alta eficiencia y retardador del fraguado, para mejorar así la plasticidad del concreto y controlar el tiempo de fraguado de la mezcla. (5-2)

1.3. Características que deben reunir los materiales

1.3.1 Selección de los materiales

Materiales de calidad son necesitados y las especificaciones requeridas para la producción. El concreto de alta resistencia ha sido producido usando un amplio rango de materiales de calidad, basado en resultados de pruebas de mezclas. (1-3)

1.3.1.1 Cementos

La elección del cemento Pórtland para concretos de alta resistencia es extremadamente importante, es por eso que se le debe brindar la mayor atención antes y durante la construcción de la estructura respectiva, además, dentro de un tipo de cemento de marcas diferentes, tendrán distintas características y debido a la variaciones en los compuestos y la fineza que son permitidos. (1-3)

Es muy importante que el cemento empleado tenga una elevada resistencia y uniformidad. Cementos tipo I o II de conformidad con ASTM C150, tipo IP, I(PM) o IS, los cuales cumplen con las especificaciones ASTM C595 y son cementos mezclados con porcentajes fijos de puzolanas o escorias. Y $f'c$ mayores de 10,000 psi (700 kg/cm²), sin embargo, estas proporciones fijas de puzolanas podrán o no ser aptos para un rendimiento óptimo de resistencia.

La cantidad de cemento por m^3 que se utilizará en la mezcla debe ser determinada mediante cilindros de prueba. Estos contenidos generalmente están comprendidos entre los 400 y 550 $Kg./m^3$, aunque se han realizado estudios con contenidos mayores.

1.3.1.2 Agregados

Ambos, tanto el agregado fino como el agregado grueso, son usados para este tipo de concreto, con una reunión mínima en los requerimientos de ASTM C33.

1.3.1.2.1 Agregado fino

Agregados con formas de las partículas redondas y la textura lisa se han encontrado para requerir menos agua en el mezclado de concreto, por esta razón es preferible en concreto de alta resistencia. Se acepta habitualmente que el agregado fino causa un efecto mayor en las proporciones de la mezcla que el agregado grueso. Los primeros tienen una mayor superficie específica y como la pasta tiene que recubrir todas las superficies de los agregados, el requerimiento de pasta en la mezcla se verá afectado por la proporción en que se incluyan éstos.

La óptima graduación en el agregado fino para este concreto es determinada más por su efecto en requisito de agua que en su embalaje físico. Un informe declaró que un poco de arena con un módulo de fineza debajo de 2.5 dio una consistencia pegajosa al concreto y lo hacen difícil de compactar. Arena con un módulo de finura de aproximadamente 3 dio mejor trabajabilidad y mejor resistencia a compresión.

La granulometría del agregado fino tiene, entonces, un rol importante, por ejemplo, un exceso en el pasante de los tamices N° 50 y N° 100 incrementará la trabajabilidad pero se hará necesario aumentar el contenido de pasta para cubrir la mayor superficie de estas partículas, además de generar el riesgo de tener que incluir más agua a la mezcla y deben evitarse mica y contaminantes de la arcilla.

1.3.1.2.2 Agregado grueso

Muchos estudios han mostrado que para la fuerza de compresión óptima con el volumen de cemento alto y las proporciones de agua-cemento bajas, el tamaño del agregado grueso debe ser guardado a un mínimo, a $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm) o $\frac{3}{8}$ " (9.5 mm); el tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " (19.0 mm) y 1" (25.4 mm) también es usado con éxito.

El incremento en la resistencia a medida que disminuye el tamaño máximo del agregado se debe a una reducción en los esfuerzos de adherencia, debido al aumento de la superficie específica de las partículas. Se ha encontrado que la adherencia a una partícula de 76 mm. es apenas un 10% de la correspondiente a una de 12,5 mm., y que excepto para agregados extremadamente buenos o malos, la adherencia es aproximadamente entre el 50 a 60% de la resistencia de la pasta a los 7 días.

También se ha demostrado que la piedra triturada produce altas resistencias, que a comparación de la piedra de canto rodado, sin embargo, se debe evitar una angulosidad excesiva debido al aumento en el requerimiento de agua y disminución de la trabajabilidad a que esto conlleva.

1.3.1.3 Agua

El riego de agua para concreto se especifica para ser de calidad potable, esto es ciertamente conservador pero normalmente no constituye un problema puesto que la mayoría de veces se produce concreto cerca de un suministro de agua municipal. (1-6)

1.3.1.4 Aditivos químicos

Los aditivos son ampliamente usados en la producción de concretos de alta resistencia. Estos materiales incluyen agentes incorporadores de aire, químicos y aditivos minerales.

La selección de tipo de marca, tipo de dosificación de todos los aditivos (mezclas) debe basarse en el funcionamiento con los otros materiales, siendo considerados o seleccionados por uso en el proyecto. Aumentos significantes en resistencias compresivas, control de la velocidad de endurecimiento, ganancia acelerada de resistencia, mejoramiento de trabajabilidad y durabilidad son contribuyentes que pueden esperarse de los aditivos electos. (5-3)

1.3.1.4.1 Incorporadores de aire

El uso de incorporadores de aire es recomendado para realizar durabilidad y deberá cumplir con la norma ASTM C260, cuando el concreto esté sujeto a congelamiento y descongelamiento, mientras esté mojado y que la resistencia a compresión aumente y la relación de agua/cemento disminuyan, además de que los parámetros de vacíos mejoren. Los incorporadores de aire tienen el efecto de reducir la resistencia particularmente en mezclas de alta resistencia y por esta razón se ha utilizado sólo donde hay interés de durabilidad.

1.3.1.4.2 Retardadores

Estos deberán cumplir con la norma ASTM C494, tipos B o D, los cuales en el diseño de mezclas de alta resistencia incorpora altos factores de cemento que no son comunes para el normal concreto comercial. Un retardador es frecuentemente beneficioso en el control de hidratación temprana, puede controlar la velocidad de endurecimiento en las formas para eliminar empalmes fríos y proporciona más flexibilidad en los horarios de colocación.

Desde que los retardadores proporcionan frecuentemente un aumento en la resistencia, la cual será proporcional al tipo de dosificación, mezclas pueden ser diseñadas a diferentes dosis, si se espera que se usarán proporciones significativamente diferentes. Sin embargo, hay usualmente un efecto de compensación que minimiza las variaciones en resistencias debido a la temperatura.

Como la temperatura aumente, después la duración de la resistencia bajará; sin embargo, un incremento en la dosificación del retardador para controlar la velocidad de endurecimiento proporcionara un poco de mitigación de la reducción de temperatura inducida. Contrariamente, las dosificaciones deben ser disminuidas como las temperaturas bajen. (5-4)

Mientras se proporcione retardación inicial, las resistencias de 24 horas en adelante son usualmente aumentadas por dosificaciones normales, retardación prolongada o temperaturas frescas pueden afectar rápidamente (24 horas) resistencias adversamente.

1.3.1.4.3 Reductores de agua

Según la norma ASTM C494 tipo A, aditivos del fraguado normal convencional agua-reductor proporcionará aumentos de resistencias sin alterar las velocidades de endurecimiento. Su elección deberá basarse en función de la resistencia. Aumentos en la dosificación por encima de la cantidad normal generalmente incrementará las resistencias pero puede extender tiempos de fraguado.

1.3.1.4.4 Reductores del agua de rango alto

En los requerimientos ASTM C494 tipos F y G, alta reducción de agua proporciona funciones de alta resistencia, particularmente al principio (24 horas). También conocidos como súper-plastificantes o superfluidificantes.

Las nuevas generaciones de súper-plastificantes no sólo pueden reducir el contenido de agua hasta un 40% sino que además pueden transformar el concreto de alta resistencia en un concreto muy manejable de alto asentamiento; concreto con A/C tan bajo como 0.24 de asentamientos hasta 11”.

Las partículas de cemento Pórtland tienen una marcada tendencia a flocular cuando se mezclan con agua, esto se debe a varios tipos de interacciones, el proceso de floculación conlleva a la formación de una red abierta de partículas. Las redes de los huecos pueden atrapar parte del agua, la cual entonces no está disponible para la hidratación superficial de las partículas de cemento y para la fluidificación de la mezcla.

Para lograr una distribución homogénea del agua y un contacto óptimo del agua-cemento, las partículas del cemento deben estar apropiadamente de floculadas y mantenerse en un estado de alta dispersión.

El superfluidificante es muy efectivo en la de floculación y dispersión de las partículas de cemento, son aditivos altamente eficientes cuando se utilizan adecuadamente, por medio de él es posible:

- Aumentar la trabajabilidad del hormigón sin adición de agua.
- Dispersar las partículas del cemento de tal forma que los hormigones puedan fabricarse usando menos agua de la necesaria para una completa hidratación de la pasta.

- Se pueden producir pastas de cemento hidratado lo suficientemente estables y densas para unirse fuertemente a los agregados y al acero de refuerzo, para producir un material compuesto muy resistente.
- Hacer hormigones tan densos que pueden ser más resistentes y durables que muchas rocas naturales. (5-5)

1.3.1.5 Aditivos minerales

Se han utilizado en los concretos de alta resistencia adiciones minerales muy finas consistiendo éstas principalmente en cenizas volantes y microsílíce.

Por medio de estas adiciones minerales de extrema finura y químicamente reactivos, se logran llenar los microvacíos del empaquetamiento granular conformado por agregados y cemento, mejorando la compacidad del material y a la vez, las propiedades de la mezcla fresca.

Se deduce aquí que la cantidad de agua necesaria puede ser reducida mejorando la resistencia del hormigón. Por otra parte, estas adiciones reaccionan a mediano y largo plazo con el hidróxido de calcio producido en la hidratación del cemento Pórtland, dando como resultado compuestos de mucha mayor resistencia

1.3.1.5.1 Ceniza volante

Esta ceniza se divide para su utilización en dos clases: ceniza volante de clase F. Ésta se produce normalmente de la combustión de la antracita o carbón bituminoso, la cual posee propiedades puzolánicas, pero poca o ninguna propiedad cementicia.

La ceniza volante de clase C resulta de la combustión de la lignita o carbón subbituminoso, la cual además de las propiedades puzolánicas, posee propiedades cementicias autógenas.

Las variaciones de las propiedades físicas o químicas de estas adiciones minerales, aún dentro de las tolerancias de las especificaciones, pueden causar cambios apreciables en las propiedades de los CAR.

Es muy importante que a estas adiciones minerales se les realice ensayos de aceptación y uniformidad, se investiguen minuciosamente sus propiedades en el desarrollo de resistencias y su compatibilidad con los otros materiales de la mezcla de hormigón, antes de su utilización en la estructura respectiva. (1-5)

1.3.1.5.2 Microsílice

El humo de sílice, llamado también microsilice, y los aditivos que lo contienen han sido utilizados en concretos para propósitos estructurales, aplicaciones superficiales y como material de reparación en situaciones en donde se requiere resistencia a la abrasión y baja permeabilidad.

La microsíllice es una puzolana altamente reactiva que puede ser usada como aditivo de 5% - 15 %, por peso de cemento y puede aumentar significativamente la resistencia. Es utilizado con frecuencia con ceniza volante o cementos de escoria además del cemento Pórtland. La microsíllice es un material que se ofrece en diferentes formas: densificada, como una lechada o mezclada con cemento.

La microsílíce no densificada es muy voluminosa y polvorienta debido a su extrema finura. La que es en lechada contiene a grosso modo un 50 % de agua y cuando está en reposo necesita ser agitada para que el material no se gelifique o precipite. La microsílíce densificada (también llamada compactada) está disponible y se usa ampliamente y no contiene agua ni aditivos o químicos y no crea molestias a causa del polvo.

1.3.1.5.3 Cemento de escoria

Este cemento se fabrica cuando existen altos hornos para la producción del acero. La escoria apropiada para el hormigón es un producto no metálico que se desarrolla en la fundición simultáneamente con el acero en un alto horno.

Correctamente apagada y procesada, la escoria actuará hidráulicamente en el hormigón en reemplazo parcial del cemento Pórtland. La escoria puede ser molida junto con el cemento o utilizada como material adicional. La investigación en uso de estas escorias ha demostrado un futuro muy promisorio para su utilización en concretos de alta resistencia. (5-3)

1.4. Especificaciones y normas

Existe una cantidad de normas aplicables en los materiales y procedimientos de los concretos de alta resistencia entre las que tenemos,

Reporte de ACI

- ACI 363R-92 State-of-the-Art Report on High –Strength Concrete

Para cemento a utilizar

- ASTM C 150
“Especificación normal para cemento Pórtland”.
- ASTM C595
“Especificación normal para mezclado de cemento hidráulico”

Agregados

- ASTM C33
“Especificación normal para agregados del concreto”.

Aditivos

- ASTM C 1240
“Uso de humo de sílice como mezcla mineral en concretos de cemento hidráulico, morteros y lechadas “
- ASTM C618
“Especificación normal para carbón, cenizas volantes, puzolanas naturales calcinadas para uso como minerales en mezclas de concreto”
- ASTM C260 incorporadores de aire
- ASTM C494 Tipos A,B, o D Reductores de agua controladores del tiempo
- ASTM C494 Tipos F o G Reductores de agua de rango alto

Especímenes de prueba

- ASTM C172

- ASTM C470
- ASTM C31

Curado inicial y transporte

- ASTM C31

Sistema de refrentado

- ASTM C1231
- ASTM C617

Equipo de prueba

- ASTM C39

2. MEZCLAS

2.1 Proporciones de mezclas de concreto

Las proporciones de mezcla para un concreto de alta resistencia son de un proceso más crítico que el diseño de mezclas normales. Generalmente es considerado esencial emplear puzolanas seleccionadas y aditivos químicos para lograr una relación de agua/cemento baja. A menudo se exigen muchos ensayos de prueba para que el laboratorista identifique cual es la proporción de mezcla más óptima.

2.1.1 Proporciones de agregados

Los agregados han sido una consideración muy importante desde que ocupan el volumen más grande de cualquiera de los otros materiales en el concreto.

2.1.1.1 Agregados finos

En proporción, una mezcla de concreto, un agregado fino o arena tiene considerablemente más impacto en proporciones de la mezcla que un agregado grueso. El área de superficie de todas las partículas de agregados deberá cubrirse con una pasta de cemento, la proporción de agregado fino a grueso puede tener un efecto cuantitativo directo en requisitos de la pasta.

La graduación en el agregado fino tiene un papel importante en obra con respecto a la plasticidad o el endurecimiento del concreto. Bajos volúmenes de agregado fino con volúmenes de agregado grueso alto producen una reducción en requisitos de pasta y normalmente esto resulta más barato.

La consolidación por medio de los vibradores mecánicos puede ayudar a superar los efectos de una mezcla segregada. Las partículas que forman la textura de la superficie de los agregados finos pueden tener un gran efecto en los requisitos de mezclado de agua. (1-6)

2.1.1.2 Agregados gruesos

La cantidad óptima y tamaño de agregado grueso para una arena dada dependerán en gran parte de las características mismas de la arena; particularmente, depende del modulo de fineza, esto sale específicamente de la tabla 1 que se toma del ACI 211.1.

En principio, el incremento en la resistencia a medida que disminuye el tamaño máximo del agregado se debe a una reducción en los esfuerzos de adherencia, debido al aumento de la superficie específica de las partículas.

Una referencia sugiere que la proporción de agregado grueso mostrada en la tabla pudiera aumentarse por 4 por ciento en arena con volúmenes nulos bajos usados. Si las partículas de arena son muy angulares, entonces se sugiere que la cantidad de agregado grueso deba disminuirse por 4 por ciento de valores en la tabla. Tales ajustes se han pensado en la proporción de agregado grueso y arena que producirían hormigones de trabajabilidad equivalente, aunque tales cambios alterarían la demanda de agua para obtención de asentamientos.

Tabla I. Volumen de agregado grueso

Máximo tamaño de agregado (pulgadas)	Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finesa de arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.82	0.80	0.78	0.76
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Realizada de ACI 211.1

Las cantidades sugeridas para el agregado grueso de la tabla se recomiendan para iniciar el proporcionamiento. Deben darse consideraciones a las propiedades de la arena que puede alterar la cantidad de agregado grueso. Las herramientas mecánicas para manejar y colocar el concreto han ayudado a disminuir la proporción de arena necesitada. Es de recordar que el uso de los tamaños más pequeños de agregados gruesos es más beneficioso para unirlos con la pasta cementicia.

2.1.2 Relación agua/cemento (A/C)

La relación entre la proporción de agua/cemento y la resistencia a compresión que se ha identificado en concretos de resistencia baja, ha resultado también ser válida para concretos de resistencia más alta. Los volúmenes de cemento más altos y los volúmenes de agua más bajos han producido resistencias más altas. Proporcionando grandes cantidades de cemento en la mezcla de concreto, también tiene, sin embargo, aumento en la demanda de agua de la mezcla. (1-8)

Por supuesto que el asentamiento en el concreto se relaciona a la proporción agua/cemento y a la cantidad de agua en el concreto. El uso de reductores de agua de alto rango genera proporciones de A/C más bajas y las depresiones más altas. Las proporciones de A/C para concretos de alta resistencia típicamente han ido de 0.27 a 0.50. Las cantidades de mezclas líquidas, reductores de agua de alto rango, particularmente han sido incluidos en las proporciones A/C. ACI 3.4.1

2.1.2.1 Contenido de cemento

Evaluando volúmenes de cemento óptimos, se proporcionan normalmente mezclas del ensayo para igualar consistencias y permiten el volumen de agua según la demanda de la mezcla. Para cualquier proporción dada de materiales en una mezcla de concreto, puede haber un volumen de cemento que produce la máxima resistencia. (1-10)

Idealmente, las evaluaciones de cada fuente potencial de cemento, ceniza volante, mezclas líquidas y agregados en concentraciones variantes, indicarían el volumen de cemento óptimo. La eficiencia de resistencia en el cemento variará para los diferentes tamaños de agregados máximos, se logran eficiencias de cemento más alta a niveles de resistencia con más bajos tamaños de agregados.

La resistencia del concreto puede disminuir si el cemento se agrega por encima de un volumen óptimo, la cantidad deseable de cemento puede variar y puede depender considerablemente en los agentes, como reductores de agua de alto-rango, previniendo flacidez de partículas de cemento. La tenacidad y la pérdida de trabajabilidad serán aumentadas con cantidades mas altas de cemento en la mezcla. Combinaciones de cemento, puzolanas y arena deben evaluarse para efecto de contenidos cementicios.

Mezclas ricas en cemento frecuentemente tienen demandas muy altas de agua, por consiguiente, es posible que esa precaución especial sea necesaria para proporcionar adecuado curado de agua. (1-10)

2.1.3 Proporciones de aditivos

Aproximadamente todos los concretos de alta resistencia contienen aditivos. Cambios en las cantidades y combinaciones de aditivos afectan las propiedades de plasticidad y endurecimiento de estos concretos; es por eso que se le debe dar especial atención a los efectos que producen.

Aditivos puzolanicos son a menudo usados como un reemplazo de cemento, en estos concretos han suplido el cemento Pórtland de 10 a 40 por ciento por peso del contenido del cemento. El uso de ceniza volante ha causado a menudo una reducción ligera en la demanda de agua de la mezcla, y esa reducción en el volumen de agua se ha compensado por la adición de arena. Lo opuesto se ha encontrado para otras puzolanas. Las microsílices, por ejemplo, dramáticamente incrementan la demanda de agua de la mezcla, lo que requiere el uso de aditivos retardadores y súper plastificante.

Generalmente la tendencia ha sido emplear cantidades mayores que la normal o máxima de reductores de agua y retardadores. Así, reducciones típicas del 5% al 8% pueden incrementarse al 10%. Un correspondiente incremento en el contenido de arena se ha hecho para compensar la pérdida de volumen debida a la reducción del agua en la mezcla.

Los ajustes en los concretos empleando reductores de agua de alto rango, también conocidos como superplastificantes, son similares a aquellos cuando se emplean reductores de agua convencionales. Los ajustes suelen ser aproximadamente 12% s 25%. Se ha efectuado el correspondiente incremento en el contenido de agregado fino para compensar la pérdida de volumen debido a la reducción de agua en la mezcla.

Dada a la relativamente grande cantidad de líquido que es añadida a la mezcla en forma de aditivos superplastificantes, el peso de éstos deberá ser considerado en el cálculo de la relación agua/ material cementante.

Tabla II. Proporción de mezcla

Diseño (1 m³)	
Cemento	534 Kg
Ceniza volante, Clase F	43 Kg
Microsilice compactada	37 Kg
Agregado de 1"	1091 Kg
Arena natural	548 Kg
Agua	153 Lts
Aditivo Tipo D	0.81Lts
Aditivo Tipo F, 3a Gene	9.86 Lts
Relacion agua/cementante	0.25
Asentamiento	9-11"
Resistencia @ 56 días	100MPa=1021Kg/cm²
Módulo de elasticidad	42 GPa

**Fuente: Mezcla bajo la dirección de Eckart Bühler de
Master Builders Technologies**

2.2 Resistencias requeridas

Habitualmente, el concreto se proporciona de tal manera que el promedio de los resultados de la resistencia exceda a la especificada en una cantidad suficientemente alta. En los concretos de alta resistencia se nota una alta variabilidad en los resultados de los ensayos, esto se debe a que es más difícil ensayar éste concreto que uno convencional.

La selección de las proporciones de la mezcla puede ser influenciada por la edad a la que se ensayará el hormigón. Esta edad varía dependiendo de los requerimientos de la construcción respectiva. (1-8)

En general, se prefiere determinar edades de ensayo mayores a los 28 días, para aprovechar el aumento de resistencia a largo plazo característico de estos concretos. (1-8)

2.3 Preparación, mezclado, transporte y colocación de mezclas

La preparación, mezclado, transporte, colocación y procedimientos de control para los concretos de alta resistencia, en principio, son similares a los utilizados para el hormigón convencional, así que se pueden seguir los mismos lineamientos. Sin embargo, es necesario puntualizar ciertos aspectos: el de mantener el contenido unitario de agua de la mezcla se torna crítico en estos concretos, ya que ligeras variaciones en el incremento de ésta repercute en pérdidas grandes de resistencia.

También, por causa de los altos contenidos de cemento involucrados, hay que tener en cuenta las recomendaciones de orden térmico. Además, la producción y control de los hormigones requiere de personal calificado.

Parte de la preparación previa es también el control, manejo y almacenamiento de los materiales. La correcta medición y pesaje son esenciales para obtener buenos resultados. Para mantener la relación agua-cemento necesaria para el desarrollo de alta resistencia se debe realizar determinaciones lo más precisas posibles de la humedad de los agregados. (1-16)

2.3.1 Mezclado

Los concretos de alta resistencia pueden ser mezclados totalmente en la planta, en un camión mezclador o en una combinación de ambos. En general, se deben seguir las recomendaciones de ACI 304.

2.3.1.1 Tiempo de mezclado

El tiempo de mezclado requerido está limitado por la eficacia de la mezcladora para producir un pastón correcto. Según normas y recomendaciones generales, se debe mezclar 1 minuto por cada 0.75 m³ más ¼ de minuto por cada 0.75 m³ de capacidad adicional. Por otra parte, se puede establecer el tiempo de mezclado basándose en los resultados obtenidos en pruebas de eficiencia.

2.3.1.2 Procedimiento de mezclado

Cuando el parámetro más importante por obtener es alta resistencia a la compresión, es conveniente emplear bajas relaciones agua/cemento, cuidando esencialmente la trabajabilidad del concreto y, en consecuencia, su revenimiento. En términos generales, el procedimiento de mezclado requiere, entre otros factores, mezclado previo del cemento y del agua con una revolvedora de alta velocidad, uso de aditivos, empleo de agregados cementantes, periodo más largo de curado, de ser posible con agua, compactación del concreto por presión y confinamiento del concreto en dos direcciones.

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

Algunos investigadores usan como técnicas para la producción de concretos de alta resistencia su composición, una alta velocidad de mezclado y revibrado, y eventualmente la adición de algún aditivo para incrementar la resistencia del concreto.

De acuerdo con lo anterior, para las preparaciones de mezcla de los concretos de alta resistencia se debe considerar lo siguiente:

- Elección del asentamiento, si no se ha especificado previamente.
- Selección del tamaño máximo del agregado.
- Estimación del contenido de agua.
- Elección de la relación agua/cemento o agua/materiales cementicios.
- Cálculo del contenido de materiales cementicios.
- Estimación del contenido de agregado grueso.
- Estimación del contenido de agregado fino.
- Ajuste por humedad y absorción de agregados.
- Ajuste en los pastones de prueba.

2.3.2 Transporte

Puede ser transportado por distintos equipos, cada método tiene sus ventajas y desventajas, dependiendo de la localización de la obra, de la facilidad de ingreso a la misma, clima, etc. y estas circunstancias deben ser tenidas en cuenta al momento de decidir el tipo de transporte a usar. (1-17)

2.3.3 Colocación

Antes de empezar la colocación del hormigón se debe tener en cuenta el hecho de que el tiempo para manipular será más reducido que lo habitual, por lo que una correcta planificación del cronograma de hormigonado y disponibilidad de los equipos será indispensable.

El concreto debe descargarse lo más próximo al lugar donde quedará definitivamente, se pueden usar carretillas, carritos, baldes de todo tipo y cubetas, entre otros equipos. Habrá que tener en cuenta que una permanencia larga del concreto en dichos recipientes hará más dificultosa su descarga por causa del alto contenido de cemento y mayor cohesión.

La manera más efectiva de compactar el concreto de alta resistencia es mediante vibración interna.

2.3.4 Curado

El curado es el proceso necesario para mantener el contenido de humedad adecuado y la temperatura favorable en el hormigón durante el período de hidratación de los materiales cementicios, para que así se puedan desarrollar completamente las propiedades del concreto deseadas.

El curado, si es esencial en la producción del concreto convencional de calidad, es notoriamente crítico en la producción de los concretos de alta resistencia. La resistencia potencial necesaria y la durabilidad del concreto se desarrollarán por completo, solamente si es curado correctamente durante un período adecuado antes de ponerlo en servicio. (1-18)

Se usan diversos tipos de curado: mediante inundación superficial, con mantos húmedos o con cubiertas que impidan la evaporación del agua; el más aconsejable, sin embargo, es el curado con agua debido a las bajas relaciones agua/cemento de los CAR.

Tabla III. Proporciones de mezcla de algunos concretos de alta resistencia

Ingrediente, Kg/m ³	Mezclas								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Cemento Pórtland	534	500	315	513	163	228	425	450	460
Humo de sílice	40	30	36	43	54	46	40	45	**
Ceniza volante	59	**	**	**	**	**	**	**	**
Ggbs	**	**	137	**	325	182	**	**	**
Agregado fino	623	700	745	685	730	800	755	736	780
Agregado grueso	1069	1100	1130	1080	1100	1110	1045	1118	1080
Agua total	139	143	150	139	136	138	175	143	138
Relación A/C	0.22	0.27	0.31	0.25	0.25	0.3	0.38	0.29	0.3
Revenimiento, mm.	255	**	**	**	200	220	230	230	110
Resistencia de cilindros MPa a la edad de días									
1	**	**	**	**	13	19	**	35	36
2	**	**	**	65	**	**	**	**	**
7	**	**	67	91	72	62	**	68	**
28	**	93	83	119	114	105	95	111	83
56	124	**	**	**	**	**	**	**	**
91	**	107	93	145	126	121	105	**	89
365	**	**	**	**	136	126	**	**	**

Información de mezclas: (A) Estados Unidos; (B) Canadá; (C) Canadá; (D) Estados Unidos; (E) Canadá, (F) Canadá; (G) Marruecos; (H) Francia; (I) Canadá. Basados según el Instituto Mexicano del Cemento y Concreto (IMCYC).

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto (IMCYC), “Concretos con Propiedades particulares”, Pág 477.

3. PROPIEDADES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

3.1 Propiedades del concreto

Los concretos de alta resistencia tienen algunas características y propiedades que son diferentes de las de los concretos de menor resistencia. Los cambios internos resultantes de cargas sostenidas y términos más cortos, así como las condiciones ambientales diferentes los hace distintos.

Directamente relacionadas a esas diferencias internas están las distinciones en las propiedades mecánicas, las cuales deberán ser reconocidas por el diseñador. Estas distinciones se incrementan significativamente conforme la resistencia aumenta. (1-22)

3.1.1 Módulo de elasticidad

En 1934, se informó de los valores por el módulo de elasticidad determinado, como la cuesta de la tangente a la curva esfuerzo-deformación uniaxial de compresión a 25 por ciento de tensión del máximo de 29GPa a 36GPa para hormigones que tienen resistencias a compresión que van de 69MPa a 76Mpa. Muchos otros investigadores han informado valores por el módulo de elasticidad de concreto de alta resistencia solidifica del orden de 31 a 45 GPa, que dependen principalmente del método de determinar el módulo. Una comparación de valores determinados experimentalmente para el módulo de elasticidad son aquellos por la expresión dada de ACI 318, Sección 8. 5 para concretos de resistencia baja, y se basó en un peso de la unidad seco de 2346 kg/m³.

Una correlación entre el módulo de elasticidad E_c y el f'_c de fuerza de compresión para concretos de peso normales se informó en referencias como:

Figura 1. Cálculo módulo de elasticidad

$$E_c = 40000 \sqrt{f'_c} + 1000000 \text{ psi}$$

Para $3000 \text{ psi} \leq f'_c \leq 12000 \text{ psi}$

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \text{ MPa}$$

Para $21 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 83 \text{ MPa}$

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad
 f'_c = Resistencia a compresión del concreto

Referencia: ACI 363R-92, Pág.23

En el caso de estos concretos con una alta resistencia a compresión muy temprana, existe la posibilidad de que, a causa de una cantidad limitada de hidratación, la adherencia entre el agregado y la matriz no se desarrolle proporcionalmente. En consecuencia, con resistencia alta a edades muy tempranas, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad es probable que sea más bajo de lo que se esperaría de las relaciones usuales entre estas propiedades y la resistencia a compresión. (1-23)

La deformación elástica del concreto es de interés particular, puesto que el módulo de elasticidad de la pasta muy resistente de cemento endurecido y del agregado difieren menos uno de otro que en el concreto de resistencia media, además porque el concreto de alta resistencia es más monolítico y la resistencia de la interfase de agregado y matriz es más alta.

9.1.1 Módulo de ruptura

Los valores informados por varios investigadores para el módulo de ruptura de peso ligero y el peso normal del concreto de alta resistencia caen en el rango de $7.5 \sqrt{f_c}$ a $12 \sqrt{f_c}$, donde ambos el módulo de ruptura y la resistencia de compresión se expresa en psi. La ecuación siguiente fue recomendada para la predicción de la resistencia de tensión de concreto de peso normal como medido por el módulo de ruptura f_r de la resistencia de compresión, como se muestra en la figura 2. (1-23)

Figura 2. Cálculo módulo de ruptura

$$f_r = 11.7 \sqrt{f_c} \text{ psi}$$

Para $3000 \text{ psi} \leq f_c \leq 12000 \text{ psi}$

$$f_r = 0.94 \sqrt{f_c} \text{ Mpa}$$

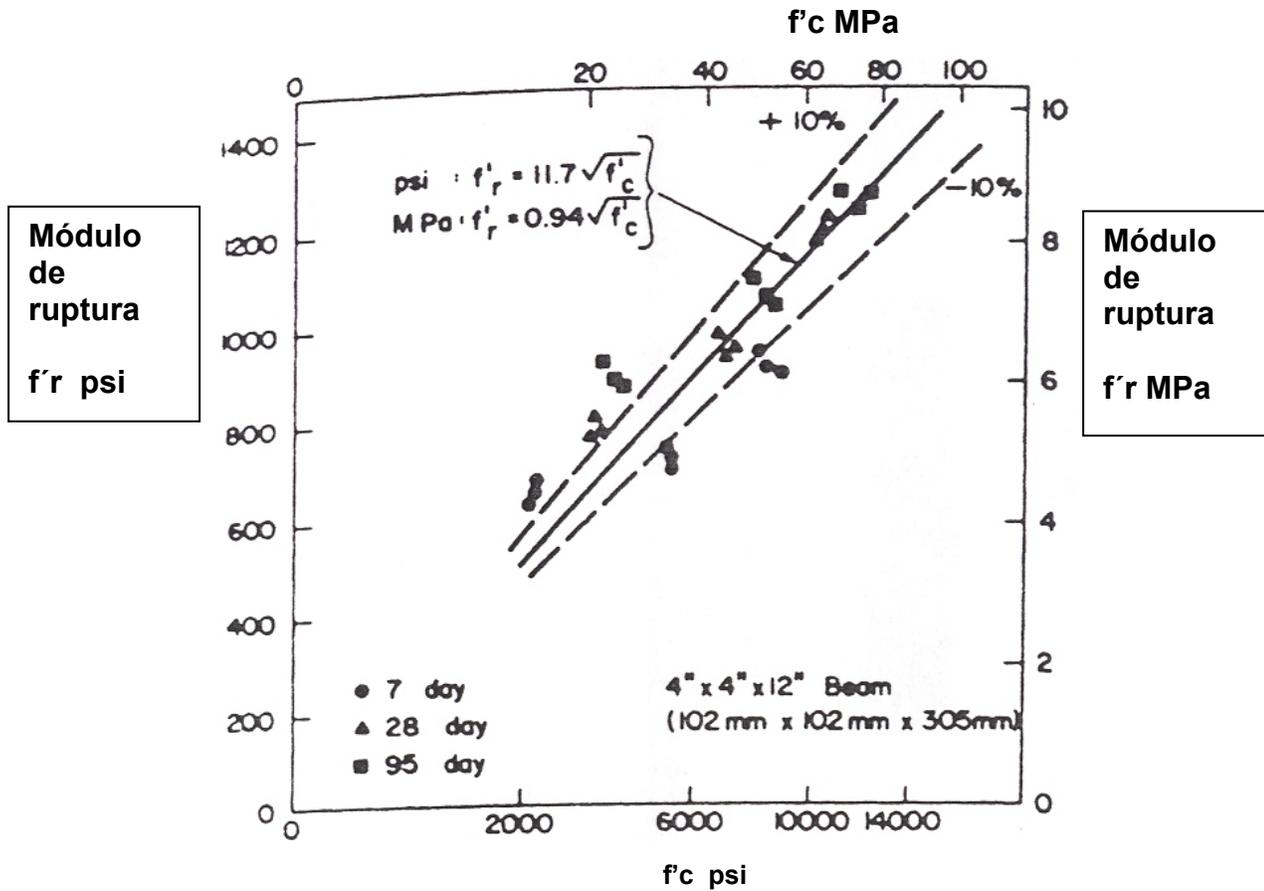
Para $21 \text{ MPa} \leq f_c \leq 83 \text{ MPa}$

Donde:

f_c = Módulo de ruptura
 f_c = Resistencia a compresión del concreto

Referencia: ACI 363R-92, Pág.23

Figura 3. Resistencia a tensión vrs módulo de ruptura



Referencia: ACI 363R-92, Pag.25

3.1.3 Resistencia de fatiga

Los datos disponibles en la conducta de fatiga de concreto de alta resistencia son muy limitados. Estudios muestran que de la resistencia de fatiga en compresión axial de concreto de alta resistencia, con unos cubos de 102 mm a fuerza de compresión de 76.9 Mpa, se encontró que después de un millón de ciclos, la resistencia de especímenes sujeta a carga repetida varió entre 66 y 71 por ciento de la resistencia estática para un nivel de tensión mínimo de 1250 psi (8.6 MPa). Los valores más bajos se encontraron para el concreto de alta resistencia y para concreto hecho con los tamaños más pequeños en el agregado grueso, pero la magnitud real de la diferencia fue pequeña. (1-25)

3.1.4 Unidades de peso

Los valores moderados de la unidad de peso de concretos de alta resistencia son ligeramente más altos que el de concreto de bajas resistencia, realizados con los mismos materiales. (1-25)

3.1.5 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas del concreto dependen de diversos factores tales como cantidad de cemento, relación agua/cemento, utilización de agregados ligeros y de la cantidad de aire incorporado.

Mientras mayor sea la relación agua/cemento, más aislante es la estructura, de la misma manera, mientras mayor es la incorporación de agregados ligeros aislantes, mayor es el aislamiento térmico.

Las propiedades térmicas de estos concretos de alta resistencia caen dentro del rango aproximado que el de los concretos de resistencia baja. Las propiedades térmicas del concreto endurecido que tienen importancia son tales como la conductividad térmica, calor específico, difusividad térmica y el coeficiente de expansión térmica.

La conductividad térmica es la razón a la que pasa el calor a través de un material de área y espesores unitarios, en donde se tiene un cambio unitario en la temperatura entre las dos caras del material. (1-25)

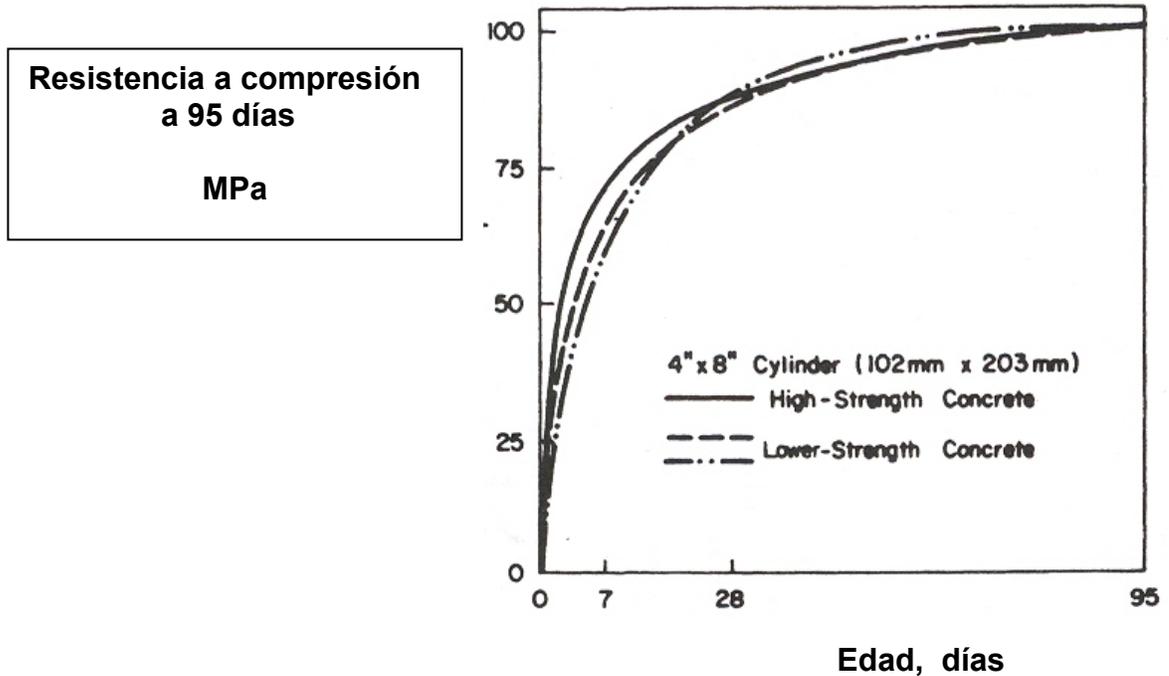
El levantamiento de temperatura dentro del concreto debido a la hidratación depende del volumen de cemento, proporción de agua/cemento, el tamaño del miembro, temperatura del ambiente, el entorno, etc.. El levantamiento de calor de concretos de alta resistencia será aproximadamente 6 a 8 grados centígrados por 59 kg/ m³ de cemento.

3.1.6 Resistencia con relación de edad

El concreto de alta resistencia muestra una proporción más alta de aumento de resistencia a edades tempranas comparadas con concreto de resistencias más bajas, pero en edades más tarde, la diferencia no está en la resistencia del concreto y varía entre 0.70 a 0.75 para concretos de resistencia más bajo, mientras otros investigadores encontraron proporciones típicas de 7 días a 95 días la resistencia varía de 0.60 para resistencia baja, 0.65 para resistencias medias, y 0.73 para resistencias altas de concreto.

Probablemente, la proporción más alta de desarrollo de resistencia de estos concretos a edades tempranas es causada a través de, primero, un aumento en la temperatura interior del curado de los cilindros de concreto debido a un calor más alto de hidratación y, segundo, por la más corta distancia entre las partículas hidratadas, debido a las bajas proporciones de la relación agua/cemento. (1-25)

Figura 4. Resistencia a compresión vrs edad concreto



Referencia: ACI 363R-92, Pag.25

3.2 Consideraciones y aplicaciones en el diseño

Este concreto tiene algunas características y propiedades de ingeniería que son diferentes de aquellos concretos de baja resistencia. Cambios internos resultan de un periodo corto, de cargas sostenidas y factores del ambiente que son conocidos por ser diferentes. Directamente relacionada a estas diferencias interiores son las distinciones en propiedades mecánicas que deberían estar reconocidas por los ingenieros de diseño en precaución a la presentación y seguridad de las estructuras. (1-29)

Pruebas de concreto de alta resistencia no reforzado han demostrado, por ejemplo, que tales materiales en muchos casos podrían estar estrechamente caracterizados como linealmente elásticos a niveles de presión aproximada a la máxima resistencia. Después de esto, la curva esfuerzo vrs deformación disminuye a grandes rangos como concreto de baja resistencia.

3.2.1 Consideraciones en columnas

Realmente se sujetan pocas columnas en práctica a cargas verdaderamente axiales. Momentos debidos a la aplicación excéntrica de carga o el asocio de la acción del marco rígido, se sobreponen normalmente en cargas axiales. Esta condición está ampliamente detallada en la recomendación 318-38 del ACI. Sin embargo, se recomienda observar primero como sería el comportamiento de las columnas sometidas únicamente a carga axial.

La experiencia de diseño y obra confirma el empleo del factor 0.85 para concretos de alta resistencia, por lo que se pueden emplear expresiones de diseño utilizadas para concretos de más baja resistencia. (8-5)

3.2.1.1 Contribución de resistencia de acero y concreto

Presentar el diseño de práctica, calculando la resistencia nominal de un miembro cargado axialmente, es asumir una ley de suma directa que suma la fuerza del concreto y la del acero. Para concretos de resistencia más baja cuando en los alcances concretos el rango significativo no es lineal, el acero todavía está en el rango elástico y por consiguiente empieza a recoger una porción más grande de la carga. (1-29)

Para concretos de baja resistencia, cuando el concreto alcanza el rango de no linealidad significativa (cerca del 0.01 de la deformación), el acero se comporta adecuadamente en el rango elástico y comienza a recuperar una parte importante de la carga.

Cuando la deformación se acerca a 0.002, se aprecia que la pendiente de la curva de concreto se aproxima a cero y puede ser causa de una deformación plástica, con pequeño o ningún incremento en el esfuerzo. En este caso, los esfuerzos alcanzan su punto de fluencia en la misma deformación. Así, si el concreto está en su máximo esfuerzo y el acero está en f_y , la resistencia de la columna puede ser predicha por la ecuación:

$$P = 0.85f'_c A_c + f_y A_s$$

Donde,

f'_c = resistencia a compresión

f_y = resistencia a tensión

A_c = Área de la sección a compresión

A_s = Área de acero

El factor 0.85 puede ser empleado para tener en consideración las diferencias de la resistencia del concreto en columnas, comparado con concretos de la misma mezcla en ensayo estándar de cilindros en compresión.(1-29)

Un análisis similar es válido para columnas de concreto de alta resistencia, excepto que el acero deberá ceder antes que el concreto alcance su resistencia pico.

3.2.2 Consideraciones en vigas

De muchas maneras las reglas de vigas de resistencias altas pueden ser esencialmente las mismas que se han usado para describir conducta de vigas hechas de concreto de resistencia más baja.

La distribución en vigas de esfuerzo de compresión está directamente relacionada al perfil de la curva esfuerzo-deformación en compresión uniaxial. En consecuencia, para los concretos de alta resistencia, los cuales muestran diferencias en ese perfil, es razonable esperar diferencias en la distribución de esfuerzos terminales en flexión, especialmente para cargas que se acercan a la última. (1-32)

Basándose en los estudios efectuados puede afirmarse que en vigas que están debidamente reforzadas, el método de diseño del Comité 318 del ACI puede emplearse sin cambios en la resistencia, por lo menos hasta valores de 83 Mpa. Para vigas sobre esforzadas, las cuales no son permitidas por el ACI 318, o para elementos que combinan compresión axial y momentos, pueden ocurrir diferencias importantes.

3.3 Áreas de aplicación

En general, las ventajas económicas del concreto de alta resistencia son más parecidas cuando éste es usado en las columnas de edificios muy altos (rascacielos). En estas aplicaciones, los ingenieros pueden tomar todas las ventajas posibles, incrementando los esfuerzos de compresión, reduciendo la cantidad de acero, reduciendo el tamaño de las columnas y vigas, aumentando así el espacio en cada ambiente. (6-1)

No obstante, el uso del concreto de alta resistencia tuvo también propagación en otras aplicaciones como recubrimientos primarios, vigas y puentes de larga extensión.

Secciones separadas describen aplicaciones en edificios, puentes y estructuras especiales. Estas aplicaciones no son todas, pero demuestran un rango de aplicación del concreto de alta resistencia. Adicionalmente, también exponemos potenciales aplicaciones:

3.3.1 Edificios

Las más grandes aplicaciones del concreto de alta resistencia en los edificios las encontramos en las columnas estructurales de los rascacielos. La historia de columnas de concreto de alta resistencia en la ciudad de Chicago es descrita en reporte Task Force Report del comité de edificios de Chicago. Desde 1872, más de 30 edificios en Chicago fueron construidos con especificaciones para esfuerzos de compresión de 9,000 psi. Otras aplicaciones las encontramos en reportes de New York, Houston, Minneapolis, Melbourne, Australia, Dallas y Seattle. Entre los edificios realizados en el mundo actual están los descritos a continuación.

3.3.1.1 Japan Center

Este edificio, terminado de construir en 1996 y situado en Frankfurt, tiene 32 plantas (28 de ellas sobre rasante y cuatro sótanos) y una altura de 115 m. Su planta es un cuadrado de 37 m de lado. El esquema estructural responde al sistema de "tubo en tubo", formado por un núcleo central y un pórtico tridimensional perimetral, ambos de concreto. En esta ocasión, cada uno de ellos ha sido dimensionado para absorber 50 por ciento de las acciones horizontales de viento. (6-2)

Las columnas y las vigas de la corona perimetral están ejecutadas con un concreto de tipo CI05 (resistencia de proyecto 105 MPa) en las 12 plantas inferiores, siendo las dimensiones de la sección de aquéllas de 0,35 × 0,72 m. En el predimensionado efectuado con concreto tipo C45, la sección obtenida era de 0,55 × 0,72 m (incrementándose además notablemente la armadura), siendo una de las principales razones del uso del concreto de alta resistencia obtener la máxima superficie útil en el edificio. (6-4)

3.3.1.2 Las Torres Petronas

Este conjunto de dos torres, de 88 plantas cada una (82 sobre rasante y seis plantas sótano), se encuentra situado en Kuala Lumpur, Malasia. Con sus 450 m, constituyen el edificio más alto del mundo. Cada torre tiene planta circular encontrándose adosados a ellas sendos edificios de 38 plantas. (6-8)

Ante la envergadura del edificio que se iba a proyectar, inicialmente se plantearon cinco alternativas estructurales:

- Núcleo y sistema cilíndrico exterior (pórtico de fachada) metálicos.
- Núcleo de concreto y pórtico perimetral metálico.
- Núcleo metálico y perímetro de estructura mixta.
- Núcleo de concreto y perímetro de estructura mixta.
- Núcleo y perímetro de concreto.

Las ventajas encontradas a este último, que fue la opción elegida finalmente, son las siguientes:

- La transmisión de cargas verticales a través de columnas de concreto de alta resistencia se realiza con menor costo que con elementos metálicos, obteniéndose menores secciones que con concreto normal y, por tanto, mayor superficie útil en el edificio.
- Las columnas perimetrales metálicas podían ser de menor sección para transmitir la misma carga vertical que las de concreto, pero su rigidez frente a momentos flectores es menor, colaborando éstas más para resistir las acciones horizontales.

- Las pantallas de concreto del núcleo tienen una doble misión: Servir de muros compartidos frente al fuego. Transmitir a la cimentación las cargas verticales.
- Las vigas perimetrales de concreto tienen una unión fácil a las columnas de concreto, colaboran en la rigidez frente a la acción del viento y no penalizan el tiempo de ejecución de forma significativa.
- El sistema de concreto frente a las cargas laterales tiene una amortiguación mayor que el metálico. La respuesta dinámica de un sistema de concreto será menor y más confortable para unas condiciones dadas de viento.
- Al aumentar la masa del edificio, se prolonga el período de vibración y se mejora el confort.
- El concreto era un material de posible consecución local, y con un costo relativamente bajo.
- El suministro de acero local en las cantidades necesarias para la ejecución de la estructura completa tenía una capacidad limitada, obligando a importar parte del mismo.
- Cualquier solución metálica requería amortiguamiento adicional, posiblemente en forma de dispositivo mecánico, lo que supone aplicaciones de costo y de espacio.
- La solución de concreto cumple los parámetros requeridos al proyecto.
- La estructura metálica obliga a mover en obra, mediante grúas, elementos pesados. (6-12)

3.4 Ventajas estructurales

Dentro de las ventajas que se pueden mencionar desde el punto de vista estructural están las siguientes:

- Se puede obtener mayor resistencia de diseño
- Se puede introducir mayores preesfuerzos en el concreto de alta resistencia y se puede evitar la destrucción del concreto durante la entrega y manipulación.
- La mayor reducción de agua acelera el endurecimiento del concreto y puede facilitar la temprana introducción del preesfuerzo.
- Con alta resistencia, la sección transversal de la estructura puede reducirse, lo que da como resultado la reducción de la carga muerta, lo cual es favorable para edificios altos, puentes de gran luz y para la estabilidad bajo la acción de sismos. La reducción de peso también contribuye a diseños económicos de diferentes estructuras sin sacrificar buenas propiedades del concreto.
- Debido a la estabilidad química, se requiere mucho menos mantenimiento para puentes de concreto que para puentes de acero.
- La trabajabilidad mejorada, así como la baja relación agua/cemento, mejora la impermeabilidad del concreto.
- La mayoría de las aplicaciones de los concretos de alta resistencia con microsílíce han usado la propiedad de resistencia del material. Sin embargo, éste posee otras características como un alto módulo de elasticidad, rápido desencofrado, etc., las cuales podrían ser usadas ventajosamente en estructuras de concreto. (6-15)

4. DESARROLLO DE MEZCLAS

4.1 Procedimiento para realización de mezcla

Para el diseño de la mezcla tradicional se presenta el método actualizado desarrollado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la USAC, que es muy semejante al recomendado por el Instituto Americano del Concreto. Consiste en proporcionar los componentes en masa, pero en base a los volúmenes absolutos que ocupa en un metro cúbico de concreto, tomando en cuenta en lo posible las características reales de los mismos y datos prácticos basados en la experiencia.

Los datos necesarios para poder diseñar una mezcla son los siguientes:

- a) Dimensión más pequeña del elemento o elementos a construir
- b) Espaciamiento del refuerzo (separación entre varillas de acero)
- c) Materiales a usar, especialmente el tamaño nominal del agregado grueso
- d) Asentamiento recomendado
- e) Resistencia estructural requerida

- f) Condiciones de exposición a sulfatos
- g) Máxima relación agua/cemento
- h) Mínimo contenido de cemento permitido

4.1.1 Realización de mezcla tradicional

Los pasos para realizar un diseño de mezcla tradicional sin ser exactamente para un concreto de alta resistencia son los siguientes:

- a. Selección del asentamiento
- b. Selección del tamaño máximo de agregado a usar
- c. Determinación de la resistencia requerida
- d. Selección de la relación agua/cemento
- e. Estimación del agua contenida en la mezcla y % de aire
- f. Cálculo del contenido de cemento
- g. Estimación del % de agregado fino
- h. Cálculo de las proporciones iniciales en masas y volúmenes absolutos
- i. Hechura de la primera masada de prueba, para un volumen de 0.05 m³
- j. Corrección por humedad de agregados y del agua
- k. Realización de mezcla en concretera y llenado de cilindros

a. Selección del asentamiento. Los asentamientos mostrados en la tabla IV pueden incrementarse cuando se usan aditivos reductores de agua y fluidificantes aprobados. Como sucede para nuestra mezcla ≤ 100 mm.

Tabla IV. Asentamientos recomendados para concreto

Tipo de estructura	Asentamiento (mm)
- Cimientos	25 a 75
- Columnas, vigas y muros reforzados	25 a 100
- Pavimentos y losas	25 a 75
- Concreto masivo	25 a 50
- Revestimiento de túneles y secciones angostas o muy reforzadas	100 a 150

Fuente: Manual de diseño de mezclas de concreto elaborado por el Centro de Investigaciones de Ingeniería y Cementos Progreso

b. Selección del tamaño máximo del agregado a usar. En nuestro caso, el agregado de 1”

c. Determinación de la resistencia requerida del concreto

$$f'_{cr} = f'_{c} + p s$$

donde:

f'_{cr} = resistencia a la compresión requerida

f'_{c} = resistencia a la compresión especificada.

p = factor de probabilidad estadística basado en el número de resultados de ensayos que se permita sean menores de f'_{c} .

s = desviación estándar.

Datos:

f'_{c} = 41.34 MP (6000 psi), por ser un concreto que pertenece a la familia de los concretos de alta resistencia.

$p = 1.34$ establecido para estructuras diseñadas por el método de resistencia última (ACI 318-89 Cáp. 5) y estructuras de concreto preesforzado, que permite no más de un resultado promedio menor que $f'c$ en 100 de los promedios de cualesquiera serie de 3 ensayos consecutivos de resistencia a la compresión.

$s = 1.7$ tomado de los estándares de control para concreto muy bueno, hecho en laboratorio.

$$f'_{cr} = f'c + p \cdot s.$$

$$f'_{cr} = 41.3 \text{ MP} + (1.34)(1.7)$$

$$f'_{cr} = 44.34 \text{ MP (6426 psi)}$$

d. Selección de la relación agua/cemento. $A/C = 0.44$ tomado de la tabla V:

Tabla V. Relaciones agua/cemento para distintas resistencias

Resistencia		Relación A/C
MP	psi	
13.8	2000	0.92
17.2	2500	0.86
20.7	3000	0.77
24.7	3500	0.68
27.6	4000	0.61
21.0	4500	0.56
34.5	5000	0.52
37.9	5500	0.48
41.3	6000	0.44

Fuente: Manual de diseño de mezclas de concreto elaborado por el Centro de Investigaciones de Ingeniería y Cementos Progreso

e. Estimación del agua en la mezcla y contenido de aire. Agua= 222Kg./m³, pero como queremos obtener mayores resistencias intentamos con cantidades menores en unos 15% del total de la mezcla, entonces 189 Kg/m³, sin la utilización de aditivos:

Aire = 1.5%, según datos de la tabla V.

Tabla VI. Cantidad de agua de mezcla aproximada y contenido de aire atrapado para diferentes asentamientos y tamaños nominales máximos de agregado

Asentamiento (mm)	Cantidad de agua (Kg./m ³)					
	Tamaño nominal Max. agregado mm (Pulgadas)					
	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	38.1 (1 ½)	50 (2)
25 - 50	238	229	219	206	191	177
75 - 100	262	248	235	222	208	194
150 - 175	279	262	248	232	219	205
Porcentaje de aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.75

Fuente: Manual de diseño de mezclas de concreto elaborado por el Centro de Investigaciones de Ingeniería y Cementos Progreso

f. Cálculo del contenido de cemento.

A/C = Relación Agua/cemento

$$C = \frac{\text{Cantidad Agua}}{\text{Rel. agua/cemento}}$$

$$C = \frac{189}{0.44} = 429 \text{ Kg/m}^3 \text{ aprox.}$$

Cemento a utilizar 429 Kg/m³ es decir 10 sacos/m³

g. Estimación del % del agregado fino.

MF de la arena: 2.81 % de la arena: 44, tomado de la tabla VII

Tabla VII. Porcentaje de agregado fino sobre agregado total

Tamaño nominal agregado		% agregado fino sobre agregado total en volumen absoluto para diferentes módulos de finura del agregado fino			
mm	pulg.	MF: 2.4	2.6	2.8	3
9.5	3/8"	46	48	50	52
12.5	1/2"	44	46	48	50
19	3/4"	42	44	46	48
25	1"	40	42	44	46
37.5	1 1/2"	38	40	42	44
50	2"	36	38	40	42

Fuente: Manual de diseño de mezclas de concreto elaborado por el Centro de Investigaciones de Ingeniería y Cementos Progreso

h. Cálculo de las proporciones iniciales en masas y volúmenes absolutos.

(Densidades)

Dagua 1000 Kg/m³

Dcemento 3050 Kg/m³

Darena 2590 Kg/m³

Dpiedrín 2670 Kg/m³

Densidad = Masa / Volumen

Contenido	Masa (Kg.)	Volumen absoluto (m3)
Agua	189	0.189
Cemento	429	0.1406
Aire	3	0.0300
Volumen de agua + cemento + aire	= 0.36	
Volumen de los agregados	= 0.64	
Volumen de la arena	= 0.27 = 699.3 Kg	
Volumen de grava	= 0.37 = 987.9 Kg	

i. Hechura de la primera masada de prueba, para un volumen de 0.05 m3.

Material	Peso en Kg.	Proporciones
Agua	9.45	0.44
Cemento	21.45	1
Arena	34.96	1.62
Piedrín	49.39	2.30

j. Corrección por humedad de agregados. Estas correcciones se realizan de la siguiente forma:

- Se toma 500 gramos de arena húmeda para luego secarla a través del horno. Al igual se toma 1000 gramos de grava para luego secarla a través de horno.
- Se calcula el % de humedad tanto de arena como grava de la fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{PUH} - \text{PUS}}{\text{PUS}} \times 100$$

Donde,

PUH= Peso unitario húmedo

PUS= Peso unitario seco

- Se calcula el factor de corrección

$$f \text{ corr} = \frac{\% \text{Hum.}/100 + 1}{\% \text{Abs.}/100 + 1}$$

Donde,

%Abs. = Porcentaje de absorción, se obtiene de datos de ensayos en arena y grava.

- Se multiplica f corr. por cada uno de los pesos de masada y se agrega o quita, según sea el caso.

k. Realización de mezcla en concretera y llenado de cilindros. Se realiza el concreto en mezcladora, se mide su masa unitaria, su temperatura, su % de aire se produce el llenado y finaliza.

4.1.2 Mezcla de concreto de alta resistencia

Se realizaron 3 tipos de mezclas para nuestra parte práctica, para comparar sus comportamientos, dentro de los cuales tenemos:

a. Tipo 1

Mezcla tradicional, cargada con un poco de cemento (10sacos/m³) para así reducir un poco la relación A/C, sin la utilización de aditivos(microsílíce, súper-plastificante y reductor de agua de alto rango) se realizan mezclas para los tipos de cementos: A. Cemento clase 5000 B. Cemento alta resistencia inicial (ARI24), 3. psi. C. Cemento de uso general en construcción (UGC).

b. Tipo 2

Mezcla basada de diseño de Master Builders, con microsílíce y reductores de agua de alto rango Tipo D, Tipo F(POLYHEED RI, GLENIUM 3030), sin ceniza volante por no estar en mercado nacional, se realizan mezclas con distintas clases de arenas : A. Arena Río Motagua, B. Arena Río Las Vacas, C. Arena triturada (Agregua Z6),

c. Tipo 3

Mezcla con aditivos minerales (microsílíce) como material cementante, aditivos químicos (POLYHEED RI, GLENIUM 3030) como superfluidificantes, variando en la mezcla solamente los tipos de cementos con 12 sacos: A. Cemento de uso general en construcción (UGC), B. Cemento alta resistencia inicial (ARI24).

4.1.2.1 Características de los materiales

4.1.2.1.1 Cementos

- **Uso general en la construcción (UGC)**

Su clase de resistencia mínima es de 4,000 lbs. por pulgada cuadrada (28N/mm²) a 28 días en morteros normalizados de cemento, además de mejorar la impermeabilidad del concreto. Su color es ideal para concretos a la vista y fachadas arquitectónicas. Cumple con las normas nacionales e internacionales para cementos hidráulicos. Norma ASTM C 1157 (Type GU).

Características

- Versatilidad
 - Resistencia mínima 4000 psi a 28 días
 - Mayor impermeabilidad
 - Trabajabilidad
 - Resistencia química
-
- **Cemento Pórtland puzolánico tipo ARI 24**

Cemento Progreso para fabricar blocks-secado rápido viene a mejorar aún más los requerimientos de una rama importante de la construcción como lo es la dedicada a la fabricación de blocks. Una de las cualidades fundamentales de este nuevo producto es la bondad de secado rápido. Norma ASTM C 1157 (Type HE)

Características

- Cemento de secado rápido
- Clase de resistencia 3480 psi a 3 días
- Resistencia mínima a un día 2460 psi

- **Cemento clase 5000 psi**

Corresponde a la clase de resistencia 5000 psi (35 N/mm² ó 35 MPa). Ésta es una medida expresada como fuerza por unidad de área en libras por pulgada cuadrada (psi) en Newton por milímetro cuadrado o Mega Pascales, que es su equivalente en el Sistema Internacional de Unidades (SI). Cumple con los requisitos de normas COGUANOR (Comisión Guatemalteca de Normas) NGO 41005 y C150 de la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (por sus siglas en inglés, ASTM).

Características

- A igualdad de resistencia requerida, permite economizar cemento.
- A igualdad de contenido de cemento, se obtienen resistencias tempranas y finales mayores que con cementos de clase de resistencia más baja, permitiendo desencofrados o desmoldados a menor plazo.

Ventajas

- Resistencias mayores, especialmente a edades tempranas: la mayor resistencia a edades tempranas permite aumentar la productividad de la prefabricación y desencofrar más rápido en obra. Por su fraguado y endurecimiento más rápido y su alta resistencia es excelente en la fabricación de bloques, tubos y otros elementos prefabricados en concreto.

- Rentabilidad: es un producto que mejora la rentabilidad y productividad de su planta disminuyendo costos por unidad producida y ofrece nuevas alternativas para la diversificación de productos de la empresa.

4.1.2.1.2 Arenas

Las características y propiedades de los tipos de arenas usados se muestran en la tabla VII.

Tabla VIII. Características de las arenas

ENSAYO COMPLETO DE LOS AGREGADOS FINOS			
	Río Las Vacas	Río Motagua	Arena Triturada
Densidad relativa (ss)	2,31	2,58	2,67
Absorción (%)	5,19	1,58	0,99
Materia orgánica (color)	1	1	0
Pasa tamiz 0.075 mm (%)	0,4	4,6	4,4
Módulo de finura (MF)	2,83	2,95	2,68
Módulo de Hudson (A)	6,18	6,09	6,36
Masa unitaria compactada(Kg/m ³)	1360	1938	1583
Masa unitaria suelta (Kg/m ³)	1280	1799	1448
Masa unitaria suelta Humeda(Kg/m ³)	1040	1548	1184
Pérdida sulfato sodio (%)	**	**	**
Humedad (%)	11,6	**	6,4
Fecha de muestra	20/09/2004	19/10/2004	30/07/2004

Fuente: Laboratorio de CETEC

4.1.2.1.3 Grava

Tabla IX. Características de grava

Ensayo de granulometria agregado 1"								
Estandar (mm)	50	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36
Nominal (pulg)	2	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	4	8
% Pasa acumulado	100	100	100	76.7	23.6	6.1	1.5	1.4
	MF 7.14			A 1.87			Tamiz 200	

4.1.2.1.4 Aditivo mineral

REHOMAC SF100. Aditivo mineral, microsilice compactada

Es un aditivo mineral a base de microsilice compactado y seco que produce cualidades especiales en el concreto. Dentro de las características que produce al concreto está, el incremento de la cantidad de gel de silicatos de calcio, mejorando así la resistencia y reduciendo la permeabilidad del concreto.

Dentro de los usos recomendados está que produce un concreto con permeabilidad mínima; esto limita la penetración de agua, cloruros, sulfatos y otros agentes químicos que provocan la corrosión del acero de refuerzo del concreto. También desarrolla altas resistencias debido a sus propiedades puzolánicas. Se recomienda en una dosis de 5 a 15 % del peso total del cemento utilizado, dependiendo del incremento en las resistencias y deducción de la permeabilidad deseadas. La cantidad exacta se obtendrá realizando mezclas de prueba.

4.1.2.1.5 Aditivos químicos

POLYHEDD RI. Aditivo para bombeo y acabado superior del concreto

Es un aditivo retardante, reductor de agua de medio rango, cumple con la norma ASTM C494 para los aditivos reductores de agua y retardantes Tipo D, dentro de sus características:

- Reduce el contenido de agua para un asentamiento (revenimiento) dado.
- Mejora las características del tiempo de fraguado.
- Incremento en el desarrollo de las resistencias a compresión y a la flexión en todas las edades.

- Mejoramiento en la durabilidad del concreto.

Dentro de las ventajas del aditivo tenemos:

- Trabajabilidad y bombeabilidad superior en aplicaciones en clima caluroso
- Reduce la segregación
- Mejora las características de acabado en pisos
- Desempeño consistente en concretos con asentamientos bajo, medio rango de asentamiento de 150 a 200 mm., y alto asentamiento del concreto

El rango recomendado para su utilización varía de 200 a 800 ml por cada 100Kg de cemento, en la mayoría de las mezclas de concreto para clima caluroso.

GLENIUM 3030 NS. Aditivo reductor de agua de rango completo para el concreto

Es un aditivo reductor de agua de rango completo para usarse. Cumple con la especificación ASTM C494 para aditivos reductores de agua Tipo A y aditivos reductor de agua de alto rango, Tipo F, dentro de las características que produce al concreto están:

- Concreto donde se requiera alta fluidez, resistencias iniciales y finales altas y mejor durabilidad.
- Concreto donde se desea una reducción de agua en un rango normal, medio o alto.
- Concreto donde se requiera el desarrollo rápido de resistencias y mejor terminado.

Dentro de las ventajas de usar el aditivo tenemos:

- Menor contenido de agua para un asentamiento determinado
- Produce mezclas de concretos cohesivas y sin segregación
- Incremento en el desarrollo de resistencias a compresión y a flexión durante todas las etapas
- Menor tiempo de fraguado y para el desarrollo de resistencia.

El rango recomendado para su utilización, en la mayoría de las mezclas de concreto para clima caluroso, varía de 195 a 1170 ml por cada 100Kg de cemento.

4.1.2.2 Procedimiento de mezcla

Procedimiento para mezcla de concreto de alta resistencia, tipo 2 basada de diseño de Master Builders, con microsilice y reductores de agua de alto rango Tipo D, Tipo F(POLYHEED RI, GLENIUM 3030), sin ceniza volante por no estar en mercado nacional, se hace mezcla con arena triturada (Agregua Z6). Según los formatos y parámetros usados en Cementos Progreso, es el siguiente:

- a. Revisión de mezcla teórica de diseño para un metro cúbico.
- b. Cálculo para volumen de bachado de laboratorio
- c. Cálculo de correcciones por humedad de arena y grava
- d. Preparación de materiales usados y requeridos
- e. Slump de prueba
- f. Masa unitaria y % de aire
- g. Cálculos y datos obtenidos de mezcla
- h. Cálculo de las proporciones iniciales en masas y volúmenes absolutos.

4.1.2.2.1 Mezcla base teórica de diseño

Se realizó una serie de mezclas de partida para inicio de ensayos, de los cuales se llegó a tomar como base la realizada por Master Builders, que se compara también con ensayos de mezclas del IMCYC.

Tabla X. Cantidades de materiales para m³ de concreto de alta resistencia con correcciones en laboratorio (0.04m³)

MASADA TEÓRICA Y PRÁCTICA			
Materiales	Teórica Diseño (Kg/m³)	Teórica Laboratorio Kg	Práctica Laboratorio Kg
Agua	153	6.12	6.12
Cemento	531	21.24	21.24
Mat. cementante	64	2.56	2.56
Agregado fino	548	21.92	22.83 + 0.91
Agregado grueso	1091	43.64	43.37 - 0.27
Aditivo(ml/kg*cem)GLENIUM	6950ml	278ml	200ml
Aditivo(ml/kg*cem)POLYHEED	3475ml	139ml	125ml
Masa total	2397	95.89	

Fuente: Mezcla realizada en Laboratorio Cementos Progreso

4.1.2.2.2 Cálculo para volumen de bachado de mezcla.

Se realizaron masadas para volumen de 0.05 m³ y 0.04 m³ de concreto según lo requerido en cantidad de cilindros para ensayos y que se pudiera mezclar fácilmente en la concreteira.

0.05 m³ concreto= 6 cilindros Ø 6" + 2 cilindros Ø 4"

0.04 m³ concreto= 6 cilindros Ø 6"

Figura 5. Cilindros de prueba



4.1.2.2.3 Correcciones por humedad de arena y grava

Este procedimiento se hace de la manera siguiente:

- Se toma 500 gramos de arena húmeda para luego secarla a través del horno. Al igual. se toma 1000 gramos de grava para luego secarla a través de horno.
- Se calcula el % de humedad tanto de arena como grava de la fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{PUH} - \text{PUS}}{\text{PUS}} \times 100$$

Donde,

PUH= Peso unitario húmedo

PUS= Peso unitario seco

- Se calcula el factor de corrección

$$f \text{ corr} = \frac{\% \text{Hum.}/100 + 1}{\% \text{Abs.}/100 + 1}$$

Donde,

%Abs. = Porcentaje de absorción, se obtiene de datos de ensayos en arena y grava.

- Se multiplica f corr. por cada uno de los pesos de masada y se agrega o quita, según sea el caso.

Datos mezcla 1 tipo 2

Arena:

PUH = 500 gramos

$$\% \text{Hum} = 25.1/474.9 * 100$$

PUS = 474.9 gramos

$$\% \text{Hum} = 5.28 \%$$

PUH – PUS = 25.1gramos

%Abs= 1.06 obtenido de ensayo de arena

$$f \text{ corr} = \frac{5.28/100 + 1}{1.06/100 + 1}$$

$$1.06/100 + 1$$

$$f \text{ corr} = 1.0417$$

Peso de arena total = 1.0417 x 21.92Kg. = 22.83 Kg

Se le agrega = 22.83Kg – 21.92Kg = 0.91

Grava:

%Hum = 0 se encuentra realmente seca.

%Abs = 0.63

$$f \text{ cor} = \frac{0/100}{0.63/100 + 1} + 1 = 0.9937$$

Peso de grava total = 0.9937 x 43.64 = 43.67

Se le quita = 43.37Kg – 43.64 = -0.27

4.1.2.2.4 Preparación de los materiales usados y requerimientos de mezclas

Tabla XI. Materiales utilizados

PROCEDENCIA DE LOS MATERIALES		
Material	Tipo	Lugar
Cemento	ARI 24	San Miguel
Mat. Cementante	Microsilice RHEOMAC	Tecno Master
Agregado fino	Arena triturada	Agregua Z.6
Agregado Grueso	Caliza 1"	Agregua Z.6
Aditivo	Glenium 3030 NS	Tecno Master
Aditivo	Polyheed	Tecno Master

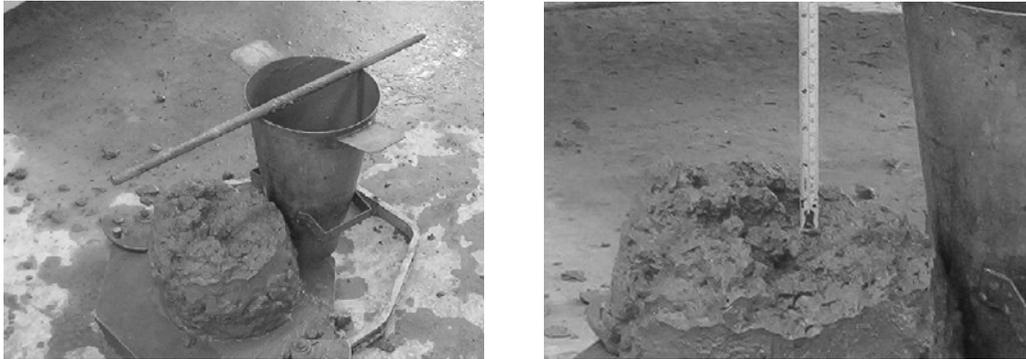
Tabla XII. Datos de requerimientos de mezcla

Datos de la Mezcla		Datos Prácticos	
Resistencia	<6000 psi	Asentamiento	6"
Relación A/C	0.26	Trabajabilidad	Buena
Asentamiento	6"	Plasticidad	Buena
No. Sacos/m ³	12.5	Consistencia	Buena
%Humedad		Apariencia	Pastosa
Agregado fino	5.83	Agua empleada	6.12
Agregado grueso	0	Masa Unitaria	2424
Temperatura		% Aire	1.6
Temp. Concreto	25 °C	No, Cilindros	6
Temp. Ambiente	28 °C	Fecha	

4.1.2.2.5 Slump de pruebas

Se realizaron pruebas de asentamiento mayores a 6" por ser normales en concretos de alta resistencias debido al uso de aditivos plastificantes y reductores de agua de alto rango, con cono de *abrahams* tradicional.

Figura 6. Slump de pruebas



4.1.2.2.6 Masa unitaria

Se obtiene con cilindro de pruebas, amasando 3 capas de 25 golpes y pesándolos respectivamente. También se obtienen de este cilindro el porcentaje de aire contenido en el concreto realizado.

Masa unitaria (MU) : Peso concreto – tara

Volumen tara

Peso concreto = 21.24 Kg

Tara = 4.198

Peso concreto – tara = 21.24 - 4.198 = 17.042

Volumen tara = 7.03

Masa unitaria = 17.042 / 7.03 = 2.424

MU = 2424 Kg /m³

Figura 7. Cilindro de ensayo masa unitaria y % de aire



Figura 8. Medición de % de aire



4.1.2.2.7 Cálculos y datos obtenidos de mezclas

Tabla XIII: Datos obtenidos de resultados

Datos analíticos		Cantidades reales de materiales (Kg/m ³)	
Agua neta	6.76	Cemento	598
Volumen real	0.03979	Agregado fino	550
Rendimiento	0.99475	Agregado grueso	1097
Vol./concreto saco	0.079	Agua	170
Observaciones		% Aire	1.6
		Masa unitaria	2416.6
		Delación A/C	0.28

Agua neta: Cant. agua ± Cant. agregar arena ± Cant. quitar grava

Agua neta: $6.12 + 0.91 - 0.27 = 6.76$

Volumen real : Masa total práctica de laboratorio

Masa unitaria

Volumen real : $96.56/2424 = 0.0398349$

Rendimiento : Volumen real

Volumen de masada

Rendimiento : $0.0398349/ 0.04 = 0.995874$

Vol/concreto saco : Rendimiento * 42.5

Cemento teórico de diseño

Vol/concreto saco : $0.995874*42.5/534 = 0.079$

Cantidades reales materiales : cantidades teóricas de laboratorio

Volumen real

Agua: Agua neta = 6.76/0.0398349 = 170
Volumen real

Cemento : Cemento + mat. cementante = 23.92/0.0398349 = 600
Volumen real

Agregado grueso: Agregado grueso = 43.64/0.0398349 = 1096
Volumen real

Agregado fino: Agregado fino = 21.92/0.0398349 = 550
Volumen real

4.1.2.2.8 Cálculo de las proporciones iniciales en masas y volúmenes absolutos. (Densidades)

Dagua 1000 Kg/m³
 Dcemento 3050 Kg/m³
 Darena 2580 Kg/m³
 Dpiedrín 2670 Kg/m³
 Densidad = Masa / Volumen

Contenido	Masa (Kg.)	Volumen absoluto (m³)
Agua	170	0.170
Cemento	600	0.197
Aire	3	0.016
Volumen de agua + cemento + aire		0.38
Volumen de los agregados		0.62
Volumen de la arena		0.21
Volumen de grava		0.

Tabla XIV. Diseño de mezcla tipo 2 A

FORMULARIO DE MEZCLAS

Fecha de muestra: 01-Mar-05 No. Mezcla:

Tipo de mezcla: MEZCLA TIPO 2 Bachado de 0.04m³

MASADA TEÓRICA Y PRÁCTICA			MATERIAL A UTILIZAR		
Materiales	Teórica diseño (Kg/m ³)	Teórica laboratorio Kg	Práctica laboratorio Kg	Procedencia	% Absorción
Agua	153	6.12	6.12	San Miguel	
Cemento	534	21.36	21.36	ARI 24 SM	
Mat. cement. (Microsilice)	64	2.56	2.56	Master Builders	
Agregado fino	548	21.92	22.83 + 0.91	Agregua z. 6	1.06
Agregado grueso	1091	43.64	43.37 - 0.27	Piedrín 1" Agregua z. 6	0.63
Adit. Polyheed(ml/kg*cem)	3475ml	139ml	125ml - 14ml	Master Builders	
Adit. Glenium (ml/kg*cem)	6950ml	278ml	200ml - 78ml	Master Builders	
Masa total	2400.42	96.01	96.56		

Datos de la mezcla		% Humedad contenida	
Resistencia	<6000 psi	Agregado fino	5.28
Relación A/C (masa)	0.26	Agregado grueso	0
Asentamiento	6"	Temperatura	
% Agregado fino		T - C : 27 Grad C.	T - A : 24 Grad. C
Número de sacos/m ³	12.5		

Observaciones: mezcla muy plástica, chiclosa y que pierde la cantidad de agua rápidamente debido a la acción de los aditivos.

T - C : Temp. Concreto
T - A : Temp. Ambiente

Datos prácticos		Datos analíticos		Cantidades reales de materiales (Kg/m ³)	
Asentamiento	6	Agua neta	6.76	Cemento	600
Trabajabilidad	Buena	Volumen real	0.039834983	Agregado fino	550
Plasticidad	Buena	Rendimiento	0.995874587	Agregado grueso	1096
Consistencia	Buena	Vol/concreto saco	0.079259682	Agua	170
Apariencia	Plástica	Tipo 2 A			
Agua empleada	6.12	ARENA MOTAGUA			
Masa unitaria	2424	12.5 sacos			
% Aire	1.6				
No. cilindros	6				

Tabla XV. Resultados de resistencia mezcla tipo 2

Fecha ruptura	Edad en días	Ø Cilindro	Carga máxima		Resistencia		Resistencia Promedio psi	Tipo de falla
			KN	Klbs fuerza	Mpa (N/mm ²)	psi		
A. MEZCLA CON ARENA TRITURADA								
29-Oct	7	6"	953.44	215.07	52.27	7581	7758.5	2
29-Oct	7	6"	998.09	225.14	54.72	7936		
19-Nov	28	6"	1216.92	274.51	66.71	9676		3
19-Nov	28	6"	1054.43	237.85	57.81	8384		2
17-Dic	56	6"	1249.50	281.86	68.50	9935		4
17-Dic	56	6"	1177.43	265.60	64.55	9362		4
B. MEZCLA CON ARENA RIO LAS VACAS								
Rel A/C : 0.36								
29-Oct	7	6"	1000.10	225.60	54.83	7952	7890	1
29-Oct	7	6"	984.63	222.11	53.98	7829		
19-Nov	28	6"	1207.37	272.35	66.19	9600		3
19-Nov	28	6"	1148.00	258.96	62.94	9128		2
17-Dic	56	6"	1196.93	270.00	65.62	9517		4
17-Dic	56	6"	1267.11	285.83	69.46	10075		4
C. MEZCLA CON ARENA RIO MOTAGUA								
Rel A/C : 0.28								
01-Mar	7	6"	1089.14	245.68	59.71	8660	8865	1
01-Mar	7	6"	1140.71	Q257.32	62.54	9070		
29-Mar	28	6"	1380.30	Q311.36	75.67	10975		1
29-Mar	28	6"	1355.02	Q305.66	74.28	10774		1
26-Abr	56	6"	NR	NR	NR	NR		D
26-Abr	56	6"	1502.16	338.85	82.35	11944		D

Area Ø 6" = 18241mm² = 28.37 Pulg²

1 Mpa = 145.0377 psi.

Tabla XVI. Resultados de resistencia mezcla tipo 1

Fecha ruptura	Edad en días	Ø Cilindro	Carga máxima		Resistencia		Resistencia Promedio psi	Tipo de falla
			KN	Libras Fuerza	Kpa	psi		
A. MEZCLA CON 10 sacos cemento Clase 5000								
01-Mar	7	6"	631.60	142.47	34.63	5022	5094.5	2
01-Mar	7	6"	649.84	146.59	35.63	5167		1
29-Mar	28	6"	762.28	171.95	41.79	6061		1
29-Mar	28	6"	798.37	180.09	43.77	6348		2
26-Abr	56	6"	797.24	179.84	43.71	6339		1
26-Abr	56	6"	799.25	180.29	43.82	6355	6347	1
B. MEZCLA CON 10 sacos cemento ARI 24								
Rel. A/C : 0.42								
30-Jul	7	6"	627.58	141.57	34.40	4990	4714	1
30-Jul	7	6"	558.16	125.91	30.60	4438		1
20-Agt	28	6"	800.51	180.58	43.89	6365		1
20-Agt	28	6"	647.70	146.11	35.51	5150		1
17-Sep	56	6"	917.98	207.07	50.32	7299		2
17-Sep	56	6"	904.77	204.09	49.60	7194	7246	1
C. MEZCLA CON 10 sacos cemento UGC								
Rel. A/C: 0.49								
16-Agt	7	6"	446.60	1007.42	24.48	3551	3518	1
16-Agt	7	6"	438.30	988.69	24.03	3485		1
06-Sep	28	6"	583.43	1316.08	31.98	4639		3
06-Sep	28	6"	541.68	1221.90	29.70	4307		2
04-Oct	56	6"	711.59	1605.17	39.01	5658		4
04-Oct	56	6"	694.36	1566.31	38.07	5521	5589	4

Area Ø 6" = 18241mm² = 28.37 Pulg²

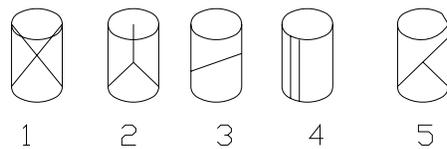
1 Mpa = 145.0377 psi.

Figura 9. Cilindros ensayados



La falla para estos cilindros arriba de 10,000 psi no fue como la de un concreto normal, por lo tanto no entra en ninguno de los parámetros reconocidos.

Figura 10. Fallas para concreto



TIPOS DE FALLAS

1. Cónica
2. Cónica y vertical
3. Corte
4. Columnar
5. Cónica y corte

CONCLUSIONES

1. La resistencia alcanzada por los ensayos supera a los 9,000 PSI (630kg/cm²) a 28 días para los concretos con 12.5 sacos de cemento con microsilice y aditivos reductores de agua de alto rango y plastificantes. Con relaciones de agua/cemento entre 0.28 a 0.36 para distintos tipos de arenas.
2. Se obtuvieron resistencias un poco arriba de 6,000 PSI (420 Kg/cm²) a 56 días, sin la utilización de aditivos, microsilice, solamente utilizando 10 sacos de cemento clase 5,000 PSI o cemento para fabricar blocks ARI 24, teniendo el cuidado que la cantidad de agua a mezclar no fuera demasiada y ésta no superara la relación agua/cemento en 0.42.
3. La resistencia inicial de estos concretos es sumamente alta y con ello permitirá un desencofrado mucho mas rápido que beneficiará en el rendimiento en el trabajo.
4. Las propiedades de la microsilice provocan disminución en la porosidad en el concreto y esto permite que sea más durable, más resistente y, además, con la utilización de aditivos reductores de agua de alto rango y plastificantes se obtienen asentamientos que van de 6" a 9".

5. Entre las arenas utilizadas, la que proporcionó mejores resistencias fue la arena del Río Motagua, ya que posee muy bajas cantidades de materia orgánica y mejor granulometría.
6. De la comparación entre mezclas de distintos cementos resultó que los cementos de clase 5,000 PSI y el cemento para fabricar blocks ARI 24 dieron resistencias altas, pero el de menos resistencia fue el cemento UGC.
7. El costo de este tipo de concreto es mucho mayor al de un tradicional, debido a la presencia de microsilices, aditivos y el aumento en la cantidad de cemento; pero el beneficio en la disminución de tiempo en alcanzar resistencias altas, y en la disminución de grandes secciones estructurales y la durabilidad que tiene, lo hace también una buena opción a tomar en cuenta.
8. Este concreto no requiere de maquinaria especial para su realización, pues se rige igual que el tradicional, solamente requiere mayor control de calidad entre los materiales y el tiempo de ejecución.

RECOMENDACIONES

1. Se debe tener especial cuidado en no aumentar las cantidades de agua, y lograr asentamientos bajos solamente con los rangos de aditivos utilizados, para no aumentar la relación de agua/cemento y así obtener resistencias altas.
2. Se debe tomar en cuenta el tiempo entre el mezclado y el colocado del concreto, ya que por la cantidad de aditivos que éste posee puede perder su humedad muy fácilmente. Esto quiere decir que en asentamientos de 6", después de 40 minutos, pueden variar en 1 ½" por la humedad perdida.
3. El tiempo de mezclado puede ser un poco mayor al de un concreto tradicional, pues se debe tener cuidado en la colocación del agua y de no colocar ningún aditivo si la mezcla no se encuentra lo suficientemente húmeda.
4. Se recomienda no utilizar materiales muy húmedo pues al corregirlos por humedad aumentaría la relación A/C.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Concrete Institute. ACI 363R-92, ``**State-of-the Art Report on High-Strength Concrete**`, 1997.
2. American Concrete Institute. (ACI 318R-95), "**Building code requirements for structural concrete Código ACI 318-95, and commentary**", 1995
3. Centro de investigación y asesoría de Cementos Progreso "**Diseño de mezclas de concreto**". (Guatemala) (1):28.1996
4. **Durabilidad de hormigones de alto desempeño, elaborados.**
www.unne.edu.ar/cyt/2001/7-tecnologicas/T037.pdf (marzo/2001)
5. Eckart R. Buhler ``**Guía para el uso de concreto de alta resistencia**`, Master Builders Technologies, 1998.
6. **El concreto de alta resistencia en la edificación.**
www.icc.ucv.cl/hormigon/har.doc. (octubre/2003)
7. Elías Martínez, Carlos Alberto. **Concreto fibroreforzado con Polypropileno. Tesis Ing. Civil. Guatemala**, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería,2001.
8. **Hormigón de alto desempeño para estructuras**
www.efn.uncor.edu/dep/struct/ciath/HAD2.doc (mayo/2003)

Tabla XVIII. Mezcla tipo 2 B

FORMULARIO DE MEZCLAS

Fecha de muestra: 22-Oct-04 No. Mezcla:
 Tipo de mezcla: MEZCLA TIPO 2 Bachado de 0.04m³

MASADA TEÓRICA Y PRÁCTICA			MATERIAL A UTILIZAR		
Materiales	Teórica diseño (Kg/m ³)	Teórica laboratorio Kg	Práctica laboratorio Kg	Procedencia	% Absorción
Agua	153	6.12	6.12	San Miguel	
Cemento	534	21.36	21.36	ARI 24 SM	
Mat. cement. (Microsilice)	64	2.56	2.56	Master Builders	
Agregado fino	548	21.92	24.77 + 2.85	Agregua z. 6	5.19
Agregado grueso	1091	43.64	43.45 - 0.19	Piedrin 1" Agregua z. 6	0.5
Adit. Polyheed(ml/kg*cem)	3475ml	139ml	80ml - 59ml	Master Builders	
Adit. Glenium (ml/kg*cem)	6950ml	278ml	160ml - 118ml	Master Builders	
Masa total	2400.42	96.01	98.5		

Datos de la mezcla		% Humedad contenida	
Resistencia	<6000 psi	Agregado fino	18.8
Relación A/C (masa)	0.26	Agregado grueso	0.06
Asentamiento	6"	Temperatura	
% Agregado fino		T - C : Temp. Concreto	
Número de sacos/m ³	12.5	T - A : Temp. Ambiente	

Observaciones: mezcla pastosa debido a la gran cantidad de cemento y a la no utilización de aditivos

Datos prácticos	Datos analíticos	Cantidades reales de materiales (Kg/m ³)
Asentamiento	7	Agua neta 8.78
Trabajabilidad	Buena	Cemento 553
Plasticidad	Buena	Volumen real 0.043239684
Consistencia	Buena	Rendimiento 1.080992098
Apariencia	Pastosa	Vol/concreto saco 0.086034015
Agua empleada	6.12	% Aire 2.4
Masa unitaria	2278	Masa unitaria 2275
% Aire	2.4	Relación A/C 0.37
No. cilindros	6	ARENA LAS VACAS
		12.5 sacos

Tabla XIX 3. Mezcla tipo 2C

FORMULARIO DE MEZCLAS

Fecha de muestra: 22-Oct-04 No. Mezcla:

Tipo de mezcla: MEZCLA TIPO 2 Bachado de 0.04m³

MASADA TEARICA Y PRACTICA			MATERIAL A UTILIZAR		
Material	Teórica diseño (Kg/m3)	Teórica laboratorio Kg	Práctica laboratorio Kg	Procedencia	Absorción %
Agua	153	6.12	6.12	San Miguel	
Cemento	534	21.36	21.36	ARI 24 SM	
Mat. Cement.(Microsilice)	64	2.56	2.56	Master Builders	
Agregado fino	548	21.92	23.86 + 1.94	Agregua z. 6	0.93
Agregado grueso	1091	43.64	43.45 - 0.19	Piedrin 1" Agregua z. 6	0.72
Adit. Polyheed(ml/kg*cem)	3475ml	139ml	90ml - 49ml	Master Builders	
Adit. Glenium (ml/kg*cem)	6950ml	278ml	200ml - 78ml	Master Builders	
Masa total	2400.42	96.01	97.64		

Datos de la mezcla		% Humedad contenida	
Resistencia	<6000 psi	Agregado fino	5.83
Relación A/C (masa)	0.26	Agregado grueso	0.57
Asentamiento	6"	Temperatura	
% Agregado fino		T - C : 25 Grad C.	T - A : 28 Grad. C
Número de sacos/m3	12.5		

Observaciones: mezcla pastosa debido a la gran cantidad de cemento y a la no utilización de aditivos

T - C : Temp. Concreto
T - A : Temp. Ambiente

Datos prácticos	Datos analíticos	Cantidades reales de materiales (Kg/m3)
Asentamiento	Agua neta	Cemento
Trabajabilidad	Volumen real	Agregado fino
Plasticidad	Rendimiento	Agregado grueso
Consistencia	Vol/concreto sacco	Agua
Apariencia	Tipo 2 C	% Aire
Agua empleada		Masa unitaria
Masa unitaria		Relación A/C
% Aire		
No. cilindros		
	ARENA TRITURADA	
	12.5 sacos	

Figura 12. Costo unitario 1

Mezcla tipo 2A, cemento clase 5000, arena Motagua, aditivos y microsilice compactada				
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo/unidad	Total
Materiales				
Cemento clase 5000	12.5	sacos	Q38.80	Q485.00
Microsilice compactada	64	Kilos	Q13.47	Q862.08
Arena Río Motagua	0.21	m³	Q100.00	Q21.00
Grava 1"	0.41	m³	Q150.00	Q61.50
Agua	0.17	m³	Q1.95	Q0.33
Aditivo Glenium 3030	5	Litros	Q33.55	Q167.75
Aditivo Polyheed RI	3.125	Litros	Q17.57	Q54.91
Total materiales				Q1,652.57
Mano de obra				
Hechura y colocación	1	m³	75	Q75.00
Ayudante				Q37.50
Prestaciones				Q73.13
Total M.O.				Q185.63
COSTO UNITARIO				Q1,838.20

Figura 13.Costo unitario 2

Mezcla tipo 2 B, cemento para fabricar block ARI 24, arena Las Vacas, aditivos y microsiline compactada				
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo/unidad	Total
Cemento ARI 24	12.5	sacos	Q36.75	Q459.38
Microsilice compactada	64	Kilos	Q13.47	Q862.08
Arena Río Las Vacas	0.21	m³	Q100.00	Q21.00
Grava 1"	0.41	m³	Q150.00	Q61.50
Agua	0.17	m³	Q1.95	Q0.33
Aditivo Glenium 3030	4	Litros	Q33.55	Q134.20
Aditivo Polyheed RI	2	Litros	Q17.57	Q35.14
Total				Q1,573.63
Mano de obra				
Hechura y colocación	1	m³	75	Q75.00
Ayudante				Q37.50
Prestaciones				Q73.13
Total M.O.				Q185.63
COSTO UNITARIO				Q1,759.26

Figura 14. Costo unitario 3

Mezcla tipo 2 C, cemento para fabricar block ARI 24, arena triturada, aditivos y microsilice compactada				
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo/unidad	Total
Cemento ARI 24	12.5	sacos	Q36.75	Q459.38
Microsilice compactada	64	Kilos	Q13.47	Q862.08
Arena triturada	0.21	m ³	Q130.00	Q27.30
Grava 1"	0.41	m ³	Q150.00	Q61.50
Agua	0.17	m ³	Q1.95	Q0.33
Aditivo Glenium 3030	5	Litros	Q33.55	Q167.75
Aditivo Polyheed RI	2.25	Litros	Q17.57	Q39.53
Total				Q1,617.87
Mano de obra				
Hechura y colocación	1	m ³	75	Q75.00
Ayudante				Q37.50
Prestaciones				Q73.13
Total M.O.				Q185.63
COSTO UNITARIO				Q1,803.50

Tabla XX. Mezcla tipo 1A

FORMULARIO DE MEZCLAS

Fecha de muestra: 01-Mar-05 No. Mezcla: 1

Tipo de mezcla: MEZCLA TIPO 1 Bachado de 0.04m³

MASADA TEÁRICA Y PRÁCTICA			MATERIAL A UTILIZAR		
Materiales	Teórica diseño (Kg/m ³)	Teórica laboratorio Kg	Práctica laboratorio Kg	Procedencia	% Absorción
Agua	153	6.12	6.9 + 0.78	San Miguel	
Cemento	425	17	17	5000 psi SM	
Agregado fino	657	26.28	27.38 + 1.1	Agregua z. 6	1.06
Agregado grueso	1091	43.64	43.6 - 0.04	Piedrin 1" Agregua z. 6	0.72
Aditivo (ml/Kg*cem)	0	0	0		
Masa Total	2326	93.04	94.88		
Masa unitaria					

Datos de la mezcla		% Humedad contenida	
Resistencia	6000 psi	Agregado fino	5.29
Relación A/C (masa)	0.36	Agregado grueso	0
Asentamiento	4"		
% Agregado fino		Temperatura	
Número de sacos/m ³	10	T - C : 25 Grad C.	T - A : 22 Grad. C

Observaciones: Mezcla bien, sin ninguna dificultad

T - C : Temp. Concreto
T - A : Temp. Ambiente

Datos prácticos	Datos analíticos	Cantidades reales de materiales (Kg/m ³)
Asentamiento	Agua neta	Cemento
Trabajabilidad	Volumen real	Agregado fino
Plasticidad	Rendimiento	Agregado grueso
Consistencia	Vol/concreto sacco	Agua
Apariencia	Tipo 1 A	% Aire
Agua empleada	CEMENTO CLASE 5000 PSI	Masa unitaria
Masa unitaria		Relación A/C
% Aire		
No. cilindros		10 Sacos

Tabla XXI. Mezcla tipo 1B

FORMULARIO DE MEZCLAS

Fecha de muestra: 23-Jul-04 No. Mezcla:
 Tipo de mezcla: MEZCLA TIPO 1 Bachado de 0.05m³

MASADA TEÁRICA Y PRÁCTICA			MATERIAL A UTILIZAR		
Material	Teórica diseño (Kg/m ³)	Teórica laboratorio Kg	Práctica laboratorio Kg	Procedencia	% Absorción
Agua	153	7.65	8.55 + 0.9	San Miguel	
Cemento	425	21.25	21.25	Secado Rapido ARI 24	
Agregado fino	657	32.85	33.83 + 0.98	Agregua z. 6	0.93
Agregado grueso	1091	54.55	54 - 0.55	Piedrin 1" Agregua z. 6	0.72
Aditivo (ml/kg*cem)	0	0	0		
Masa Total	2326	116.3	117.63		
Masa unitaria					

Datos de la mezcla		% Humedad contenida	
Resistencia	6000 psi	Agregado fino	3.65
Relación A/C (masa)	0.36	Agregado grueso	0.24
Asentamiento	4"	Temperatura	
% Agregado fino		T - C : 24 Grad C	T - A : 32 Grad. C
Número de sacos/m ³	10		

Observaciones: mezcla pedregosa, por aumento en arena para mejorar relación en pasta.

T - C : Temp. Concreto
T - A : Temp. Ambiente

Datos prácticos		Datos analíticos		Cantidades reales de materiales (Kg/m ³)	
Asentamiento	4"	Agua neta	8.98	Cemento	436
Trabajabilidad	Buena	Volumen real	0.048687914	Agregado fino	675
Plasticidad	Buena	Rendimiento	0.973758278	Agregado grueso	1120
Consistencia	Buena	Vol/concreto sacco	0.097375828	Agua	184
Apariencia	Pedregosa	Tipo 1 B		% Aire	1.2
Agua empleada	8.55	CEMENTO SECADO RAPIDO ARI 24		Masa unitaria	2417.2
Masa unitaria	2416			Relación A/C	0.42
% Aire	1.2				
No. cilindros	8				
					10 sacos

Tabla XXII. Mezcla tipo 1C

FORMULARIO DE MEZCLAS

Fecha de muestra: 09-Ago-04 No. Mezcla:
 Tipo de mezcla: MEZCLA TIPO 1 Bachado de 0.05m³

MASADA TEÁRICA Y PRÁCTICA			MATERIAL A UTILIZAR		
Material	Teórica diseño (Kg/m ³)	Teórica laboratorio Kg	Práctica laboratorio Kg	Procedencia	% Absorción
Agua	153	7.65	9.75 + 2.1	San Miguel	
Cemento	425	21.25	21.25	UGC Cementos Progreso	
Agregado fino	657	32.85	33.62 + 0.77	Agregua z. 6	0.93
Agregado grueso	1091	54.55	54.34 - 0.20	Piedrin 1" Agregua z. 6	0.72
Aditivo (ml/kg*cem)	0	0	0		
Masa Total	2326	116.3	118.96		
Masa unitaria					

Datos de la mezcla		% Humedad contenida	
Resistencia	6000 psi	Agregado fino	3.3
Relación A/C (masa)	0.36	Agregado grueso	0.34
Asentamiento	4"		
% Agregado fino		Temperatura	
Número de sacos/m ³	10	T - C : 24 Grad C.	T - A : 30 Grad. C

Observaciones: mezcla bien, pero requisito de más agua que las anteriores y aumento la rel A/C

T - C : Temp. Concreto
 T - A : Temp. Ambiente

Datos prácticos		Datos analíticos		Cantidades reales de materiales (Kg/m ³)	
Asentamiento	4"	Agua neta	10.32	Cemento	378
Trabajabilidad	Buena	Volumen real	0.056166195	Agregado fino	585
Plasticidad	Buena	Rendimiento	1.12332389	Agregado grueso	971
Consistencia	Buena	Vol/concreto saco	0.112332389	Agua	184
Apariencia	Pastosa	Tipo 1 C		% Aire	1.2
Agua empleada	9.75	CEMENTO UGC		Masa unitaria	2119.4
Masa unitaria	2118			Relación A/C	0.49
% Aire	1.4				
No. cilindros	8				10 sacos

Tabla XXIII 7. Mezcla tipo 3A

FORMULARIO DE MEZCLAS

Fecha de muestra: 03-Sep-04 No. Mezcla:
 Tipo de mezcla: MEZCLA TIPO 3 Bachado de 0.05m³

MASADA TEÁRICA Y PRÁCTICA			MATERIAL A UTILIZAR		
Material	Teórica diseño (Kg/m ³)	Teórica laboratorio Kg	Práctica laboratorio Kg	Procedencia	% Absorción
Agua	153	7.65	9.25	San Miguel	
Cemento	510	25.5	25.5	ARI 24 SM	
Mat. Cement.(Microsilice)	51	2.55	2.55	Master Builders	
Agregado fino	548	27.4	29.4 + 2.54	Las Vacas	5.19
Agregado grueso	1091	54.55	54.57 + 0.02	Piedrin 1" Agregua z. 6	0.5
Adit. Polyheed(ml/kg*cem)	3475ml	173.75ml	90ml - 83.75 ml	Master Builders	
Adit. Glenium (ml/kg*cem)	6950ml	347.5ml	150ml - 197.5ml	Master Builders	
Masa total	2363	118.17	119.91		

Datos de la mezcla		% Humedad contenida	
Resistencia	<6000 psi	Agregado fino	14.96
Relación A/C (masa)	0.27	Agregado grueso	5.19
Asentamiento	6"	Temperatura	
% Agregado fino		T - C : Temp. Concreto	
Número de sacos/m ³	12	T - A : Temp. Ambiente	

Observaciones: mezcla pastosa debido a la gran cantidad de cemento y a la no utilización de aditivos

Datos prácticos		Datos analíticos		Cantidades reales de materiales (Kg/m ³)	
Asentamiento	6.5	Agua neta	10.21	Cemento	529
Trabajabilidad	Buena	Volumen real	0.053057522	Agregado fino	516
Plasticidad	Buena	Rendimiento	1.061150442	Agregado grueso	1028
Consistencia	Buena	Vol/concreto saco	0.088429204	Agua	192
Apariencia	Buena	Tipo 3 A		% Aire	4.0
Agua empleada	7.65	CEMENTO SECADO RAPIDO ARI 24		Masa unitaria	2270
Masa unitaria	2260			Relación A/C	0.36
% Aire	4				
No. cilindros	8				

Tabla XXIV. Mezcla tipo 3 B

FORMULARIO DE MEZCLAS

Fecha de muestra: **03-Sep-04** 1

Tipo de mezcla: **MEZCLA TIPO 3 Bachado de 0.05m³** No. Mezcla: _____

MASADA TEÁRICA Y PRÁCTICA			MATERIAL A UTILIZAR		
Materiales	Teórica diseño (Kg/m3)	Teórica laboratorio Kg	Práctica laboratorio Kg	Procedencia	Absorción %
Agua	153	7.65	9.65 + 2	San Miguel	
Cemento	510	25.5	25.5	ARI 24 SM	
Mat. Cement.(Microsilice)	51	2.55	2.55	Master Builders	
Agregado fino	548	27.4	27.56 + 0.16	Las Vacas	5.19
Agregado grueso	1091	54.55	54.19 - 0.36	Piedrin 1" Agregua z. 6	0.5
Adit. Polyheed(ml/kg*cem)	3475ml	173.75ml	100ml - 73.75 ml	Master Builders	
Adit. Glenium (ml/kg*cem)	6950ml	347.5ml	180ml - 167.5ml	Master Builders	
Masa total	2363	118.17	119.73		

Datos de la mezcla

Resistencia	<6000 psi	% Humedad contenida	
Relación A/C (masa)	0.27	Agregado fino	5.83
Asentamiento	6"	Agregado grueso	0.57
% Agregado fino		Temperatura	
Número de sacos/m3	12	T - C : 25 Grad C.	T - A : 28 Grad. C

Observaciones: mezcla muy chicolosa o plástica con asentamiento alto, pero después de dejarla 30 minutos disminuyo a 1 1/2", aun se le agrego mas agua adicional

T - C : Temp. Concreto
T - A : Temp. Ambiente

Datos prácticos	Datos analíticos	Cantidades reales de materiales (Kg/m3)
Asentamiento	Agua neta	Cemento
Trabajabilidad	Volumen real	Agregado fino
Plasticidad	Rendimiento	Agregado grueso
Consistencia	Vol/concreto sacco	Agua
Apariencia	Tipo 3 B	% Aire
Agua empleada	Chicolosa	Masa unitaria
Masa unitaria	9.65	Relación A/C
% Aire	2335	
No. cilindros	2.1	
	8	
		CEMENTO
		UGC
		12sacos