



CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE  
DURMIENTES PARA EL STC-METRO



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN

CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA  
EN LA PRODUCCIÓN DE DURMIENTES  
PARA EL STC-METRO

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

PRESENTA  
ALFONSO HERNÁNDEZ CRUZ

ASESOR:  
ING. MANUEL GÓMEZ GUTIÉRREZ

MÉXICO, D.F.      OCTUBRE, 2010





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



## CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE DURMIENTES PARA EL STC-METRO

### ÍNDICE

**OBJETIVO GENERAL:** Identificar los materiales componentes del concreto de alta resistencia, así como las propiedades físicas, mecánicas y de resistencia a través del proceso de producción de mezclas que permitan obtener resultados óptimos para su aplicación en durmientes de concreto de alta resistencia.

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	1
<b>INTRODUCCIÓN</b>	3
<b>CAPITULO 1 ANTECEDENTES</b>	
1.1. Origen del concreto de alta resistencia	5
1.2. El concreto de alta resistencia como material estructural	7
1.3. Evolución tecnológica del concreto de alta resistencia	13
<b>CAPÍTULO 2 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA</b>	
2.1. Materiales constitutivos	20
2.1.1. Cemento-tipos	20
2.1.2. Contenido de cemento	23
2.1.3. Selección de agregados	25
2.1.4. Contenido de agua	41
2.1.5. Aditivos	47
2.2. Propiedades físicas	56
2.2.1. Permeabilidad	56



2.2.2. Elasticidad	58
2.2.3. Plasticidad	60
2.2.4. Durabilidad	61
2.3. Propiedades mecánicas	67
2.3.1. Resistencia a la compresión	68
2.3.2. Resistencia a la flexión	73
2.4. Factores que afectan la resistencia	76
 <b>CAPÍTULO 3 CONSIDERACIONES ESPECIALES EN LA PRODUCCIÓN DE DURMIENTES DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA</b>	
3.1. Diseño de mezclas	83
3.2. Proporcionamiento	84
3.3. Desarrollo de la resistencia	97
3.4. Pruebas de laboratorio	102
3.5. Factores que determinan la calidad	111
3.5.1. Fabricación	111
3.5.2. Transporte	115
3.5.3. Colocación	117
3.5.4. Acabado y curado	120
3.6. Ventajas y desventajas	127
3.6.1. En estructuras de concreto	128



## **CAPÍTULO 4 APLICACIONES E INVESTIGACIONES RECIENTES**

4.1. Características generales de durmientes de concreto de alta resistencia	132
4.2. Tecnología en el proceso de producción de durmientes de concreto de alta Resistencia	151
<b>CONCLUSIONES</b>	161
<b>RECOMENDACIONES</b>	165
<b>TABLAS Y GRÁFICAS</b>	166
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	179



## AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Por haberme dado un lugar en la vida y por guiarme en este camino, brindándome de todas las facultades físicas e intelectuales para superar y comprender las experiencias difíciles; también para valorar y atesorar las experiencias inolvidables de la vida.

A mis Padres:

A mi padre Alfonso Miguel Hernández Martínez y mi madre Benita Cruz García, por el amor que siempre me han brindado como hijo, por su confianza y la fe que han puesto en mí; por su apoyo incondicional y por todos los sacrificios que han hecho en todo momento de mi vida. Por la oportunidad que me han dado de prepararme profesionalmente y por la persistencia que me han inculcado desde hace muchos años, así como de los valores éticos y morales que me siguen inculcando y me han hecho crecer en mi personalidad, sin dejar de ser una persona humilde y sencilla.

A mis Hermanos:

Hilda y Francisco Hernández Cruz; por su comprensión, apoyo y sus consejos, además de que han sido parte primordial en mi desarrollo personal y porque ustedes han sido las dos personas de las cuales he aprendido la perseverancia y son un claro ejemplo para mí. También quiero agradecer a Anabel Calderón Castillo y a mis dos sobrinos Jonathan Iván y Edgar Isaac por su cariño y apoyo en todo momento y por ser parte de mi familia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por permitirme ser parte de su comunidad; principalmente porque ha sido el lugar en donde he tenido la oportunidad de prepararme profesionalmente y además porque es también un lugar ocupado con personas llenas de conocimiento, de voluntad, respeto y amistad.

A mi Asesor:

Al Ing. Manuel Gómez Gutiérrez, por su amistad, confianza y aporte de su experiencia, por su paciencia y tiempo invertidos durante este tiempo, con la finalidad de guiarme y brindándome un gran aporte a lo largo del desarrollo de este trabajo de investigación.

A mis Maestros:

Por la entrega que reflejan en sus cátedras, por su exigencia, por su paciencia y su amistad. Por hacer todo lo posible de transmitirme con facilidad sus conocimientos, para que pudiera comprender no sólo el significado de tomar una materia en la Universidad, una clase en el aula o de una ecuación en la hoja de papel, sino para comprender principalmente la responsabilidad, el compromiso, la honestidad, la ética y el profesionalismo que representa ser un ingeniero civil.



CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE  
DURMIENTES PARA EL STC-METRO



A mis Amigos:

No es muy difícil tener en mente a todas esas personas que me han acompañado en el transcurso de mi vida. Quiero dar un agradecimiento especial a Rosa Elena Venegas Pérez por tu cariño y comprensión y tu paciencia al escucharme y por todo este tiempo de amistad incondicional. A Marian Maribel Santiago Trujillo por brindarme esa energía, carisma y como tú dices, de ganas de vivir la vida al máximo, así como por tu cariño y tiempo compartido. También quiero agradecer a tres personas que me han brindado su amistad, además que dos de ustedes fueron compañeros en la Universidad; Eduardo Gaitán Soto y Gabriel Brindiz García, les agradezco su amistad, sus consejos y por todas las vivencias que hasta hoy he tenido oportunidad de compartir con ustedes. A Wilber Rueda Cabrera, por su ayuda y por la amistad desinteresada que se ha dado en todo este tiempo. Además un agradecimiento especial para Gabriel y Wilber, por su apoyo de bibliografía y conocimientos para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente un Agradecimiento Especial:

Quiero dar un agradecimiento infinito para el Ing. Luis Mendoza Rico por su apoyo invaluable, por la oportunidad que me brindó al permitirme desarrollar este estudio en su laboratorio de pruebas de concreto, por todos los conocimientos y enorme experiencia que me compartió en este tiempo, por su paciencia, por sus consejos, por su tiempo y dedicación, además de su sencillez y personalidad; por todo esto que no es muy fácil encontrar hoy en día.

A Juan Huerta Carreón y Martín De Rafael Arroyo, por su ayuda y trabajo dentro del laboratorio de concreto; por sus conocimientos y experiencia que me compartieron, también por la confianza que me brindaron a lo largo de este trabajo y su sencillez, haciéndolos unas personas respetables.

También quiero agradecer al Ing. Daniel Dueñas González, principalmente por su amistad durante todo este tiempo, sus asesorías y aporte de conocimientos, el apoyo, su dedicación, por el tiempo y su punto de vista en el desarrollo de este estudio.



## INTRODUCCIÓN

El desarrollo reciente y las crecientes necesidades en la Ingeniería Civil, han originado en la actualidad una amplia investigación del uso de los materiales de construcción; actualmente existe una amplia literatura de los tres materiales más convencionales como lo son la madera, el acero y el concreto. Para efectos de este trabajo se hablará de uno de los materiales que ha tenido una significativa evolución tecnológica con el transcurso de los años; este material que tiene una aplicación importante en las diversas estructuras de ingeniería, se conoce como concreto; cuyas mejoras y avances fueron el punto de partida en la evolución de concretos más vanguardistas, dando como resultado uno de ellos que se conoce en la actualidad y que tiene diversas aplicaciones para distintas necesidades; el concreto de alta resistencia.

Dentro de la ingeniería civil, el concreto de alta resistencia tiene un lugar trascendente y de ahí la necesidad de ser investigado, para conocer sus alcances, sus características y la extensión de sus aplicaciones. El término concreto de alta resistencia es relativo, dado que en algún lugar donde es considerado concreto de alta resistencia, en otros lugares puede ser considerado concreto de resistencia normal.

La presente investigación pretende dentro de las posibilidades, encontrar un término para definir al concreto de alta resistencia, así como conocer un rango que diferencie un concreto de resistencia normal y un concreto de alta resistencia. De esta manera, los principales objetivos del estudio son:

1. Conocer las características principales de los materiales constitutivos, para producir un concreto de alta resistencia que será aplicado en los durmientes de concreto para el STC-Metro; utilizando materiales comunes y disponibles que ofrezcan los mejores resultados en cuanto a resistencia.
2. Establecer el diseño de la mezcla y proporcionamiento para producir un concreto que tenga en promedio una resistencia especificada de  $490 \text{ kg/cm}^2$ , mediante el seguimiento de la normatividad y un estricto control de calidad en el laboratorio, para la elaboración de especímenes de prueba.
3. Determinar las propiedades de resistencia a compresión axial y flexión en el concreto producido en el laboratorio y que cumpla con los requisitos de la especificación ejecutiva de proyecto, la cual establece como objetivo de alcance; lograr una resistencia promedio a la compresión de  $490 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia promedio a flexión de  $65 \text{ kg/cm}^2$  para una edad de 28 días.

Para lograr los objetivos mencionados se acudió en primera instancia a una investigación documental sobre el estado del arte y los avances del concreto de alta resistencia, así como a la normatividad establecida por las entidades pertinentes, con el fin de darle las mejores características posibles a los agregados de la mezcla de concreto de alta resistencia.





## CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE DURMIENTES PARA EL STC-METRO



Posteriormente para el estudio, se recurrió al proporcionamiento de los materiales de la mezcla de concreto de alta resistencia teniendo en consideración las recomendaciones de investigaciones antes realizadas para diferentes proyectos con diferentes características y usos; tomando en cuenta principalmente el consumo de cemento, la relación agua/material cementante, las proporciones de los agregados fino y grueso, así como el revenimiento.

Finalmente se recurrió a la comprobación del desarrollo de resistencia de ensayos de muestras de laboratorio que fueron sometidas a cargas de compresión y flexión para presentar los resultados de resistencia en los diferentes ensayos de laboratorio.

El presente estudio está conformado por cuatro capítulos, un apartado de conclusiones y recomendaciones, además de la bibliografía consultada. En el primer capítulo describe los antecedentes del concreto de alta resistencia, su intervención en la ingeniería civil como material de construcción, así como los avances que ha tenido a través del tiempo.

En el segundo capítulo, se dan a conocer las generalidades de las características de los materiales constitutivos del concreto de alta resistencia, así como las propiedades físicas y mecánicas del concreto, que permiten conocer la forma en que influyen en su resistencia.

El capítulo tres consta del conocimiento de los materiales empleados para el diseño y proporcionamiento de la mezcla de concreto, que serán utilizados para la producción de durmientes de concreto de alta resistencia, presentando los resultados de las pruebas de laboratorio en su comportamiento mecánico y desarrollo de resistencia.

El cuarto capítulo presenta algunas generalidades de proyecto para durmientes de concreto de alta resistencia, así como la descripción general de la producción de durmientes de concreto en planta.

Finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones que se originaron en base al desarrollo de la presente investigación y por último se hace mención de las referencias consultadas que ayudaron de principio a fin en este estudio, esperando que la información que ha sido fundamentada en este trabajo, ayude a comprender y conocer un poco más sobre este material de construcción, así como también se espera que la información recapitulada influya, en las futuras generaciones de ingenieros para continuar la investigación sobre los avances del concreto.



## CAPITULO 1 ANTECEDENTES

### 1.1 ORIGEN DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Los factores que hacen del concreto un material de construcción universal son tan evidentes que ha sido utilizado de diversas maneras por miles de años; probablemente se comenzó a usar en el antiguo Egipto. Uno de los factores consiste en la facilidad con la cual, mientras se encuentra en estado plástico, puede depositarse y llenar moldes de cualquier forma; su alta resistencia al fuego y al clima son ventajas evidentes, aparte de considerar que la mayor parte de los materiales constitutivos, con la excepción del cemento y los aditivos, están disponibles a bajo costo, localmente o muy cerca del sitio de construcción. Su resistencia a la compresión, similar a la de las rocas naturales, es alta lo que lo hace apropiado para elementos sometidos principalmente a compresión, tales como columnas o arcos. Por otra parte el concreto es un material relativamente frágil, con baja resistencia a la tensión comparada con la resistencia a la compresión; esto de alguna forma impide su uso en elementos estructurales sometidos a tensión ya sea en toda su sección, como es el caso de elementos de amarre o sobre parte de secciones transversales como vigas u otros elementos sometidos a flexión.

El *concreto* como se mencionó anteriormente, es un material semejante a una roca que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, arena, grava u otro agregado y agua; después, esta mezcla se endurece con la forma y dimensiones deseadas; el cuerpo del material consiste en agregado fino y grueso, por su parte el cemento y el agua interactúan químicamente para unir las partículas de agregado y conforman una masa sólida; también es importante considerar en darle una trabajabilidad adecuada antes de que inicie el endurecimiento. Se pueden obtener concretos en un amplio rango de propiedades ajustando apropiadamente las proporciones de los materiales constitutivos; un rango aún más amplio de propiedades puede obtenerse mediante la utilización de cementos especiales como por ejemplo, cementos de alta resistencia inicial, agregados especiales ligeros o pesados, aditivos que pueden ser plastificantes y agentes incorporadores de aire, microsílíce o cenizas volantes y mediante métodos especiales de curado, como lo puede ser el curado a vapor.

Históricamente, el desarrollo de la tecnología del concreto ha sido lento; excepciones notables incluyen el descubrimiento de la ley de la relación agua-cemento en 1919, y de la inclusión de aire, en 1938. Hoy día estamos ante una nueva y revolucionaria etapa de la tecnología del concreto, la introducción de nuevos aditivos y materiales cementantes ha permitido la producción de concretos de una muy alta operatividad con propiedades mecánicas superiores y una mayor durabilidad. Esta nueva clase de concreto ha sido llamado *concreto de alta resistencia* y se espera que su uso tenga un alto impacto en la industria de la construcción y en el desempeño de las estructuras de concreto.

El *concreto de alta resistencia* surge de la misma necesidad, avances y requerimientos de las nuevas obras civiles ya que el *concreto de alta resistencia* supera las propiedades y la constructibilidad del concreto convencional. Para producir estos concretos especialmente diseñados, se usan materiales normales y especiales y pueden ser necesarias prácticas especiales de mezclado, colocación y curado.



Normalmente, es necesario hacer un gran número de pruebas de desempeño para demostrar la satisfacción y llegar al alcance de las necesidades del proyecto.

Una expresión importante que se puede hacer es, como se define exactamente al *concreto de alta resistencia*; esta es, de hecho una pregunta pertinente, pues al romperse las barreras en forma progresiva la línea divisoria entre el concreto de resistencia media y el de alta resistencia también se ha movido progresivamente, aunque el término puede, por lo tanto, tener distintos significados para diferentes personas, por consenso se ha denominado concreto de alta resistencia a aquel cuya resistencia a la comprensión medida en cubos a los 28 días está entre los 420 kg/cm<sup>2</sup> o más si se elabora con agregado de peso normal y de 305 kg/cm<sup>2</sup> o más si tiene agregado ligero. Esto se justifica por dos hechos: primero, los proveedores de concreto premezclado, hoy en día suministran a diario concretos con estos límites de resistencia y, aunque resistencias más elevadas no están fuera de su capacidad, sería esencial el empleo más selectivo de materiales combinado con procedimientos más estrictos de control de calidad. Segundo, la práctica actual de diseño está basada, entre otras cosas, en propiedades observadas en experimentos hechos con concretos de resistencias hasta de 510 kg/cm<sup>2</sup>. Para concretos de resistencias mayores, puede ser necesario tomar en cuenta factores adicionales y modificar ecuaciones empíricas para poder calcular las características elásticas de dichos concretos. Actualmente el límite superior del concreto de alta resistencia, empleando agregados de peso normal; se define como de 1400 kg/cm<sup>2</sup> y los concretos que exceden este tope caen dentro de la categoría de ultra-alta resistencia; cabe mencionar que en otros países se ha logrado hasta 2000 kg/cm<sup>2</sup> en mezclas especiales de laboratorio.

La definición de *alta resistencia* cambia a lo largo de los años a medida que la resistencia del concreto empleado en las obras aumenta. Por ejemplo, hoy en día el 90% del concreto premezclado (elaborado, preparado, industrializado) tiene una resistencia especificada a los 28 días que varía entre los 280 y 350 kg/cm<sup>2</sup>; por lo tanto se considera un concreto de alta resistencia aquél que tenga por lo menos, una resistencia de diseño de 420 kg/cm<sup>2</sup>. Es esencial el cumplimiento de las recomendaciones para el laboratorio de preconstrucción y los procedimientos de prueba en campo descritos en el ACI 363.2

Por lo anterior y para el caso práctico de este trabajo, el *concreto de alta resistencia* (CAR) se define como el concreto que tiene una resistencia a compresión especificada  $f'c$  de 420 kg/cm<sup>2</sup>, en edificios se han llegado a usar concretos con resistencias de  $f'c$  de 1400 kg/cm<sup>2</sup>; se define también como un concreto que tiene las propiedades deseadas y uniformidad que no pueden ser obtenidas rutinariamente usando sólo los constituyentes tradicionales con el mezclado, colocación y curado comunes.

Tradicionalmente, la resistencia especificada del concreto se basa en los resultados de las pruebas a los 28 días. Sin embargo en estructuras de edificios altos, el proceso constructivo es tal que los elementos estructurales en los pisos de abajo no son totalmente cargados por periodos de un año o más; así en estos casos, es común la especificación de la resistencia basada en resultados de pruebas a los 56 ó 91 días, a fin de lograr una economía significativa de los costos de los materiales. Cuando se especifican edades más avanzadas, normalmente se incorporan en la mezcla de concreto materiales cementantes suplementarios, produciéndose beneficios adicionales, tales como reducción del calor generado durante la hidratación.

Los *concretos de alta resistencia* y bajo revenimiento o incluso revenimiento cero se producen habitualmente bajo el control adecuado implantado en las plantas de concreto premoldeado y pretensado.



Estas mezclas más secas se colocan en cimbras rústicas y se les consolida por un tiempo más prolongado o por método de altas vibraciones, sin embargo por otra parte, el concreto colado en obra emplea cimbras más frágiles que no permiten los mismos procedimientos de compactación y, por lo tanto, se hacen necesarios concretos más trabajables para que se logre la compactación requerida y para que se evite la segregación y la formación de porosidades. Los aditivos superplastificantes se adicionan invariablemente a los *concretos de alta resistencia* para producir mezclas más trabajables y fluidas.

La producción del *concreto de alta resistencia* puede, o no, requerir la compra de materiales especiales, por lo tanto el productor debe saber los factores que afectan la resistencia a compresión y como variar estos factores para que se obtengan los mejores resultados. Al desarrollarse el diseño de la mezcla, se debe analizar cada variable separadamente; cuando se establece la cantidad óptima, o cerca de la óptima, de cada variable, se la debe ir incorporando a medida que se estudian las variables remanentes. Se desarrolla, entonces, un diseño óptimo de la mezcla, tomando en consideración las ventajas económicas del uso de los materiales localmente disponibles.

## 1.2 EL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA COMO MATERIAL ESTRUCTURAL.

Con el transcurso del tiempo se ha registrado una continua generalización de las construcciones de concreto; hoy día continúa esta tendencia y proseguirá igual en el futuro; constantemente se requiere que se mejore el comportamiento del concreto, tanto para soportar cargas como para resistir el intemperismo. Por tanto, cada vez es más necesario que las mezclas de concreto se fabriquen de forma adecuada y que los procedimientos para transportarlo, manejarlo, colocarlo y curarlo sean los más apropiados.

Dentro de la construcción de obras civiles existen dos materiales; el concreto y el acero, estos materiales han alcanzado una gran importancia y necesidad en las estructuras, se puede trabajar con cada uno de ellos de forma independiente o mejor aún, con el complemento de ambos cuando se requiera y en base a las necesidades del proyecto.

Fundamentalmente el uso del concreto está destinado a la construcción de viviendas o a cualquier tipo de edificaciones, existen estructuras que no requieren altas resistencias como los pisos, las banquetas, los muros, etc., pero hay elementos estructurales que sí, como las columnas, las losas, las traveses, etc. El concreto en general ha obtenido una gran utilidad estructural por la inventiva de varios de los usuarios de este material. Su utilidad se ha obtenido a pesar de las limitaciones básicas y de su capacidad limitada para resistir esfuerzos de tensión. La resistencia a la tensión se ha obtenido mediante la unión efectiva del acero y del concreto.

Algunas veces es posible usar concreto por su resistencia a la compresión solamente; puede conectarse a la porción superior de un miembro de acero, actuando de esta manera como una sección compuesta. Los tableros de los puentes de las carreteras se proyectan a menudo de manera que tengan el doble objeto de servir a la superficie de rodamiento y de aumentar la resistencia a la compresión, por otro lado el concreto también encuentra una amplia aplicación en la forma de losas para pavimentos, aquí se utiliza la



resistencia a la tensión del concreto y el esfuerzo sirve principalmente para el control de las grietas; el concreto para losas de pavimento se evalúa en función del módulo de ruptura. Se puede mencionar que los materiales asfálticos encuentran una gran aplicación en la industria de la construcción. El uso del asfalto como agente cementante es la más común de sus aplicaciones, los productos asfálticos se usan para producir pavimentos flexibles para carreteras y aeropuertos.

El término “flexible” se usa para distinguir estos pavimentos de los hechos con cemento portland, que se clasifican como rígidos, es decir que trabajan como vigas; la clasificación de los pavimentos flexibles puede dividirse también en tipos de primera y segunda categoría, dependiendo el tipo del que se use un producto asfáltico sólido o líquido. Los tipos inferiores de pavimento se hacen con asfaltos disueltos, o emulsiones que son productos líquidos y que se usan mucho en todo el país, el tipo superior de pavimentos asfálticos se hace con cementos asfálticos de un grado de penetración seleccionado. Se utilizan cuando tienen que soportar cargas elevadas por rueda y grandes volúmenes de tránsito y, por lo tanto, a menudo se proyectan para una instalación especial.

El concreto como material estructural también ha servido en la autoconstrucción y la rehabilitación de la vivienda, en elementos estructurales para: naves industriales, naves de bodegas, edificios de oficinas o de estacionamientos, edificios escolares, tanques de almacenamiento con gran capacidad, puentes vehiculares, metro subterráneo y elevado, etc; lo que permite afirmar que nuestro país cuenta con la necesaria, aunque tal vez no con la suficiente infraestructura industrial para la fabricación y exportación de grandes piezas estructurales.

Ahora bien y con relación al concreto de alta resistencia, se han encontrado diversas utilidades prácticas, especialmente en la construcción de edificios de gran altura, en sus columnas y muros de cortante, que trae como consecuencia la reducción del acero de refuerzo longitudinal; en puentes, en la elaboración de elementos prefabricados, durmientes y pilotes de concreto reforzado o presforzado, en plataformas marinas, viaductos o túneles, en pavimentos, etc. El concreto en sí, es un material compuesto (tabla 1.2.1); formado por partículas de material granular grueso (agregados minerales o rellenos) embebidos en una matriz dura de material (cemento o ligante) que llena los espacios vacíos entre las partículas y burbujas manteniéndolas juntas.

**DEFINICIONES PARA EL CONCRETO**

Concreto	=	Agregados	+	Cemento
Concreto de cemento portland	=	Agregado (fino + grueso)	+	Pasta de cemento portland
Mortero	=	Agregado fino	+	Pasta
Pasta	=	Cemento	+	Agua

Tabla 1.2.1.

Los agregados pueden ser obtenidos de diferentes tipos de materiales, sin embargo principalmente se hace uso de los materiales naturales (comúnmente rocas). Estos son esencialmente materiales inertes los cuales, por conveniencia, son separados en una fracción gruesa y en una fracción fina; similarmente el cemento puede ser formulado a partir de diferentes composiciones químicas. Cemento es un nombre genérico que puede ser aplicado a cualquier material ligante, por lo tanto; por su parte, existen varias definiciones que



deben ser utilizadas para calificar al cemento cuando nos referimos a un cemento específico; de este modo, un ingeniero civil puede tener la necesidad de usar concreto de cemento portland, concreto de cemento aluminoso ó concreto epóxico donde los ligantes son cemento portland, cemento aluminoso, o resina epóxica respectivamente. En construcción el ingeniero civil utiliza concreto de cemento portland el 95 % de las veces, debido a esto por conveniencia; a menudo se hará obvio el adjetivo portland y se usará un adjetivo que describa del tipo de cemento cuando se trate con otros tipos de cementos y concretos.

Por otra parte, una estructura puede concebirse como un sistema, es decir, como un conjunto de partes o componentes que se combinan en forma ordenada para cumplir una función dada. La función puede ser: salvar un claro, como en los puentes; encerrar un espacio, como sucede en los distintos tipos de edificios; o contener un empuje, como en los muros de contención; tanques o silos, contener un determinado peso que además se puede encontrar combinado a una cierta vibración, como es el caso de los durmientes de concreto. La estructura debe cumplir la función a la que está destinada con un grado razonable de seguridad y de manera que tenga un comportamiento adecuado en las condiciones normales de servicio. Además, deben satisfacerse otros requisitos, tales como mantener el costo dentro de los límites económicos y satisfacer determinadas exigencias estéticas y de normatividad.

Debido a estos requisitos es preciso conocer las relaciones que existen entre las características de los elementos de una estructura (dimensiones, refuerzos, etc.), las solicitaciones que debe soportar y los efectos que dichas solicitaciones producen en la estructura. En otras palabras, es necesario conocer las características acción-respuesta de la estructura estudiada. Las acciones en una estructura son las solicitaciones a que puede estar sometida, entre éstas se encuentran; por ejemplo, el peso propio, las cargas vivas, las presiones por viento, las aceleraciones por sismo y los asentamientos. La respuesta de una estructura, o de un elemento, es su comportamiento bajo una acción determinada, y puede expresarse como deformación, agrietamiento, durabilidad, vibración, desde luego, la respuesta está en función de las características de la estructura, o del elemento estructural considerado. Si se conocen las relaciones para todas las combinaciones posibles de acciones y características de una estructura, se contará con una base racional para establecer un método de diseño. Este tendrá por objeto determinar las características que deberá tener una estructura para que, al estar sometida a ciertas acciones, su comportamiento o respuesta sea aceptable desde los puntos de vista de seguridad frente a la falla y de utilidad en condiciones de servicio.

En los procedimientos de diseño, el dimensionamiento se lleva a cabo normalmente a partir de las acciones interiores, calculadas por medio de un análisis de la estructura. Debe notarse que, para diseñar satisfactoriamente no siempre es necesario obtener las acciones interiores inducidas por las exteriores. Las principales acciones interiores que actúan en las estructuras las podemos enumerar en: a) compresión, b) tensión, c) torsión y, d) cortante.

El notable incremento en la resistencia del concreto alcanzado en los últimos años le ha permitido ir desplazando progresivamente al acero en la construcción de edificios altos. Hasta hace unos 20 años, y desde la irrupción de los rascacielos dentro del paisaje urbano, la estructura metálica ha sido la tipología fundamental por lo que se refiere al material constituyente de la misma, sin embargo; el empleo del concreto como material base en las estructuras de los edificios altos se ha incrementado notablemente en los últimos años.

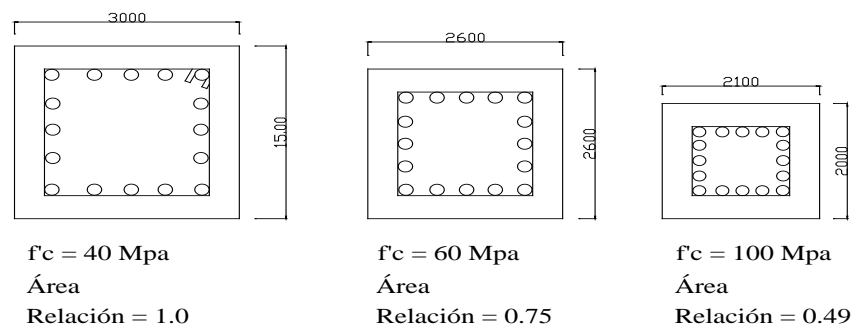
Un dato objetivo que confirma el hecho comentado en el párrafo anterior se obtiene del análisis de la relación de los "100 edificios más altos del mundo". Entre éstos se encuentran 17 construidos en los años setenta, 27 en los ochenta y 42 en los noventa. Los porcentajes de edificios construidos con estructura de acero, concreto o mixta. Como puede apreciarse, se produce no sólo un descenso del porcentaje de edificios construidos con estructura metálica y un aumento de los de estructura de concreto, sino que el número de estos últimos llega a ser superior al de los primeros.

Haciendo una breve comparación con otros materiales se puede observar lo siguiente; las alternativas que se plantean habitualmente en este tipo de edificios son la estructura metálica y la constituida con *concreto de alta resistencia* (CAR), entendiendo por éste el que alcanza una resistencia característica superior a los 420 kg/cm<sup>2</sup>.

De esta última se pueden subrayar las siguientes ventajas frente a la primera:

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

En la figura 1 se muestra la reducción en el tamaño de la columna cuando aumenta la resistencia del concreto para una columna corta sujeta a carga axial con un momento mínimo de flexión.



**Figura 1.** Puede lograrse una reducción del área de 51% incrementando la resistencia característica del concreto por un factor de 2.5 para una columna corta con carga axial. El refuerzo en las columnas son sólo diagramas y no muestra en toda su extensión los anillos de las columnas.



En una columna de concreto, las varillas longitudinales se mantienen en su posición por los anillos laterales muy poco espaciados, por zunchos típicamente rectangulares (o cuadrados) y por espirales circulares. A medida que se incrementa la carga en la columna, el esfuerzo del concreto se aproxima a la resistencia de compresión uniaxial y la deformación transversal (horizontal) del concreto llega a ser tan alta que desemboca un agrietamiento interno. Durante esta etapa, el concreto se apoya en el esfuerzo lateral, el cual, a su vez, aplica una presión de confinamiento en el concreto. Si no hay suficiente refuerzo lateral, entonces la columna puede fallar comportándose de una manera quebradiza. Tanto para elementos de concreto de resistencia normal como de alta resistencia, el concreto en la zona de compresión de una sección transversal debe ser adecuadamente confinado utilizando refuerzo lateral. Puesto que el concreto de alta resistencia se usa generalmente en los elementos donde las fuerzas de compresión son altas, la extensión y la cantidad de los anillos laterales necesitan ser mayores que los utilizados en elementos de compresión hechos con concreto de resistencia normal.

Una alternativa, en realidad una variante de la del *concreto de alta resistencia* (CAR), es la estructura de concreto normal, entendiendo por tal; aquél cuya resistencia característica es inferior a  $420 \text{ kg/cm}^2$ . Sin embargo, y aunque en el proyecto y ejecución de edificios altos se está empleando este tipo de concretos, los primeros presentan frente a ellos las siguientes ventajas:

- Las secciones de las columnas (elementos dimensionados, básicamente, frente a esfuerzos de compresión) son más reducidas.
- Su módulo de deformación es más elevado y, por tanto, tienen un menor acortamiento debido a esfuerzos axiales.
- La deformación de los elementos estructurales horizontales (vigas y entrepisos), para un mismo peralte, es menor.
- El peso propio global de la estructura es inferior, pudiendo suponer cierta reducción de la cimentación.
- El plazo de ejecución de la obra se puede ver reducido al permitir menor tiempo de encofrado, tanto de elementos horizontales como de muros y columnas.
- Aumento de la vida útil de la estructura del edificio. El incremento de la resistencia característica del concreto lleva asociada una mayor capacidad y, por tanto, una mayor resistencia ante el ataque de agentes agresivos externos al mismo.

El concreto de alta resistencia demuestra esencialmente mejores cualidades en lo que se refiere a resistencia a algunos factores como lo son, las heladas, resistencia a la sal y a la abrasión, y mejor permeabilidad, la penetración de los líquidos se reduce de  $1/5$  a  $1/10$  del concreto de resistencia normal. Esto se aplica, por ejemplo, a muros perimetrales de tanques que sirven como barreras secundarias en el caso de falla de dichos tanques; este concreto de alta calidad resulta adecuado para almacenar casi todas las substancias sin tener que emplear algún tipo especial de aislamiento. Las áreas de circulación de estaciones de gasolina se pueden construir con este material a fin de evitar la contaminación del suelo circundante.



Los años 80 fueron portadores de desarrollos progresivos en el diseño de mezclas de concreto. Usando agregados seleccionados y cementos combinados, se produjeron mezclas comerciales que iban desde los 420 kg/cm<sup>2</sup> hasta los 900 kg/cm<sup>2</sup> o mucho mayores, simultáneamente; se desarrollaron técnicas de construcción y aditivos para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, actualmente, se utiliza el concreto de alta resistencia en:

- muros y columnas de cortante de edificios de gran altura;
- en la obtención de alta resistencia a edad temprana para permitir una rápida transmisión del esfuerzo de hacer de presfuerzo al concreto, o para permitir un rápido desmolde de elementos prefabricados;
- en la elaboración de elementos prefabricados, como por ejemplo, durmientes, pilotes de concreto reforzado o presforzado para ser hincados;
- con el fin de permitir que dicho concreto soporte grandes cargas axiales en su aplicación final;
- para construir o reparar áreas que requieran entrar en servicio a corto plazo;
- columnas en grandes tribunas para reducir el tamaño y consecuentemente el impacto visual;
- pavimentos de carreteras para incrementar la resistencia a la abrasión;
- y plataformas petroleras frente a las costas.

El desarrollo de diferentes esquemas de estructuración, como en el caso de la edificación, a permitido el poder diseñar y construir edificios más altos. Este factor, aunado con el mejoramiento de las resistencias que actualmente se pueden obtener en los concreto de alta resistencia y el desarrollo en las técnicas de diseño, ha logrado que en los últimos 25 años se puedan construir edificios de concreto de 125 niveles y con alturas del orden de los 500 metros. Por esta parte el concreto ha ganado mucho terreno, en los últimos años hasta convertirse, hoy en día, en el material más utilizado como elemento estructural en edificios, la ventaja principal de utilizar este material en la estructura es la de reducir la aceleración lateral por efectos de viento. Al aumentar la masa, aumenta el periodo y disminuyen las fuerzas por viento, aumentando la comodidad de los ocupantes de los edificios, además es bien sabido que las estructuras de concreto generan un mayor amortiguamiento que las estructuras de acero, mayor rigidez lateral y nos ofrecen una gran facilidad en sus conexiones y, si se opta por colar primero la estructura e ir avanzando posteriormente con las losas de piso, los colados se simplifican notablemente.

Por otra parte y por su propia naturaleza, la industria de la construcción tiene un carácter conservador, los avances son lentos y es raro que se registren grandes adelantos que de repente amplíen el horizonte de las posibilidades; en lo que se refiere a su repentino impacto, el concreto de alta resistencia muestra cuando menos ciertas similitudes con el desarrollo del pretensado. El descubrimiento del humo de sílice como aditivo para el concreto, en combinación con el desarrollo de plastificantes de alto rendimiento, hizo elevar resistencia máximas permisibles del concreto colocado en el lugar a valores de 2.5 a 3 veces más altos en el curso de unos cuantos años. Los beneficios adicionales, que han estado un poco ocultos hasta la fecha, se están dando a conocer y se están encontrando nuevas aplicaciones, algunas de ellas un tanto inesperadas. Aparte de las ventajas “clásicas”, se pueden mencionar algunos otros beneficios tales como la alta resistencia temprana, alta plasticidad, resistencia a la abrasión y al desgaste, resistencia contra la penetración de productos químicos, entre otras.



Con el fin de cubrir las aplicaciones a nivel mundial, los reglamentos de construcción tienen que ampliarse y sacar provecho de los resultados de los experimentos y demostraciones, en donde se puede hablar de una disminución de permeabilidad, de los módulos de elasticidad y de ruptura, y la resistencia a la tensión, de la generación de calor, de términos más técnicos que se mencionaran más adelante, que sólo se pueden obtener en las pruebas de laboratorio.

### 1.3. EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

En un inicio, la construcción con concreto se desarrolló principalmente como un arte del constructor, pero la rápida expansión del campo de aplicación del concreto reforzado hizo surgir la necesidad de profundizar más en este campo de la ingeniería. Los primeros estudios se orientaron hacia los problemas de diseño estructural, pero al poco tiempo, las propiedades del concreto como material comenzaron a recibir la atención de ingenieros y de investigadores científicos; cabe mencionar que, incluyendo los materiales con que se hace y los usos que ha tenido, ningún material de construcción ha sido objeto, hasta ahora, de una investigación tan amplia como el concreto de cemento portland.

Constantemente se presentan nuevos problemas y se desarrollan nuevos métodos y máquinas para la construcción; si el concreto continúa como es de preverse como material primordial de construcción, las nuevas condiciones siempre exigirán ampliar sus conocimientos, por ejemplo; siempre será un reto conocer un concreto estructural satisfactorio, el cual deberá tener una resistencia suficiente para soportar las cargas que se le apliquen, y ser capaz de perdurar bajo las condiciones de exposición a que pueda estar sometido, logrando además de su durabilidad y economía. Actualmente hay diversos tipos de concreto que satisfacen propósitos especiales, pero todos se basan en el cemento, que con la ayuda de alguna modificación, mejoran determinadas propiedades.

Se ha visto que son muchas las estructuras en donde se aplica el concreto, sin embargo, aunque la calidad del cemento se encuentre garantizada por el fabricante; la fabricación, el transporte, la colocación y, sobre todo, la compactación del concreto, influyen de manera decisiva en la calidad del producto final, es por eso que es necesario que el personal responsable del trabajo, cuente con la información adecuada sobre las propiedades y el comportamiento del concreto, así como con la nueva tecnología, por lo que es necesario las investigaciones sobre concretos que alcancen súper resistencias y una amplia vida de servicio, que actualmente y en un futuro tendrán una gran demanda.

Las dos áreas más importantes en el desarrollo del empleo del concreto de alta resistencia son la utilización de agregados ligeros y la resistencia del refuerzo. Actualmente, los agregados ligeros que se están usando son arcillas expandidas, esquistos, ceniza volante y polvo grueso de escorias esponjosas. Los aspectos tecnológicos también se aplican al acabado de este nuevo material en los que se refiere a color, por ejemplo; al sustituir el humo de sílice color gris por sílice precipitada sintética blanca que es 10 veces más fino que el humo de sílice, se podrán obtener concretos de alta resistencia de color blanco.

Se han desarrollado varios programas de investigación en base al *concreto de alta resistencia*, como resultados de estas investigaciones se han obtenido enormes avances en la tecnología del concreto de alta resistencia, lo cual conlleva a la necesidad de revisar extensos datos técnicos y protocolos de pruebas. Tradicionalmente se han especificado concretos convencionales con la seguridad que poseen ciertas propiedades técnicas que pueden probarse con precisión con equipo y procedimientos de laboratorio estándares. La medición de esas propiedades significa más que datos remotos, tienen una importante influencia en reglamentos, estándares y codificaciones que, en última instancia, definen la aceptación del concreto para sus diversas aplicaciones.

Con base a las investigaciones de pruebas y evaluaciones, se encontró que muchas de las reglas para la práctica del concreto convencional se aplican también al concreto de alta resistencia. El desarrollo futuro de la tecnología del concreto puede partir de la visión del concreto común, estas mejoras en el concreto común son el punto de partida; además de que es útil conocer las tendencias sobre materiales y concretos de vanguardia, más útil es conocer las mejoras, controles y cuidados que harán del concreto un producto mejor.

Por su parte existen factores que contribuyen en la elaboración de un buen o mal concreto, como por ejemplo, lograr que el personal encargado de la producción del concreto sea una persona a la que se le exija un cierto grado de especialización, modificar la actitud costumbrista de los ingenieros para aceptar el empleo de nuevos materiales; tener un buen curado, ya que es uno de los factores que ocasiona mayores problemas y, aunque a nadie escapa su importancia, nadie obliga a su realización, especialmente porque sus consecuencias no son patentes y medibles; todo esto además de una buena transportación, colocación y compactación.

Entre algunas propiedades que se ha ido mejorando en concreto de alta resistencia como material de construcción se puede mencionar que se logra su resistencia más rápido, el periodo de tiempo en el cual la resistencia especificada se debe desarrollar puede variar de unas pocas horas (o hasta minutos) hasta varios días. Se puede lograr la alta resistencia en edades tempranas con la utilización de ingredientes y prácticas de colado convencionales, a pesar de que en algunos casos se hacen necesarios materiales y técnicas especiales.

La alta resistencia inicial se puede obtener con el uso de una combinación de varias de las siguientes recomendaciones, dependiendo de la edad en la cual se debe alcanzar la resistencia especificada y las condiciones de la obra:

- Cemento de alta resistencia inicial.
- Alto contenido de cemento 400 a 600 kg/m<sup>3</sup>.
- Baja relación agua-material cementante (0.20 a 0.40 en masa).
- Temperatura más elevada del concreto fresco.
- Mayor temperatura del curado.
- Aditivos químicos.
- Humo de sílice (u otro material cementante suplementario).
- Curado a vapor o en autoclave.



- Aislamiento para obtener el calor de hidratación.
- Cementos especiales de endurecimiento rápido.

El *concreto de alta resistencia* es el que se requiere la resistencia temprana es en el concreto pretensado (presfuerzo, presforzado, precomprimido) para permitir la aplicación de esfuerzos más pronto; en el concreto prefabricado (premoldeado, precolado) para la rápida producción de elementos, para la construcción rápida de concreto colado en obra, para la reutilización rápida de las cimbras; en la construcción de climas en frío; en la reparación de pavimentos para reducir el tiempo de manutención; en pavimento de rápida habilitación al tránsito y muchos más usos en donde se requiera un concreto de alta resistencia temprana.

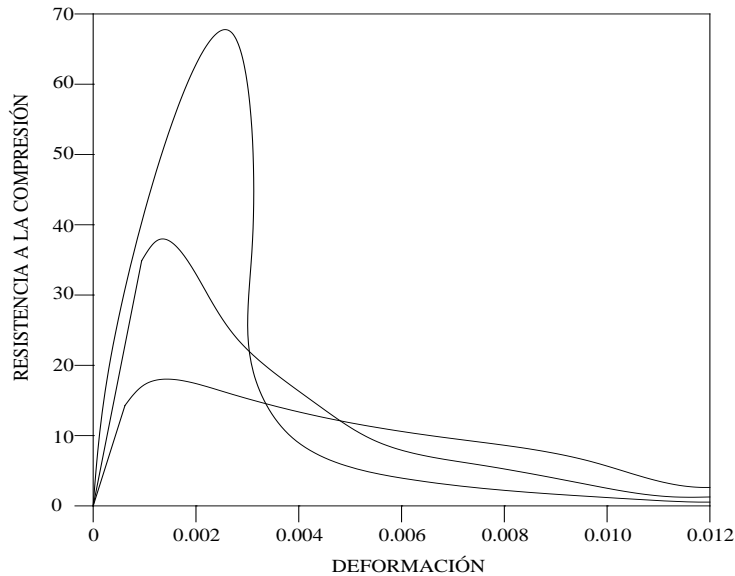
Por otra parte la alta plasticidad de la mezcla de concreto durante el colado hace prácticamente innecesaria la compactación, con lo que se obtiene no sólo una reducción de los costos de mano de obra sino también ahorros en cuanto a la electricidad, tiempo y equipo. También la resistencia a la abrasión mecánica y la erosión ha sido reconocida en otros países, por ejemplo a los vehículos se les colocan llantas que tienen pequeños clavos de acero para mejorar la fricción entre el neumático y la carretera y para facilitar el manejo del conductor durante el invierno. El daño que se causa a los pavimentos normales de asfalto es enorme; pero se ha podido llegar a una solución con el concreto de alta resistencia que se encuentra en un rango de 1000 a 1200 kg/cm<sup>2</sup>.

Otro factor que ha tenido evolución es la alta resistencia contra la penetración de productos químicos; la baja permeabilidad del concreto de alta resistencia para resistir el ataque de productos químicos tales como los cloruros, resulta una propiedad muy favorable en lo que a durabilidad se refiere. El humo de sílice disminuye la permeabilidad del concreto, protegiendo el acero de refuerzo contra la corrosión. La adición de escoria de altos hornos granulada y molida y humo de sílice, ayudan a ganar constantemente resistencia a edades mayores (es decir, edades mayores a 28 días). El humo de sílice es un subproducto, del proceso de fundición utilizado para producir el metal de silicio o aleaciones de ferrosilicio, y la escoria de altos hornos es un subproducto en la producción del acero.

Entre los aspectos de esta evolución tecnológica del concreto se puede mencionar esta comparación entre el concreto de resistencia normal y el de alta resistencia:

- La resistencia a la tensión sigue una relación similar a la resistencia a la compresión, al igual que para el concreto de resistencia normal.
- El módulo de elasticidad se incrementa con la resistencia, pero llega a ser más dependiente del módulo de elasticidad del agregado en las resistencias más altas.
- Típicamente, la densidad del concreto es ligeramente más alta que la del concreto de resistencia normal debido al uso de agregados gruesos más fuertes que, inevitablemente, son más densos.
- La curva esfuerzo-deformación (figura 1), es más pronunciada que para el concreto de resistencia normal y la curva descendente cae abruptamente. La deformación en el esfuerzo es típicamente 0.003.

FIGURA 1



La curva esfuerzo-deformación del concreto a resistencias diferentes.

Nótese la marcada inclinación de la curva descendente para el concreto de alta resistencia

- La resistencia a la abrasión se incrementa con el aumento de la resistencia a la compresión.
- Para elementos sujetos a congelación y deshielo, similares al concreto de resistencia normal, se requiere de aire incluido para lograr la durabilidad.
- La baja permeabilidad del concreto de alta resistencia proporciona una excelente protección al refuerzo.
- Los resultados de las investigaciones indican que hay poca diferencia en cuanto a su resistencia normal y el de alta resistencia en cuanto a su resistencia al fuego, sin embargo; para fuegos muy intensos que pudieran ocurrir en plataformas frente a las costas y en zonas donde hay almacenamiento de material flamable, las temperaturas más altas podrían incrementar la amplitud del astillamiento del concreto.

Cuando se habla de concreto de alta resistencia, es necesario indicar el rango de valores para los que el término debe aplicarse, pero antes de intentar acotar las resistencias para las cuales puede usarse esta acepción o significado, puede ser útil describir cómo se han venido incrementando en las últimas décadas los valores de la resistencia a la compresión. En los años cincuenta, un concreto con resistencia a los esfuerzos de compresión de 350 kg/cm<sup>2</sup> era considerado de alta resistencia; hoy día, este valor es considerado normal. En la siguiente década, valores de los esfuerzos de compresión de 400 a 500 kg/cm<sup>2</sup> eran usados comercialmente en algunos sitios (principalmente en países del primer mundo), y para los ochenta ya se producían concretos con valores que llegaban casi al doble. Ahora dentro de la resistencia a la compresión se tiene que el concreto de alta resistencia [mayor de 420 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a la compresión] se usó por primera vez en edificios de marcos de concreto reforzado con 30 o más pisos.



En los edificios altos, el tamaño de las columnas en la tercera parte inferior del edificio es bastante grande cuando se usa concreto convencional. Además de los ahorros en el costo de los materiales, los ingenieros constructores han encontrado que la elección del marco de concreto reforzado en vez del marco de acero en los edificios muy altos permite ahorros adicionales como resultado de mayores velocidades de construcción.

A fin de obtener la alta resistencia, la relación a/mc de la mezcla de concreto generalmente se mantiene por debajo de 0.4 con la ayuda de un aditivo superfluidificador. Debido a la baja relación a/mc, una característica importante del concreto de alta resistencia es su baja permeabilidad, que es la clave para la durabilidad a largo plazo en ambientes agresivos; consecuentemente, se ha empleado mucho más concreto de alta resistencia para aplicaciones en donde la durabilidad, más que la resistencia, era la consideración principal. Las estructuras marinas de concreto, puentes con claros largos, túneles por debajo del mar y plataformas petroleras a poca distancia de las costas son ejemplos de tales aplicaciones.

Sin la disponibilidad de concreto de alta resistencia hubiera sido imposible la construcción de estas estructuras. La introducción de superfluidificantes (reductores de agua de alto rango) y de aditivos minerales, sobre todo humo de sílice, constituye el factor más importante que ha posibilitado la producción económica de concreto de alta resistencia. Con los superfluidificantes se aumenta significativamente el revenimiento del concreto, desde alrededor de 70mm hasta 200mm, sin perder la cohesión de la mezcla; por tanto, los superfluidificantes no sólo permiten que el concreto se coloque con poca o nula compactación, sino que también de manera más notoria permiten la producción de concreto con una disminución sustancial de la relación agua/cemento.

La gran fluidez sin segregación es otro factor más que contribuye al crecimiento de la industria del concreto superfluidificado de alta resistencia. La trabajabilidad de las mezclas de concreto superfluidificado puede generalmente mejorarse mediante el uso de aditivos puzolánicos o cementantes tales como humo de sílice, ceniza volante, ceniza de cáscara de arroz y escoria de alto horno granulada molida. La facilidad del bombeo y las mezclas de concreto fáciles de moldear pueden reducir significativamente los costos de construcción en grandes proyectos, edificios de gran altura, estructuras a corta distancia de las costas, por ejemplo. Este es especialmente el caso cuando se fabrican elementos de concreto presforzado y muy reforzado que contienen refuerzo cerradamente espaciado.

En una gran parte de la evolución tecnológica del concreto a sido a la ayuda de la tendencia al desarrollo de nuevos aditivos, el cual con el empleo de subproductos como adición integrante de la mezcla complementan de forma importante en el mejoramiento del comportamiento del concreto o son complementarios para los usos y aplicaciones requeridos, además para alcanzar ciertas propiedades deseadas, tales como los concretos con ceniza de cascarilla de arroz y los concretos con elevado consumo de ceniza volante, ambos con un comportamiento mecánico adecuado y el último con características de bajo calor de hidratación, contracción diferida y resistencia que lo hace recomendable para colados masivos como presas o losas de cimentación; por mencionar sólo algunos ejemplos.

Otra propiedad de suma importancia es una mayor resistencia a la compresión, ya que al aumentar la resistencia a la compresión se tendrá como resultado un módulo de elasticidad más alto incrementando así la rigidez del elemento.

Para edificios de gran altura donde la condición dominante de diseño es el grado de oscilación de la parte más alta del edificio, al incrementar el módulo de elasticidad se tiene una reducción en la magnitud de la oscilación. También por su parte investigaciones han demostrado que el concreto de alta resistencia tiene una menor deformación por fluencia que el concreto de resistencia normal; ejemplo de esto se observa en estructuras altas con varios elementos verticales de soporte, invariablemente cada elemento tiene diferentes cargas y esto conduce a deflexiones verticales diferenciales entre columnas y muros, los diseñadores toman en cuenta este efecto transfiriendo las cargas producidas por deflexiones diferenciales, estas cargas en los elementos del piso disminuyen y, potencialmente, permiten una reducción en las cantidades de acero de refuerzo.

Otra propiedad considerable es la ductilidad del concreto de alta resistencia, es menos dúctil que el concreto de resistencia normal, es decir es más frágil; sin embargo, esto no se cumple para el caso de los elementos de concreto reforzado de alta resistencia. La contracción por secado y la deformación diferida del concreto de alta resistencia son menores que las correspondientes a los concretos de resistencia normal, por lo que las pérdidas de presfuerzo por estos conceptos serán también menores.

Por lo anterior, el *concreto de alta resistencia* (CAR) se puede observar también como un concreto que puede alcanzar y mejorar las propiedades deseadas y uniformidad que no pueden ser obtenidas rutinariamente usando sólo los constituyentes tradicionales con el mezclado, colocación y curado comunes.

Ejemplo de estas propiedades se pueden mencionar:

- Mejoramiento de las propiedades mecánicas a largo plazo.
- Alta resistencia a tempranas edades.
- Alto módulo de elasticidad.
- Alta tenacidad y resistencia al impacto
- Estabilidad volumétrica.
- Durabilidad en condiciones adversas.
- Baja permeabilidad
- Cohibición del crecimiento de bacterias y moho.
- Fácil colocación y compactación sin generar segregación.

Es importante señalar que con este tipo de concreto se obtienen altos módulos de elasticidad, alta densidad, baja permeabilidad y resistencia a algunas forma de ataque.

De manera recapitulada en la tabla 1.3; muestra las principales propiedades que han mejorado y que brindan beneficios en la gran diversidad de aplicaciones de este material de construcción definido como *concreto de alta resistencia*.

BENEFICIOS	APLICACIONES
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA</b>	
Incremento acelerado de la resistencia a la compresión. Alta resistencia a la compresión a largo plazo Elevado módulo de elasticidad del concreto a largo plazo. Incremento de la ductilidad del material debido al incremento del módulo de elasticidad. Contracción y deformación diferida controlada	Construcciones que se deseen realizar en un tiempo breve. Construcciones de gran altura. Puentes de grandes claros. Edificaciones en zonas de alto riesgo sísmico Vigas y losas presforzadas. Pavimentos. Estructuras sanitarias. Vigas y losas de pisos. Fabricación de concreto de contracción compensada. Reparaciones estructurales. Elementos prefabricados.
<b>DURABILIDAD</b>	
Incremento en la protección del acero de refuerzo contra la corrosión. Incremento en el ciclo de vida de la estructura a largo plazo.	Pavimentos, puentes, garajes, sistemas de aprovisionamiento de agua, construcciones marinas. Contenedores para residuos nucleares y tóxicos.
<b>CONSTRUCCIÓN</b>	
Propiedades de colocación controlada. Curado controlado. Colocación en condiciones ambientales severas.	Sótanos. Pavimentos, pisos de bodega, construcción residencial. Extensión en el tiempo de construcción (invierno y verano), construcción tropical, construcción en el ártico.

**Tabla 1.3.** Tabla de beneficios y aplicaciones del concreto de alta resistencia (CAR)

La tecnología y el desarrollo de la ingeniería civil acompañan a la marcha de la humanidad para facilitar mejores medios y estructuras que sirvan al desarrollo de las actividades de nuestras sociedades. El camino ha sido un ejemplo de mejora continua mediante un conocimiento más cercano de los materiales y el empleo de mejores técnicas para su aprovechamiento. La forma del cambio en muchos casos de la acertada administración de la investigación; a veces, de la misma necesidad de algún nuevo producto que surge, y en otras ocasiones, de su descubrimiento accidental. Los nuevos materiales desarrollados son principalmente resultados de la investigación y de las tecnologías disponibles en los países avanzados; los logros en este campo han sido generados por la necesidad de mejorar la eficiencia de los productos y llevarlos a un nivel cada vez más competitivo superior al de otros sistemas y es de esperar que estos desarrollos sirvan para disminuir el umbral de incertidumbre sobre el empleo y vida de servicio de los materiales y sobre la garantía de su utilización en el futuro cercano.



## CAPITULO 2 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

### 2.1 MATERIALES CONSTITUTIVOS

Para producir concretos de alta resistencia se requiere una cuidadosa selección de los materiales a utilizar (cementantes, agregados pétreos y aditivos), así como un estricto control de calidad de los materiales componentes y del proceso de fabricación de la mezcla en sus diferentes etapas. Esta producción efectiva de concreto de alta resistencia se logra seleccionando, controlando y proporcionando cuidadosamente todos los ingredientes. Con la finalidad de lograrse este tipo de concreto se debe considerar las proporciones óptimas, considerando las características del cemento, la calidad del agregado, la proporción de pasta, la interacción agregado-pasta, el tipo de aditivo y la forma de dosificación, el mezclado y en su caso la ceniza volante. El productor de concreto de alta resistencia debe seguir un programa de pruebas de uniformidad y de aceptación para todos los materiales usados en la producción de dicho concreto.

#### 2.1.1. CEMENTO – TIPOS

La selección del tipo de cemento pórtland para concreto de alta resistencia es extremadamente importante; debe ser un tipo de cemento, que de ser necesario sea compatible con el aditivo, que puede ser reductor de agua de medio rango (fluidificante) o de alto rango (superfluidificante), por mencionar un ejemplo; las diferentes marcas y tipos tendrán distintas características de desarrollo de resistencia debido a variaciones en su composición y en su finura.

Por su parte, se han efectuado numerosos estudios para determinar la influencia de los diferentes tipos de cemento, así como de las características físicas y químicas específicas de los cementos en el funcionamiento de los aditivos superfluidificantes, se puede decir que este tipo de aditivos parecen ser mucho más efectivos en la reducción de agua y en el desarrollo de la resistencia, al combinarse con cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y molidos de alta finura. De esta forma las variaciones en la composición química y de las propiedades físicas afectan la resistencia a la compresión del concreto más que las variaciones en cualquier otro material tomado individualmente.

A continuación se mencionará la clasificación de las Normas de Cemento antes de octubre de año 1999:

NORMA	
NMX-C1-1980-SCFI “CEMENTO PORTLAND”	
CLASIFICACIÓN	
<b>TIPO I</b>	Común para uso general.
<b>TIPO II</b>	Moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos.
<b>TIPO III</b>	Alta resistencia a edad temprana.
<b>TIPO IV</b>	Bajo calor de hidratación.
<b>TIPO V</b>	Alta resistencia a los sulfatos.

<b>NORMA</b>	
<b>NMX-C2-1986-SCFI “CEMENTO PORTLAND PUZOLANA”</b>	
<b>CLASIFICACIÓN</b>	
<b>Cemento portland puzolana Puz-1</b>	Para uso en construcciones de concreto en general
<b>Cemento portland puzolana Puz-2</b>	Para uso en construcciones de concreto donde no son requeridas resistencias altas a edades tempranas
<b>NORMA</b>	
<b>NMX-C-1986-SCFI “CEMENTO PORTLAND DE ESCORIA DE ALTO HORNO</b>	
<b>CLASIFICACIÓN</b>	
<b>TIPO I</b>	Para usos generales.
<b>TIPO II</b>	Modificado, cuando se requiere un calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos

La normatividad actual está regida por: **NMX-C-414-1999-ONNCCE**, norma mexicana que entró en vigor el 19 de octubre de 1999. Cabe mencionar que el objetivo principal de esta clasificación y tipos de cementos es recalcar el aspecto en el comportamiento, enfatizando en la resistencia a la compresión y durabilidad ante los diferentes agentes agresivos; así de esta forma se tiene:

<b>NORMA</b>	
<b>NMX-C-414-1999-ONNCCE</b>	
<b>CLASIFICACIÓN</b>	
<b>NOTACIÓN</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>CPO</b>	Cemento Portland Ordinario
<b>CPP</b>	Cemento Portland Puzolánico
<b>CPEG</b>	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno.
<b>CPC</b>	Cemento Portland Compuesto.
<b>CPS</b>	Cemento Portland con Humo de Sílice.
<b>CEG</b>	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

Ahora bien, la subclasificación de un cemento se establece de acuerdo a la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días determinada por el método de prueba **NMX-C-061**, se menciona de la siguiente forma:

<b>RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm<sup>2</sup>)</b>			
<b>Clase Resistente</b>	<b>ESPEFICACIÓN</b>		
	<b>3 días <sup>[1]</sup></b>	<b>28 días <sup>[2]</sup></b>	
	<b>MÍNIMO</b>	<b>MÍNIMO</b>	<b>MÁXIMO</b>
<b>20</b>	-	<b>204</b>	<b>408</b>
<b>30</b>	-	<b>306</b>	<b>510</b>
<b>30 R</b>	<b>204</b>	<b>306</b>	<b>510</b>
<b>40</b>	-	<b>408</b>	-
<b>40 R</b>	<b>306</b>	<b>408</b>	-

[1] Corresponde a la resistencia inicial del cemento

[2] Corresponde a la resistencia normal del cemento

Dentro de las características especiales de los cementos se tiene lo siguiente:

<b>CARACTERÍSTICAS ESPECIALES</b>	
<b>NOTACIÓN</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>
<b>RS</b>	Resistencia a los sulfatos
<b>BRA</b>	Bajo reactividad álcali-agregado
<b>BCH</b>	Bajo calor de hidratación
<b>B</b>	Blanco
<b>NOTACIÓN</b>	<b>ESPECIFICACIÓN</b>
<b>RS</b>	Expansión por ataque de sulfatos.- 0.05% máximo a los 6 meses 0.10% máximo a 1 año
<b>BRA</b>	Expansión por la reacción álcali-agregado (máximo %).- 0.020 % (14 días) y 0.060 % (56 días)
<b>BCH</b>	Calor de hidratación
<b>B</b>	Blancura (%).- 70 % mínimo

Así, de esta forma; los cementos se identificarán por el tipo y la clase resistente, si el cemento tiene especificada una resistencia inicial, se añadirá la letra R; como ejemplos se pueden mencionar los siguientes:

- Un cemento portland ordinario conforme a la presente norma de clase resistente 40 (40 Mpa = 408 kg/cm<sup>2</sup>), con alta resistencia inicial, se puede identifica como:

***Cemento CPO 40 R***

- Un cemento tipo portland con la adición de escoria de 40 % conforme a la presente norma, de clase resistente 30 (30 Mpa = 306 kg/cm<sup>2</sup>) y resistente al ataque de los sulfatos, se identifica como:

***Cemento CPEG 30 RS***

- Un cemento tipo portland ordinario conforme a la presente norma de clase resistente 30 (30 Mpa = 306 kg/cm<sup>2</sup>) y resistente a los sulfatos, se identifica como:

***Cemento CPO 30 RS***

- Un cemento tipo portland con escoria granulada de alto horno, conforme a la presente norma, de clase resistente 40 (40 Mpa = 408 kg/cm<sup>2</sup>), una resistencia inicial mínima de 30 (30 Mpa = 306 kg/cm<sup>2</sup>), baja reactividad álcali-agregado y bajo calor de hidratación, se identifica como:

***Cemento CPEG 40R BRA/BCH***

Las características físicas y químicas efectuadas al cemento Portland empleado para el caso de los durmientes de concreto, para el Sistema de Transporte Colectivo Metro, están respaldadas por un certificado de calidad otorgado por el productor de este material de construcción, avalado por la Entidad Mexicana de Acreditación A.C.; por sus siglas EMA, donde a su vez cumple con **NMX-C-414-1999-ONNCCE**; norma mexicana en vigor.

### 2.1.2 CONTENIDO DE CEMENTO

El *contenido de cemento por m<sup>3</sup>* que se emplee al elaborar la mezcla, está estrechamente ligada con la cantidad requerida de agua; ya que si ésta se mantiene constante en una mezcla dada, y el contenido de cemento se va incrementando, se observará un aumento en la resistencia a la compresión de los cilindros de las diferentes mezclas elaboradas. También es conveniente mencionar que el contenido de cemento óptimo está en función del tamaño del agregado ya que el agregado ocupa tres cuartas partes del volumen del concreto, no es de sorprenderse que su calidad resulte de considerable importancia para obtener una alta resistencia a la compresión.

El contenido de cemento se calcula usualmente a partir de *la relación agua/material cementante* y del contenido de agua elegido; los requisitos mínimos de cantidad de cemento sirven para asegurar una durabilidad y acabados satisfactorios, una mayor resistencia al desgaste y una mejor apariencia superficial; esto es importante a pesar de que los requisitos se satisfagan con menores contenidos de cemento. Por otra parte para lograr una mayor economía, el proporcionamiento debe ser tal que el consumo requerido de cemento sea mínimo sin que llegue a sacrificar la calidad del concreto. Como la calidad depende principalmente de la relación agua/material cementante, se debe mantener un mínimo en la cantidad de agua para reducir la demanda de cemento; entre las medidas para reducir la cantidad de agua y cemento se incluye el uso de:

- Una mezcla más áspera que sea práctica para usar.
- El tamaño máximo mayor del agregado que sea posible usar.
- La relación óptima de agregado fino y grueso.

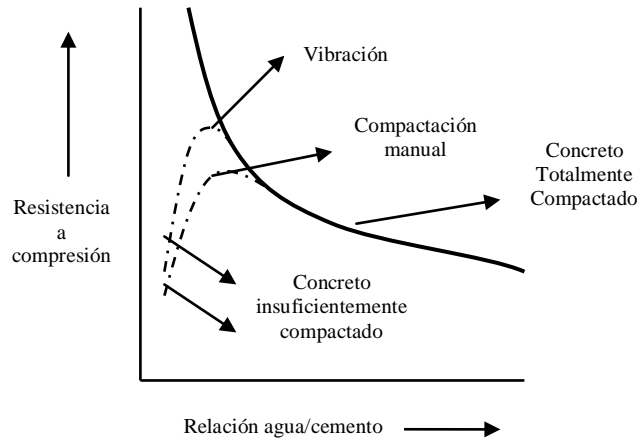
El concreto experimenta un procedimiento de endurecimiento progresivo que lo transforma de un material plástico en un sólido; en esta etapa las propiedades del concreto evolucionan con el tiempo, dependiendo de las características y proporciones de los materiales componentes y de las condiciones ambientales a las que estará expuesto durante su vida útil.

Se puede observar que el factor más importante para lograr un concreto de alta resistencia es el mantener consistentemente baja la relación agua/material cementante y tener un alto contenido de cemento para este caso. Se sabe que para lograr un concreto de alta resistencia, la relación agua/material cementante máxima debe variar entre el orden de 0.20 hasta 0.50; ya que según datos disponibles indican que es poco probable que se obtengan resistencias a la compresión de 400 kg/cm<sup>2</sup>, de mezclas que tengan relaciones agua/material cementante mayores.

Puede hacerse mención que la relación agua/material cementante determina la porosidad de la pasta del cemento endurecida en cualquier etapa de hidratación. En la figura 2.1 se muestra que el rango de validez de la regla de la relación agua/material cementante está limitado a valores muy bajos, la curva deja de seguirse cuando ya no es posible la compactación total, además puede observarse la relación que hay entre la resistencia y la regla de agua/material cementante.

Fig. 2.1

Comparación entre la resistencia y la relación agua/cemento del concreto



Debido a los altos contenidos de cemento, puede esperarse un incremento en la temperatura dentro de la mezcla de concreto; una consideración adicional, es la optimización del sistema cemento-aditivo; que en su caso, le dará un efecto preciso con una agente reductor de agua en los requerimientos de agua, el desarrollo de la resistencia por su parte dependerá tanto de las características como del contenido del cemento.

Contenidos comunes de cemento en el concreto de alta resistencia están contemplados entre  $380 \text{ kg/m}^3$  y  $560 \text{ kg/m}^3$ ; para cualquier lote de material en una mezcla de concreto, existe un contenido de cemento que tiene el efecto de producir una máxima resistencia del concreto; ésta máxima resistencia no siempre puede ser incrementada agregando más cemento del contenido óptimo, esta elección debe basarse en la pruebas comparativas de resistencias de concretos probados a 28 y 90 días.

Existen muchos factores que pueden limitar la máxima cantidad de cemento en una mezcla de alta resistencia, la eficiencia de la resistencia del cemento puede variar para diferentes tamaños máximos de agregados a diferentes niveles de resistencia; el endurecimiento y la pérdida de trabajabilidad se incrementarán tanto como se adicionen cantidades mayores de cemento en la mezcla. Por su parte la temperatura máxima deseada en el elemento de concreto puede limitar la cantidad o tipo de cemento en la mezcla; además, se conoce que las mezclas con altos contenidos de cemento tienen frecuentemente alta demanda de agua, por lo que es importante que se tomen precauciones para proveer un curado adecuado.

### 2.1.3. SELECCIÓN DE AGREGADOS

En el proporcionamiento de concreto de alta resistencia, los agregados requieren de especial consideración, ya que ocupan el volumen más grande que cualquier otro ingrediente en el concreto, esto es tres cuartas partes del volumen del concreto e influyen significativamente en la resistencia y en otras propiedades del concreto, como en su durabilidad y desempeño. Los agregados naturales se forman por procesos climáticos y abrasivos, o por molido artificial de una gran masa del material de origen.

Muchas características del agregado dependerán de las propiedades de la roca original, como lo es su composición química y mineral, la clasificación petrográfica, la gravedad específica, la dureza, la resistencia, la estabilidad química y física, la estructura del poro, el color, etc. Además, el agregado tiene otras propiedades diferentes de las de la roca original: la forma y el tamaño de la partícula, textura de superficie y absorción; las cuales pueden influir considerablemente en la calidad del concreto fresco o fraguado. El concreto debe tener suficiente resistencia para soportar las cargas que se le apliquen, tiene que ser capaz de perdurar bajo las condiciones de exposición a que pueda estar sometido; la elección de agregados que sean estables y resistentes ha sido siempre un requisito esencial para un concreto durable.

Los agregados fino y grueso usados para concreto de alta resistencia, deben reunir requerimientos establecidos en la Norma Mexicana **NMX-C-111-ONNCCE-2004**; cuya norma es adecuada para asegurar agregados que satisfagan la elaboración de concreto de alta resistencia, resistencia normal; concretos de masa normal (usualmente de  $1800 \text{ kg/cm}^3$  a  $2400 \text{ kg/cm}^3$ ) y que sean elaborados con agregados naturales y procesados, cabe mencionar que no es aplicable a agregados ligeros (masa específica del concreto menor que  $1800 \text{ kg/cm}^3$ ).

Se puede mencionar de manera breve la clasificación común de tipo de roca para uso de agregados, se menciona de la siguiente manera:

#### *Clasificación por origen:*

- 1.- Ígneas
- 2.- Sedimentarias
- 3.- Metamórficas

Ésta es una clasificación de su procedencia natural de las rocas, se divide en los tres grupos anteriormente mencionados.

#### *Clasificación por Composición:*

- |              |              |             |
|--------------|--------------|-------------|
| 1.- Caliza   | 4.- Tezontle | 7.- Caliche |
| 2.- Andesita | 5.- Tepojal  | 8.- Granito |
| 3.- Basalto  | 6.- Riolita  | 9.- Mármol  |



Esta división tiene como fundamento la composición químico-mineralógica de cada roca, además de llevar en forma implícita una denominación de origen.

Dentro de la terminología de la ASTM, los agregados son definidos como material granular, el cual puede ser arena, grava, roca triturada o escoria, usado con un medio cementante para formar concreto o mortero hidráulico.

Cabe lugar para mencionar algunas definiciones que existen en los agregados, los cuales se mencionan a continuación.

#### ***Agregado Grueso***

- 1) Agregado predominante retenido en la malla No. 4 (4.75mm)
- 2) Es la porción de un agregado retenido en la malla No. 4 (4.75mm)

#### ***Agregado Fino***

- 1) Agregado que pasa la malla de 3/8" (9.5mm) y casi totalmente pasa la malla No. 4 (4.75mm) y es predominantemente retenido en la malla No. 200 (0.075mm)
- 2) Es la porción de un agregado que pasa la malla No. 4 (4.75mm) y es retenido en la malla No. 200 (0.075mm)

#### ***Agregado Pesado***

Agregado de alta densidad, el cual puede ser barita, magnetita, limonita, ilmenita, hierro o acero.

#### ***Agregado Ligero***

Agregado de baja densidad usado para producir concreto ligero, incluye: pómez, escoria volcánica, tobas, diatomita, arcilla sintética o expandida, lutita, pizarra, lutitas diatomáceas, perlita, vermiculita y cenizas volantes.

#### ***Grava Triturada***

Es el producto resultado de la trituración artificial de gravas, en la cual la mayoría de los fragmentos tienen como mínimo una cara resultado de la fractura.



### *Piedra Triturada*

Es el producto de la trituración artificial de rocas, peñascos o fragmentos de roca grandes, en el cual todas las caras resultantes se derivan de las operaciones de trituración.

### *Grava*

Agregado grueso resultante de la desintegración natural y abrasión de rocas o transformación de un conglomerado débilmente cementado.

### *Arena Manufacturada*

Agregado fino producido por trituración de grava, roca, escoria o concreto hidráulico.

### *Arena*

Agregado fino resultado de la desintegración y abrasión de roca o la transformación de arenisca completamente disgregable.

Entre algunas recomendaciones que pueden ser mencionadas se encuentran las siguientes:

- Para definir correctamente a los agregados, se recomienda eliminar el uso de clasificaciones ambiguas, imprecisas y/o incompletas (origen, color y composición).
- Los especialistas del concreto deben impulsar la utilización de una terminología precisa y adecuada para la definición de los agregados para concreto.
- Se propone la aplicación de la siguiente metodología para la identificación de agregados:

Dependiendo de la aplicación que se pretenda dar al agregado, en la identificación se pueden utilizar una o más tipos de clasificaciones, con la finalidad de detallar lo más posible las características a cumplir por el agregado.

Para la clasificación y conceptos se propone incluir en la definición:

- Tamaño del agregado, especificando el tamaño máximo del agregado grueso. En casos de requerimientos especiales en la granulometría, proporcionar la curva granulométrica.
- Modo de fragmentación (opcional).
- Peso específico, especificando el peso unitario del concreto a fabricar.



### 2.1.3.1 AGREGADO GRUESO

Usualmente, los concretos de alta resistencia son producidos con agregados de peso normal, sin embargo; existe la posibilidad que se pueda producir concreto de alta resistencia con agregados de peso ligero para concreto estructural y agregados pesados para concreto de alta densidad. El agregado grueso influirá significativamente en la resistencia y en las propiedades estructurales del concreto, por esta razón debe escogerse un agregado grueso que sea suficientemente duro, libre de fisuras o de planos débiles, limpio y libre de recubrimientos superficiales. Las propiedades del agregado grueso también afectan las características de adherencia entre el agregado y el mortero y los requisitos de agua de mezclado, también se ha demostrado que los agregados de tamaño más pequeño proporcionan mayor resistencia potencial.

Para cada nivel de resistencia del concreto, existe un tamaño óptimo para el agregado grueso que producirá la mayor resistencia a compresión por kilogramo de cemento; es común el agregado con un tamaño máximo nominal de 25 ó 20 mm para producir resistencias del concreto de hasta 635 kg/cm<sup>2</sup>; y de 12 ó 9.5 mm por encima de 635 kg/cm<sup>2</sup>. En general, el agregado de tamaño más pequeño produce la resistencia más alta para una relación agua/material cementante dada; sin embargo, son factibles resistencias a compresión que excedan 700 kg/cm<sup>2</sup> usando un agregado de tamaño máximo nominal de 25 mm cuando la mezcla se diseña con aditivos químicos. El uso de un agregado grueso del mayor tamaño posible es una consideración importante cuando también son importantes la optimización del módulo de elasticidad, la fluencia y la contracción por secado.

Las características físicas y químicas de los agregados que son convenientes analizar antes de ser utilizados en la fabricación de mezclas de concreto se tienen las siguientes:

<b>Granulometría</b>	<b>Densidad</b>	<b>Reactividad con los álcalis:</b>
<b>Limpieza:</b>	<b>Sanidad</b>	Examen petrográfico
Finos indeseables	<b>Absorción y Porosidad</b>	Método químico
Materia orgánica	<b>Forma de partícula</b>	Barras de mortero
Partículas inconvenientes	<b>Textura superficial</b>	

Ahora bien, la Norma Mexicana **NMX-C-111-ONNCCE-2004**; define al agregado grueso como un material generalmente conocido como grava, material obtenido de manera natural o de la trituración de rocas, escoria volcánica, concreto reciclado o una combinación de estos u otros, que es retenido por la criba 4.75 mm (malla No. 4) y que pasa por la criba 90 mm (malla No. 3 ½”).

El agregado grueso debe cumplir con los límites *granulométricos* que se establecen de la forma siguiente en la tabla 2.1.3

**TABLA 2.1.3 LÍMITES GRANULOMÉTRICOS DEL AGREGADO GRUESO, EN MASA, EN PORCENTAJE QUE PASA**

<b>Tamaño Nominal (mm)/(pulg)</b>	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>75</b>	<b>63</b>	<b>50</b>	<b>37.5</b>	<b>25</b>	<b>19</b>	<b>12.5</b>	<b>9.5</b>	<b>No. 4</b>	<b>No. 8</b>	<b>No. 6</b>
	<b>4"</b>	<b>3 ½"</b>	<b>3"</b>	<b>2 ½"</b>	<b>2"</b>	<b>1 ½"</b>	<b>1"</b>	<b>¾"</b>	<b>½"</b>	<b>3/8"</b>	<b>4.75</b>	<b>2.36</b>	<b>1.18</b>
90.0 a 37.5 (3 ½" a 1 ½")	100	90 a 100	--	25 a 60	--	0 a 15	--	0 a 5	--	--	--	--	--
63.0 a 37.5 (2 ½" a 1 ½")	--	--	100	90 a 100	35 a 75	0 a 15	--	0 a 5	--	--	--	--	--
50.0 a 25.0 (2" a 1")	--	--	--	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	--	0 a 5	--	--	--	--
50.0 a 4.75 (2" a No. 4)	--	--	--	100	90 a 100	--	35 a 70	--	10 a 30	--	0 a 5	--	--
37.5 a 19.0 (1 ½" a ¾")	--	--	--	--	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	--	0 a 5	--	--	--
37.5 a 4.75 (1 ½" a No. 4)	--	--	--	--	100	90 a 100	--	35 a 70	--	10 a 30	0 a 5	--	--
25.0 a 12.5 (1" a ½")	--	--	--	--	--	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	--	--	--
25.0 a 9.5 (1" a 3/8")	--	--	--	--	--	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	--	--
25.0 a 4.75 (1" a No. 4)	--	--	--	--	--	100	90 a 100	--	25 a 60	--	0 a 10	0 a 5	--
19.0 a 9.5 (¾" a 3/8")	--	--	--	--	--	--	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	--	--
19.0 a 4.75 (¾" a No.4)	--	--	--	--	--	--	100	90 a 100	--	20 a 55	0 a 10	0 a 5	--
12.5 a 4.75 (1/2" a No. 4)	--	--	--	--	--	--	--	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	--
9.5 a 2.36 (3/8" a No. 8)	--	--	--	--	--	--	--	--	100	58 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

Cuando se tengan agregados gruesos fuera de los límites indicados como se mencionan en la forma anterior, se deben procesar para que satisfagan dichos límites.

En el caso de aceptar que los agregados no cumplan con estos límites debe de ajustarse el proporcionamiento del concreto para compensar las deficiencias granulométricas, por lo tanto, debe demostrarse que el concreto elaborado tiene un comportamiento adecuado.

Los agregados gruesos deben tener un coeficiente volumétrico mayor igual a 0.20; en caso de utilizar agregados con coeficiente volumétrico menor que 0.20, debe realizarse un estudio que muestre el impacto de su uso, y hacer los ajustes correspondientes en las mezclas de concreto, para satisfacer los requisitos de cohesión, trabajabilidad, módulo de elasticidad y contracción requeridos.

- *Limpieza*

*Finos indeseables (limo y arcilla)*

De manera general, para la especificación de esta característica hay dos criterios para el uso de agregados de mezclas de concreto:

Finos que pasan la malla No. 200	Norma aplicada NMX C-111*	
	Arena (%)	Grava (%)
Finos de cualquier tipo	5.0	2.0
Finos sin arcilla **	10.0	3.0

\*%máximo aplicable

\*\* Para conocer el carácter plástico de los finos que pasan la malla No. 200, es aplicables la prueba de límite de Attemberg

*Materia orgánica*

La especificación de esta característica de los agregados limita el contenido de este producto con base en una clasificación colorimétrica, en donde un tono más oscuro que el color de referencia es condición que se considera como una presencia excesiva, y por lo tanto, es causa de rechazo.

*Partículas inconvenientes*

Esta especificación se realiza con base en el tipo de partícula presente en el agregado, de acuerdo a lo siguiente:

Carbón y lignito en la arena	0.50 a 1.0 %
Calcedonia de peso específico menor a 2.40	3.0 a 8.0 %
Terrones de arcilla	Ver material que pasa la malla No. 200

Ahora bien, de los resultados de las propiedades físicas de la grava, pueden brindar información, indicando las posibles características que se pueden esperar en el concreto que se quiere elaborar; dentro de estas propiedades se pueden mencionar:

- *Densidad.*- Si en la elaboración de dos mezclas se emplea el mismo agregado fino, la misma proporción de cemento, pero diferente agregado grueso, entonces la mezcla que tenga el agregado de mayor densidad generalmente tendrá la mayor resistencia a compresión.

No existe una especificación sobre los límites de aceptación para esta característica, principalmente porque no tiene correlación con el grado de sanidad de los materiales que se analizan; además depende del peso unitario que se va a producir, dividiéndose para ello en ligero, normal y pesado.

- *Sanidad.*- Se define como la condición de un sólido que se halla libre de grietas, defectos y fisuras; esta propiedad tiene mucha importancia porque es un buen índice del desempeño predecible del agregado al ser usado en concreto.

	NMX C-111
Agregado fino	10 % máximo
Agregado grueso	12 % máximo

- *Tamaño máximo de agregado.*- El utilizar determinado tamaño de agregado para la elaboración de la mezcla nos repercutirá en emplear mayor o menor cantidad de cemento, para alcanzar una resistencia dada, ésta se puede obtener con diferentes combinaciones del contenido de cemento y el tamaño de agregado. Se puede hacer referencia que al extender la gradación del agregado hasta su tamaño máximo, se disminuirá el requerimiento de agua en la mezcla, y para su manejabilidad y riqueza de mezcla, la relación agua/material cementante puede reducirse, con el consiguiente incremento de la resistencia; sin embargo, hay un límite al tamaño máximo de agregado, por encima del cual la disminución en la demanda de agua es contrarrestada por los efectos nocivos de una menor área de adherencia y la discontinuidad que introducen las partículas muy grandes; por lo mismo, el concreto se vuelve exageradamente heterogéneo con la consiguiente disminución de la resistencia.

En la tabla 2.1.4 se da las recomendaciones sobre el tamaño máximo de agregado que puede emplearse para diversos tipos de construcción y dimensiones de secciones; en ningún caso el tamaño máximo debe ser mayor de:

1. Un quinto de la dimensión más estrecha de la cimbra
2. Ni mayor de tres cuartos de la mínima separación de las varillas de refuerzo.
3. En losas de concreto, el tamaño máximo no debe ser mayor de un tercio del espesor de la losa, y usualmente se obtienen resultados satisfactorios si el tamaño máximo de agregado se limita a un cuarto de espesor.

TABLA 2.1.4 TAMAÑOS MÁXIMOS DEL AGREGADO RECOMENDABLES PARA VARIOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO (mm)				
DIMENSIÓN MÍNIMA DE LA SECCIÓN (cm)	MUROS REFORZADOS, VIGAS Y COLUMNAS	MUROS SIN REFUERZO	LOSAS MUY REFORZADAS	LOSAS CON POCO REFUERZO O SIN ÉL
6.5 A 12.5	13 A 20	20	20 A 25	20 A 40
15 A 28	20 A 40	40	40	40 A 75
30 A 74	40 A 75	15	40 A 75	75
> 76	40 A 75	150	40 A 75	75 A 100

- Forma y textura.*- No sé conoce plenamente que papel desempeña la forma y textura del agregado en el desarrollo de la resistencia del concreto, pero sabemos que la textura áspera, por tener una mayor superficie específica, produce una mayor fuerza de adherencia entre las partículas y la pasta del cemento. De igual modo, la mayor área superficial de un agregado angular significa que puede haber un aumento en la fuerza de adherencia. Las características externas del agregado, en particular la forma de la partícula y la textura superficial, influyen el concreto fresco y endurecido; la redondez mide la angulosidad o agudeza relativa de las orillas y las esquinas de una partícula, esta redondez es consecuencia de la resistencia al desgaste y a la abrasión de la roca de origen y al grado de desgaste que ha sido sometida la partícula, por su parte el agregado triturado, la forma dependerá de la naturaleza del material de origen y del tipo de triturador y su proporción de reducción; es decir, la relación del tamaño inicial respecto al del producto triturado. Una clasificación general, de formas de partículas se muestra de la siguiente forma:

Totalmente redondeada: ninguna cara original.  
 Redondeada: caras casi desaparecidas.  
 Semirredondeada: desgaste considerable, área reducida de las caras.  
 Semiangular: con algún desgaste, pero conserva intactas las caras.  
 Angular: con poca evidencia de desgaste.

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Redondeado	Completamente desgastado por agua o fricción	Grava de río o playa, arena del desierto, de playa
Irregular	Naturalmente irregular, o parcialmente moldeado por fricción y con bordes pulidos	Otras gravas; pedernal de tierra o excavado
Escamosa	Material cuyo espesor es pequeño en relación con las otras dos dimensiones	Roca laminada
Angular	Posee bordes bien definidos formados en la intersección de caras planas	Rocas trituradas de todos tipos, escoria triturada
Alargada	Material angular en el que la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones	-
Escamosa y alargada	Material de longitud considerablemente mayor que el ancho, y ancho considerablemente mayor que el espesor	-

Muchos estudios han demostrado que la roca triturada produce resistencias más altas que la grava redondeada, la razón probable para esto es la gran adherencia mecánica que se puede desarrollar con partículas angulosas acentuada, debido al elevado requerimiento de agua y reducida trabajabilidad a que conducen dichos agregados. El agregado ideal debe ser limpio, cúbico, anguloso, cien por ciento agregado triturado con un mínimo de partículas planas y alargadas.

En términos generales, no existe una especificación estricta para esta característica que evalué la redondez y esfericidad de los agregados, ya que se puede demostrar que en condiciones idénticas, son más adecuados los agregados de formas redondeadas para la producción de concretos con resistencias que no

excedan valores de 250 kg/cm<sup>2</sup>, y que para concretos que requieran desarrollar mayores resistencias a las de referencia, se haga uso de partículas de formas más angulosas.

En el caso de la esfericidad evaluada por la presencia de partículas planas y alargadas, es recomendable que éstas no superen el 20 % máximo de acuerdo con el comité ACI 207.

La textura por su parte, al igual que para la forma, no existe una especificación rigurosa para la textura superficial, ya que los diferentes tipos que existen producen efectos diversos en la elaboración de concreto.

- Absorción y porosidad.*- Si de los agregados diferentes uno tiene mayor absorción que otro, en general el agregado que tenga menor absorción nos ofrecerá mayor resistencia a la compresión en la elaboración de la mezcla correspondiente. La porosidad, la permeabilidad y la capacidad de absorción del agregado influyen en la adherencia con la pasta de cemento; los tamaños de los poros en el agregado varían en un amplio rango pero hasta los más pequeños son mayores que los poros de gel en la pasta de cemento, algunos poros del agregado están totalmente dentro de la partícula, pero otros se abren en la superficie, de modo que el agua puede penetrar en ellos; la cantidad y la proporción de la penetración dependerán del tamaño, de la continuidad y del volumen total de poros. Cuando todos los poros del agregado están llenos, se dice que está saturado y es de superficie seca; si se permite que el agregado quede libre en aire seco, parte del agua se evaporará, por lo que quedará como agregado de aire seco, un desecamiento prolongado en horno elimina eventualmente toda la humedad y el agregado en esa etapa queda en un estado seco. Por su parte; la absorción de agua se determina midiendo la disminución de masa de una muestra saturada y de superficie seca después de secarla en un horno durante 24 horas, la relación de la disminución de masa respecto a la masa de la muestra seca, expresada en porcentaje, se denomina absorción. No hay una especificación sobre el límite de aceptación de esta característica, dado que esta depende de muy diversos factores, tales como: contenido de finos, forma y textura superficial de las partículas, porosidad de la roca y distribución granulométrica. Se reconoce como información válida, sin embargo, que cuando se tienen rocas de buena calidad física y los agregados cumplen las otras especificaciones que se le soliciten, el agregado grueso no rebasa el 3% de la absorción, así como el agregado fino no supera el 5 % máximo.
- Reactividad con los álcalis.*- Existen tres pruebas que evalúan esta característica de los agregados, independientemente de si la reacción es álcali-sílice o álcali-carbonato, las tres son importantes por los elementos de juicio que aportan sobre el posible comportamiento del material al ser utilizado en la elaboración de mezclas de concreto:

Método de prueba	Carácter del resultado	Evaluación
Estudio petrográfico*	Definitivo, sólo material inocuo	Inocuo/Deletéreo
Método químico	Definitivo, sólo material inocuo	Inocuo/Deletéreo
Barras de mortero	Definitivo, sólo material potencial	**

\* es importante ya que califica cuál es el tipo de reacción que puede presentar el agregado, al identificar y cuantificar los materiales potencialmente reactivos.

\*\* Valor de expansión en la relación con el tipo de reacción y su clasificación.

	<b>Álcali-Sílice (NMX C-180)</b>	<b>Álcali-Carbonato (ASTM C 1105)</b>
Inocuo	< 0.05% a tres meses	< 0.015% a tres meses
Moderadamente reactivo	> 0.05%, < 0.10%	> 0.015%, > 0.025%
Deletéreo	> .010 a seis meses	> 0.025% a seis meses

La eliminación de las otras clasificaciones (origen, composición, forma de partícula y color) se debe a que presentan los siguientes inconvenientes:

- Clasificaciones creadas con un objetivo diferente a la identificación de agregados para concreto, como por ejemplo la división de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, se realizó de acuerdo con las condiciones naturales de formación de las rocas y no calificando sus características físicas particulares asociables al uso en el concreto.
- Conceptos ambiguos por ejemplo desde el punto de vista de la composición química, basalto y tezontle son lo mismo, aunque es reconocido que pueden tener una diferencia significativa en color y peso volumétrico.
- No califican ninguna característica física de las que se evalúan en los agregados para concreto, como por ejemplo el origen.
- Miembros de familias diferentes o iguales pueden tener características físicas distintas o similares, generando confusión en las propiedades del material, por ejemplo existen calizas de muy diversa calidad física, desde buena hasta pésima.
- Clasificaciones simplistas que inducen a interpretaciones erróneas, como por ejemplo el color.

Debido a la importancia que tiene especificar y clasificar los agregados de concreto para una obra, es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

- a) Características y requisitos a cumplir de la estructura que se va a fabricar.
- b) Agregados disponibles en el sitio.
- c) Composición granulométrica de los agregados a emplear.

### 2.1.3.2 AGREGADO FINO

Ya que una de las principales funciones del agregado fino es la de proporcionar trabajabilidad, es importante conocer sus características, la Norma Mexicana **NMX-C-111-ONNCCE-2004**; define al agregado fino conocido como arena, como un material obtenido de manera natural o de la trituración de rocas, escoria volcánica, concreto reciclado o una combinación de estos u otros; que pasa por la criba 4.75mm (malla No. 4) y que se retiene en la criba 0.075mm (malla 200).

Donde es deseable que exista continuidad granulométrica, es decir que exista presencia de todos los tamaños representantes de las diferentes fracciones que están establecidas.

Es importante mencionar que si bien es útil que el agregado fino cumpla con la continuidad granulométrica, resulta poco prudente el especificar la arena con base a esta característica, ya que un adecuado diseño de mezclas o bien el uso de aditivos en el concreto, permite disminuir los posibles efectos no deseados por una deficiencia de esta característica en el agregado.

El agregado fino debe cumplir con límites granulométricos que se indican a continuación y que están establecidos por la Norma Mexicana:

- a) Estar dentro de los límites establecidos en la tabla 2.1.5, excepto en los casos que se indican en los párrafos c y d.
- b) El módulo de finura debe estar comprendido entre 2.30 y 3.10. El módulo de finura puede ser determinado con pruebas previas, de no existir éstas, se puede determinar con el promedio del valor obtenido de las primeras 10 pruebas consecutivas o el promedio de las pruebas que haya cuando no se contemple este número.
- c) El retenido parcial de la masa total en cualquier criba no debe ser mayor de 45%. Pueden aumentarse los porcentajes del retenido acumulado de la masa ensayada en las cribas 0.300mm (No. 50) y 0.150mm (No.100) a 95% y 100% respectivamente, siempre y cuando el contenido de cemento del concreto en que se vaya a utilizar el agregado sea mayor de 240 kg/m<sup>3</sup> para concreto con aire incluido, o mayor de 300 kg/m<sup>3</sup> para concreto sin aire incluido, o bien añadiendo un adicionante (cementante) que supla la deficiencia de material que pase por estas cribas.
- d) En el caso de que los agregados que se pretendan emplear no cumplan con las tolerancias indicadas en los incisos a, b y c, éstos, pueden usarse siempre y cuando se tenga antecedentes de comportamiento aceptable en el concreto elaborado con ellos, o bien, que los resultados de las pruebas realizadas a estos concretos sean satisfactorias; los agregados se pueden usar siempre que se haga un ajuste apropiado en el proporcionamiento del concreto, para compensar las deficiencias en la granulometría.

TABLA 2.1.5 LÍMITES DE GRANULOMETRÍA PARA AGREGADO FINO

CRIBA mm (No.)	MATERIAL ACUMULADO EN MASA, EN PORCENTAJE QUE PASA (%)
9.5 (3/8")	100
4.75 (No. 4)	95 - 100
2.36 (No. 8)	80 - 100
1.18 (No. 16)	50 - 85
0.600 (No. 30)	25 - 60
0.300 (No. 50)	10 - 30
0.150 (No. 100)	2 - 10

Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, bien como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, contracción (retracción) y durabilidad del concreto; las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente la uniformidad del concreto de una mezcla a otra.



Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad; en general, los agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y presentan una curva granulométrica suave, producirán los resultados más satisfactorios.

Durante los primeros años de la tecnología del concreto, se asumía, algunas veces, que el menor porcentaje de vacíos (mayor densidad del agregado) era más adecuado para el concreto; en ese mismo tiempo, se crearon límites para cantidades y tamaños de las partículas más pequeñas, ahora se sabe que, incluso en estas bases restrictas, este no es el mejor enfoque para el diseñador de la mezcla, sin embargo, la producción de un concreto satisfactorio y económico requiere agregados con baja cantidad de vacíos, pero no la más baja. La granulometría más deseable para el agregado fino depende del tipo de obra, si la mezcla es rica y del tamaño máximo del agregado grueso; en mezclas más pobres, o cuando se usan agregados gruesos de pequeñas dimensiones, es conveniente, para que se logre una buena trabajabilidad, que la granulometría se aproxime al porcentaje máximo recomendado que pasa por cada criba.

Ahora bien, dentro de las características se tienen las siguientes propiedades:

- *Módulo de finura (MF).*- Las arenas con módulo de finura que no se encuentren en el rango marcado entre 2.3 y 3.10 producen concretos con una consistencia pastosa o pegajosa, dando como resultado una pérdida en la trabajabilidad, haciéndolo difícil de compactar y con la necesidad de una gran demanda de agua, sin embargo, las arenas con módulo de finura que se encuentren entre esos valores mencionados por la Norma Mexicana **NMX-C-111-ONNCCE-2004**; entre 2.3 y 3.10, donde un valor más alto nos indica una gradación más gruesa, un agregado fino entre estos valores de módulo de finura proporcionan una mejor trabajabilidad y una alta resistencia a la compresión, la utilidad del módulo de finura radica en la detección de variaciones ligeras en el agregado. El módulo de finura (MF), se define como la suma de porcentajes acumulativos retenidos en las cribas de las series estandarizadas a partir de la criba 4.75mm (malla No. 4) hasta la criba 0.150 mm (malla No. 100), dividido entre cien; las series estandarizadas consisten en mallas, cada una del doble del tamaño de la precedente, hasta la malla de mayor tamaño.

El módulo de finura es un índice de finura del agregado, cuanto mayor sea el módulo de finura, más grueso es el agregado, por su parte agregados con granulometrías diferentes pueden tener el mismo módulo de finura; para los agregados finos el módulo de finura es útil para estimar las proporciones de agregados fino y grueso en el concreto. Los concretos de alta resistencia usualmente tienen tan altos contenidos de materiales cementantes que la granulometría de los agregados finos a usar tiene relativamente poca importancia, en comparación con su importancia en los concretos convencionales, cabe mencionar dicho lo anterior que la granulometría óptima del agregado fino para concreto de alta resistencia está determinada más por su efecto en el requerimiento de agua que por su arreglo físico.

- *Forma y textura.*- Parece que dichas propiedades ejercen una gran influencia en la resistencia del concreto, se conoce que la resistencia a la flexión se ve más afectada que la resistencia a la compresión; la forma y textura del agregado fino tienen un efecto significativo sobre las necesidades de agua de una mezcla hecha con tales agregados, si estas propiedades del agregado

fino se expresan por su acomodo o compactación; es decir, el porcentaje de huecos en estado suelto, la influencia sobre las necesidades de agua es muy clara.

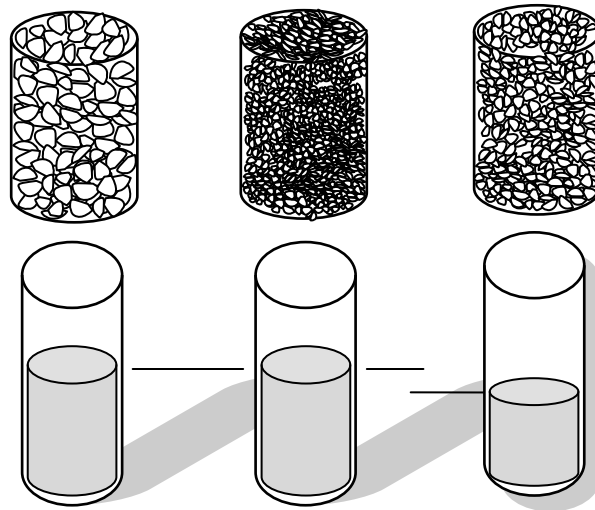
La forma y textura superficial de las partículas de un agregado influyen en las propiedades del concreto fresco más que de las del concreto endurecido; las partículas con textura áspera, angulares o alongadas requieren más agua para producir un concreto trabajable que agregados lisos, redondeados y compactos, además, las partículas de agregado angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua/material cementante; sin embargo, la granulometría satisfactoria, tanto los agregados triturados como los no triturados (de un mismo tipo de roca), generalmente, producen concretos con la misma resistencia, si se mantiene el contenido de cemento; los agregados angulares o con granulometría pobre también pueden ser más difíciles de bombear.

La adherencia entre la pasta de cemento y un determinado agregado generalmente aumenta con el cambio de partículas lisas y redondeadas por las ásperas y angulares; cuando la resistencia a flexión es importante o cuando se necesite alta resistencia a compresión, se debe considerar este aumento de la adherencia al elegirse el agregado para concreto. La cantidad de vacíos de los agregados fino y grueso compactados se puede usar como un índice de las diferencias de la forma y la textura de los agregados con la misma granulometría, la demanda de agua de mezcla y cemento normalmente aumentan con el aumento de la cantidad de vacíos, y la generación de estos vacíos entre las partículas aumentan con la angularidad del agregado; el agregado debe ser relativamente libre de partículas planas y alongadas, o por lo menos se deben evitar o limitar a cerca del 15% de la masa total del agregado; este requisito es igualmente importante para el agregado grueso y el fino triturado, pues el agregado fino obtenido por la trituración de la roca frecuentemente contiene partículas planas y alongadas; estas partículas de agregado requieren un aumento del agua de mezcla y, por lo tanto, pueden afectar la resistencia del concreto, principalmente a flexión, si no se ajusta la relación agua/material cementante.

- *Masa volumétrica.*- La masa volumétrica claramente depende de cuan densamente se ha compactado el agregado, y de ahí se sigue que en un material de una cierta densidad, la masa volumétrica dependerá del tamaño, la distribución y la forma de partículas del agregado; las partículas de un mismo tamaño pueden acomodarse o compactarse sólo hasta un cierto límite, pero las de menor tamaño pueden caber en los huecos, y esto aumentaría el peso volumétrico del material ya completamente acomodado o compactado. La forma de las partículas afecta grandemente el grado de acomodo que puede alcanzarse; para un agregado grueso de una masa específica dada, una masa volumétrica alto significa que hay menos huecos por llenarse con arena y cemento. La masa volumétrica de un agregado es la masa o peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado, el volumen al que se refiere es aquél ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas del agregado; por su parte la cantidad de vacíos entre partículas afecta la demanda de pasta en el diseño de la mezcla, esta cantidad de vacíos varía entre de cerca del 30% a 45% para el agregado grueso y de cerca del 40% a 50% para agregado fino, la angularidad aumenta la cantidad de vacíos como ya se mencionó anteriormente, mientras que los tamaños mayores de un agregado bien graduado y la mejoría de la granulometría disminuyen el contenido de vacíos, figura 2.1.3.

Figura 2.1.3

El nivel del líquido en las probetas, que representan a los vacíos, es constante para volúmenes absolutos iguales de agregados con tamaños uniformes, aunque diferentes. Cuando se combinan tamaños diferentes, el contenido de vacíos disminuye



- *Absorción y humedad superficial.*- Las condiciones de humedad de los agregados (figura 2.1.4) se les puede definir como:
  1. *Secado al horno* – totalmente absorbente
  2. *Secado al aire* – la superficie de las partículas está seca, pero en su interior contiene humedad y, por lo tanto, aún es ligeramente absorbente
  3. *Saturado con superficie seca (SSS)* – no absorben ni ceden agua al concreto
  4. *Húmedos* – contiene un exceso de humedad sobre la superficie (agua libre)

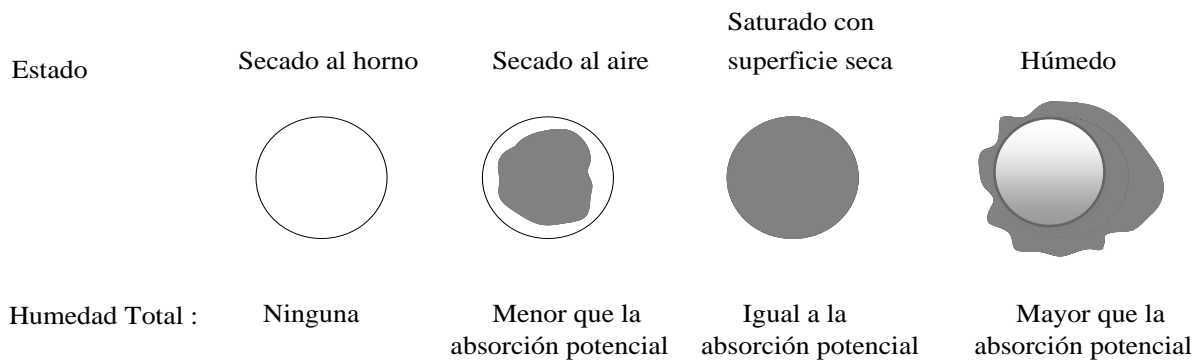


Figura 2.1.4 Condiciones de humedad de los agregados

La cantidad de agua que se adiciona en la planta de concreto se debe ajustar para las condiciones de humedad de los agregados, a fin de que se atienda a la demanda de agua del diseño de la mezcla de manera precisa; si el contenido de agua del concreto no se mantiene constante, la relación agua/material cementante variará de una amasada a la otra, resultando en la variación de otras propiedades, tales como la resistencia a la compresión y la trabajabilidad.

Los agregados grueso y fino generalmente tienen niveles de absorción (contenido de humedad SSS) que varían entre 0.2% al 4% y del 0.2% al 2%, respectivamente, los contenidos de agua libre generalmente varían del 0.5% al 2% para el agregado grueso y del 2% al 6% para el agregado fino; el contenido máximo de humedad del agregado grueso drenado es normalmente menor que aquél del agregado fino, por su parte la mayoría del agregado fino puede mantener un contenido máximo de humedad drenada de cerca del 3% al 8%, mientras que el agregado grueso puede mantener del 1% al 6%.

- *Resistencia y contracción.* - La resistencia del agregado raramente se ensaya y, generalmente, no influye en la resistencia del concreto convencional, la resistencia de la pasta y de la adherencia pasta-agregado; sin embargo, la resistencia del agregado se vuelve importante en el concreto de alta resistencia ya que los niveles de esfuerzos (tensiones) en el agregado son frecuentemente, mucho mayores que el esfuerzo promedio en toda la sección del concreto, las resistencias a tensión (tracción) de los agregados varían de 20 a 150 kg/cm<sup>2</sup> y la resistencia a compresión varía de 660 a 2750 kg/cm<sup>2</sup>. Los agregados, con absorción elevada pueden tener alta contracción por secado, los agregados de cuarzo y feldespato, además de calizas, dolomitas y granitos, se consideran como agregados de baja contracción, mientras que los agregados con arenisca, pizarra, hornblenda y grauvaca frecuentemente están asociados con una alta contracción.

De lo anterior se puede observar que una buena selección del agregado para la mezcla de concreto puede lograr alcanzar una gran variedad de beneficios a una mezcla de concreto, se puede decir que el procesamiento del agregado consiste en:

1. Procesamiento básico – trituración, cribado y lavado – para obtener la granulometría y la limpieza adecuadas
2. Beneficio – mejoramiento de la calidad a través de métodos de procesamiento, tales como separación en un medio pesado, cribado con agua y clasificación por trituración.

En la separación en medio pesado, los agregados pasan a través de un líquido pesado, que contiene minerales pesados finamente granulados y agua, proporcionado para obtener una masa específica relativa (densidad relativa) menor que las partículas del agregado deseadas pero mayor que las partículas dañinas, las partículas más pesadas se hunden en el fondo mientras que las partículas más livianas flotan en la superficie; este proceso se puede usar cuando las partículas aceptables y las dañinas tienen masas específicas relativas muy diferentes.

El cribado separa las partículas con pequeñas diferencias de masa específica pulsando una corriente de agua, las pulsaciones de agua hacia arriba a través de una criba (una caja perforada en el fondo) mueven el material más ligero para formar una capa sobre el material más pesado, entonces se remueve la capa de arriba.

La trituración también se usa para remover las partículas más blandas y desmenuzables de los agregados gruesos, este proceso es, algunas veces, el único medio para lograr la utilización de este material, pero desafortunadamente, en cualquier proceso, parte del material aceptable algunas veces se pierde y la remoción de las partículas dañinas puede ser difícil y costosa.



Ahora dentro del manejo y almacenamiento de los agregados se debe hacer de una manera que minimicen la segregación y degradación y que se prevenga la contaminación con sustancias deletéreas, las pilas se deben construir en capas delgadas de espesor uniforme para minimizar la segregación; el método más económico y aceptable de formación de pilas de agregados es el método de volteo en camión, que descarga el material de manera que no se separe; entonces, se recupera el agregado con un cargador frontal, el cargador debe remover porciones de los bordes de la pila desde la parte inferior hacia la parte superior, de manera que cada porción contenga una parte de cada capa horizontal. Cuando no se entregan los agregados en camiones, se pueden obtener resultados aceptables y económicos con la formación de pilas en capas con un cucharón de quijadas (método de tirar y extender), en el caso de los agregados no sujetos a degradación, se pueden tender los agregados con un tractor de neumático (llantas) de caucho y recuperar con un cargador frontal, al tender el material en capas finas, la segregación se minimiza.

Sea el manejo en camión, con cargador, con cucharón de quijadas o banda transportadora, no se deben construir pilas altas en forma de cono, pues resultan en segregación; sin embargo, si las circunstancias demandan la construcción de pilas cónicas, o si las pilas se han segregado, las variaciones de la granulometría se pueden disminuir cuando se recupera la pila. En estos casos, los agregados se deben cargar con un movimiento continuo alrededor de la pila para que se mezclen los tamaños, en vez de comenzar de un lado y trabajar en línea recta a través de la pila. En cuanto a los agregados triturados segregan menos que los agregados redondeados (grava) y los agregados mayores segregan más que los agregados menores, para evitar esta segregación de los agregados gruesos, las fracciones de tamaño se pueden amontonar y dosificar.

Los agregados que han sido lavados se deben amontonar con anticipación suficiente para que se drenen, hasta la humedad uniforme, antes de su uso; el material fino húmedo tiene una tendencia menor para segregar que el material seco, cuando el agregado fino seco se descarga en los cubos o esteras (bandas) transportadoras, el viento puede llevarse los finos, esto debe evitarse al máximo y como punto también considerable es que las mamparas o divisiones se deben usar para evitar la contaminación de pilas de los agregados, las divisiones entre las pilas deben ser suficientemente altas para prevenir el mezclado de los materiales, estas mamparas se recomiendan que sean circulares o cuadrados.

Ahora bien a manera de conclusión se puede decir que para que un concreto sea durable, dentro de la influencia que tienen los agregados, se puede mencionar que deben estar limpios y libres de sustancias orgánicas o de otras que sean deletéreas, y deben ser de estructura y composición mineral tales que garanticen su durabilidad por sí mismos; deben estar libres de constituyentes que reaccionen desfavorablemente con los componentes del cemento, a no ser que se emplee cemento de bajo contenido de álcalis y una puzolana conveniente. Dentro de lo correspondiente a su almacenamiento y en el manejo de los agregados para obtener uniformidad en el concreto; el agregado grueso debe estar separado en un número apropiado de tamaños, y los diversos tamaños se manejarán en pilas o tolvas de almacenamiento, de tal manera que la segregación sea mínima, a menudo; semejante separación de agregados se considera más uniforme mediante el cribado y lavado final, justo antes de entrar al depósito de la planta mezcladora, por su parte el agregado fino rara vez requiere separación.



#### 2.1.4 CONTENIDO DE AGUA

Para adentrar en este tema, antes que nada se puede hablar de la calidad del agua, que tiene gran importancia ya que las impurezas que contenga pueden interferir en el endurecimiento del cemento, afectar de forma negativa la resistencia o también ocasionar manchado en la superficie del concreto; así como también puede causar la corrosión del acero de refuerzo. A su vez, el criterio de potabilidad del agua no es absoluto; el agua para beber puede que no sea adecuada para la mezcla cuando tenga una concentración de sodio o potasio alta, por el riesgo de una reacción álcali-agregado; esto quiere decir que el concreto puede ser dañado por una reacción química entre los componentes activos del agregado y los álcalis en el cemento, este proceso se conoce como reacción álcali-agregado.

El agua potable es por lo general segura, pero la no potable también suele ser adecuada para elaborar concreto, una regla es que cualquier agua con un pH (grado de acidez) de 6.0 a 8.0 que no sea salada o salobre es útil; el color oscuro o un cierto olor no indican necesariamente la presencia de sustancias deletéreas o contaminadas. Las aguas naturales ligeramente ácidas son inofensivas, pero por su lado las que contengan ácido húmico u otros ácidos orgánicos si pueden llegar a afectar de forma negativa el endurecimiento del concreto; esta agua, así como las muy alcalinas, deben ser probadas previamente, ya que como por ejemplo se puede tener agua con la presencia de algas, la cual en una mezcla provocaría penetración de aire y la consiguiente pérdida de resistencia. La dureza del agua no afecta la eficiencia de la penetración de aire de los aditivos para mezcla. Otro caso que se puede mencionar, es el uso de agua de mar, la cual tiene como característica que produce una resistencia temprana ligeramente mayor, pero con la contraparte de que provoca una menor resistencia en largo plazo.

Éste tipo de agua o cualquiera que tenga grandes cantidades de cloruros, tiende a ocasionar humedad persistente y eflorescencia, por lo tanto este tipo de agua no debe emplearse cuando la apariencia del concreto sea importante o cuando vaya a aplicarse un acabado de yeso. En el caso de concreto reforzado, se puede observar que causa corrosión en las estructuras que se encuentran expuestas al aire húmedo cuando el recubrimiento del refuerzo no es el adecuado o el concreto no es lo bastante denso, de modo que se ocasiona una acción corrosiva de las sales residuales en presencia de humedad; a su vez, cuando el concreto reforzado se encuentra permanentemente en el agua, ya sea fresca o de mar, el uso de agua marina para la mezcla parece no afectar de forma nociva, sin embargo en la práctica no se considera aconsejable emplearla para el uso en la mezcla. Una recomendación para determinar el agua conveniente para el uso en una mezcla, consiste en comparar el tiempo de fraguado del cemento como la resistencia de cubos de mortero hechos con ese tipo de agua.

Una medida a considerar y que está establecida en la Norma Mexicana **NMX-C-122**, que menciona las especificaciones con las que debe cumplir el agua de mezclado, se encuentran en las tablas siguientes 2.1.6 y 2.1.7; donde se mencionan los criterios a considerar.

**Tabla 2.1.6 Clasificación del agua (NMX C-122)**

Tipo de agua	Efectos en su uso en concreto
Aguas puras	Acción disolvente e hidrolizante de compuestos cálcicos del concreto.
Aguas ácidas naturales	Disolución rápida de los compuestos del cemento.
Aguas fuertemente salinas	Interrumpe las reacciones del fraguado del cemento. En el curado, disolución de los componentes cálcicos del concreto.
Aguas Alcalinas	Produce acciones nocivas para cementos diferentes al aluminoso.
Aguas sulfatadas	Son agresivas para concretos fabricados con Cemento Pórtland, en especial al tipo CPO.
Aguas cloruradas	Produce una alta solubilidad de la cal. Produce disolución en los componentes del concreto.
Aguas magnesianas	Tiende a fijar la cal, formando hidróxido de magnesio y yeso insoluble. En la mezcla, inhibe el proceso de fraguado del cemento.
Agua de mar	Produce eflorescencias. Incrementa la posibilidad de generar corrosión del acero de refuerzo.
Aguas recicladas	El concreto puede acusar los defectos propios del exceso de finos.
Aguas industriales	Por su contenido de iones sulfato, ataca cualquier tipo de cemento.
Aguas negras	Efectos imprevisibles.

**Tabla 2.1.7 Características físicas y químicas**

Impurezas	Cementos	
	Ricos en Ca	Resistentes a sulfatos
Sólidos en suspensión		
• limos y arcillas	2,000	2,000*
• finos de cemento y agregados	50,000	35,000
Cloruros como Cl <sup>-</sup> (a)		
• concreto con acero de refuerzo	400 (c)	600 (c)*
• concreto reforzado en ambientes húmedos	700 (c)	1000 (c)*
Sulfato como SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = (a)	3000	3500*
Magnesio como Mg <sup>2+</sup> (a)	100	150*
Carbonatos como CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	600	600*
Dióxido de carbono disuelto, como CO <sub>2</sub>	5	5*
Álcalis totales como Na <sup>+</sup>	300	450*
Total de impurezas en solución	3,500	4,00*
Grasas o Aceites	0	0*
Materia orgánica	150 (b)	150 (b)*
pH	no < 6	no < 6.5

\* Límites en partes por millón (ppm)

(a) Las aguas que excedan los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesio, podrán emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no excede dichos límites.

(b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX C-88.

(c) Cuando use cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) como aditivo acelerante, debe tomarse en cuenta el dosificado para no exceder el límite de cloruros establecido (ACI 318).

**Tabla 2.1.8 Criterio de la aceptación para aguas de dudosa calidad**

Concepto	Límites	Método de Prueba
<b>Resistencia a la compresión</b> Con respecto al agua de control, a 7 días. El agua de control puede ser agua destilada o agua de la red municipal.	90 %, mínimo	NMX-C-061-ONNCCE
<b>Tiempo de Fraguado</b> Desviación respecto al tiempo de fraguado del control.	No más de 1 h del inicial No más de 1 h 30 min en el final	NMX-C-059-ONNCCE

**Tabla 2.1.9 Límites químicos opcionales para el agua de lavado**

Concepto Requisitos químicos	Límites de concentración máxima en el agua de mezclado, mg/L (ppm). (Véase nota 4)	Método de prueba
<b>Cloruros como Cl</b> Concreto reforzado en ambiente húmedo o que haya elementos ahogados de aluminio o de metales similares o que esté en contacto con cimbras de metal galvanizado.  Para el caso de concreto reforzado	1000 (véase nota 5)  500	NMX-C-283
<b>Sulfatos como <math>\text{SO}_4</math></b>	3000	NMX-C-283
<b>Álcalis totales</b>	600	NMX-C-283
<b>Sólidos totales</b>	50 000	NMX-C-283

**NOTA 3:** El agua de lavado recuperada para usarse en la mezcla de concreto, puede exceder en las concentraciones listadas, si en el agua total de mezclado no se exceden los límites establecidos.

**NOTA 4:** Si se permite usar cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) como aditivo acelerante, la limitación del contenido de cloruros puede ser omitida por el usuario.

**NOTA 5:** El agua de lavado del interior de las mezcladoras, debe ser verificada semanalmente por un periodo de un mes, posteriormente el intervalo de muestreo es de un mes; durante este periodo, ninguna muestra debe exceder los límites señalados.



Ahora se mencionará la *estimación del agua de mezclado y el contenido de aire*; que se puede decir, que la cantidad de agua por volumen unitario de concreto requerida para producir un revenimiento dado depende del tamaño máximo, la forma de la partícula, y la granulometría del agregado, la cantidad del cemento, y el tipo de aditivo reductor de agua usado. Si por ejemplo; se usa un aditivo reductor de agua de alto rango (HRWR), el contenido de agua de esta mezcla se calcula como una parte de la relación agua/material cementante (w/c+p).

En la tabla 2.1.10 se mencionan las estimaciones de agua del agua de mezclado que se requiere en el concreto de alta resistencia, elaborado con agregado de tamaño máximo de 9.5 a 25 mm previamente a la adición de cualquier aditivo químico, a su vez también se dan los valores correspondientes para el contenido de aire atrapado.

Los valores para el agua de mezclado requerida que se muestran en la tabla 2.1.10 se aplican cuando se usa agregado fino que presenta un contenido de vacíos de 35%; el contenido de vacíos de un agregado fino puede ser calculado usando la ecuación 1:

*Contenido de vacíos, V. % =*

$$\left( 1 - \frac{\text{Masa unitaria varillada y secada al horno}}{\text{Masa específica del material (seco) x 1000}} \right) \times 100$$

(Ecuación 1)

Tabla 2.1.10

Estimación del requisito de agua de mezclado y contenido de aire del concreto fresco con base en el uso de una arena con 35% de vacíos				
	Agua de mezclado, kg/m <sup>3</sup>			
	Tamaño máximo del agregado grueso, mm			
Revenimiento, mm	9.5	13	20	25
25 a 50	185	175	170	165
50 a 75	190	185	175	170
75 a 100	195	190	180	180
Contenido de aire	3	2.5	2	1.5
Atrapado*	(2.5)t	(2.0)	(1.5)	(1.0)

- Los valores dados deben ser ajustados para arena con huecos distintos de 35% usando la ecuación 2.
- t Mezclas hechas usando HRWR.



Cuando se utiliza un agregado fino con un contenido de vacíos que no es igual a 35%, debe ser ajustado al contenido recomendado del agua de mezclado; este ajuste se puede hacer usando la ecuación 2.

$$\text{Ajuste de agua de mezclado, kg/m}^3 = (V - 35) \times 5$$

(Ecuación 2)

Usando esta ecuación, resulta un ajuste de agua de 5 kg/m<sup>3</sup> de concreto para cada uno por ciento de la desviación de vacíos respecto al 35%.

El contenido de agua puede verse afectado por diversos factores tales como el tamaño y forma del agregado, relación agua/cemento, contenido de aire, contenido de cemento, aditivos y condiciones ambientales. Se puede decir por mencionar que un mayor contenido de aire y tamaño de agregado, una reducción en la relación agua/cemento, los agregados redondeados y el uso de aditivos reductores de agua o de ceniza volante reducen la demanda del uso del agua; por otra parte los aumentos de temperatura, en los contenidos de cemento, la relación agua/cemento, la forma angulosa de los agregados así como la disminución de la proporción grueso a fino, eleva la demanda del uso del agua.

#### 2.1.4.1 RELACIÓN AGUA/CEMENTO

Es muy conocida la correlación que existe entre la resistencia a la compresión y la relación/agua cemento en el concreto; muchas investigaciones han llegado a la conclusión de que la variable única más importante para lograr un concreto de alta resistencia es la relación agua/cemento (w/c) y en la cual también puede incluirse la adición de algún aditivo, por ejemplo disminuyendo la cantidad de agua más que incrementando el contenido total de materiales cementantes, usualmente esto producirá resistencias más altas. Dentro de las investigaciones que se han logrado hacer se ha encontrado que la relación que existe entre la relación agua/cemento (w/c) y la resistencia a la compresión, que se ha determinado en el concreto de resistencia normal, es válida para concretos de alta resistencia, también se ha comprobado que el uso de aditivos químicos y otros materiales cementantes son esenciales para producir un concreto que pueda ser colocado con una relación w/c baja; la relación agua/material cementante (w/c), para concretos de alta resistencia se encuentra en un rango de 0.20 hasta 0.50.

Esta relación agua/material cementante, se expresa como la relación de agua en peso o como porcentaje de agua en relación al cemento, anteriormente se expresaba comúnmente en litros de agua por saco de cemento. Por su parte; la cantidad de cemento influye en la resistencia del concreto, en general; mientras más cemento se utilice (mezclas ricas) mayor será la resistencia, pero el contenido de cemento en sí mismo no es una medida de resistencia; esto se debe a que un alto contenido de cemento da, con la cantidad de agua necesaria para la trabajabilidad, una relación agua/material cementante menor, la cual está directamente relacionada con la resistencia.

Por ejemplo si se tienen dos mezclas que pueden ser comparables en su trabajabilidad, la de más baja relación agua/cemento tendrá mayor resistencia, independientemente de la cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto; también es cierto que entre dos mezclas de trabajabilidad comparable y con la misma relación agua/cemento (y por lo tanto la misma resistencia potencial) puede existir una diferencia considerable en el contenido de cemento, dependiendo de la granulometría y de otras características del agregado.

A continuación se hablará de la *selección de la relación agua/material cementante (w/c)*, para mezclas de concreto de alta resistencia, puede hacerse uso de otros materiales cementantes como lo es la ceniza volante o algún otro aditivo químico; la relación agua/cemento (*w/c*) se calcula dividiendo la masa del agua de mezclado entre la masa combinada de cemento o en su caso, entre la masa combinada de cemento y la cantidad adicional de algún aditivo químico (*w/c+p*).

En las tablas 2.1.11 (a) y (b), las relaciones máximas recomendadas *w/c+p* se dan como una función del tamaño máximo del agregado para lograr diferentes resistencias a compresión a 28 días o 56 días, cabe mencionar que el uso de un aditivo reductor de agua de alto rango HRWR generalmente incrementa la resistencia a compresión del concreto.

En la tabla 2.1.11 (a) muestra los valores *w/c* para concretos que han sido elaborados sin algún aditivo y los que aparecen en la tabla 2.1.11 (b) son para concretos en los cuales se uso un HRWR.

La relación agua/material cementante puede ser todavía más limitada de la que se muestra en las tablas, por los requisitos de durabilidad; sin embargo, para aplicaciones típicas, el concreto de alta resistencia no debe estar sometido a severas condiciones de exposición. También cabe mencionar que cuando el contenido de material cementante de estas tablas excede 455 kg puede producirse una mezcla más práctica usando materiales cementantes o métodos de proporcionamiento alternativos.

**Tabla 2.1.11 (a) Relación w/c máxima recomendada para concretos sin el uso de aditivos**

Resistencia de campo $f_{cr}^*$ , kg/cm <sup>2</sup>	w/c Tamaño máximo del agregado grueso, mm				
	9.5	13	20	25	
490	28 días	0.42	0.41	0.40	0.39
	56 días	0.46	0.45	0.44	0.43
560	28 días	0.35	0.34	0.33	0.33
	56 días	0.38	0.37	0.36	0.35
635	28 días	0.30	0.29	0.29	0.28
	56 días	0.33	0.32	0.31	0.30
700	28 días	0.26	0.26	0.25	0.25
	56 días	0.29	0.28	0.27	0.26

\*  $f_{cr} = f_c + 100$

**Tabla 2.1.11 (b) Relación w/(c+p) máxima recomendada para concretos hechos con HRWR**

Resistencia de campo $f_{cr}^*$ , kg/cm <sup>2</sup>		w / (c+p) Tamaño máximo del agregado grueso, mm			
		9.5	13	20	25
490	28 días	0.50	0.48	0.45	0.43
	56 días	0.55	0.58	0.48	0.46
560	28 días	0.44	0.42	0.40	0.38
	56 días	0.48	0.45	0.42	0.40
635	28 días	0.38	0.36	0.35	0.34
	56 días	0.42	0.39	0.37	0.36
700	28 días	0.33	0.32	0.31	0.30
	56 días	0.37	0.35	0.33	0.32
775	28 días	0.30	0.29	0.27	0.27
	56 días	0.33	0.31	0.29	0.29
845	28 días	0.27	0.26	0.25	0.25
	56 días	0.30	0.28	0.27	0.26

\*  $f_{cr} = f_c + 100$

NOTA: Una comparación de los valores contenidos entre ambas tablas permite en particular, las siguientes conclusiones:

1. Para una relación dada de agua-material cementante, la resistencia de campo del concreto es mayor con el uso de HRWR que sin él, y esta mayor resistencia se alcanza dentro de un periodo de tiempo más corto.
2. Con el uso de HRWR, una resistencia de campo dada del concreto puede lograrse en un periodo de tiempo dado usando menos material cementante que el que se requeriría cuando no se usa HRWR.

### 2.1.5. ADITIVOS

Inicialmente en este tema se dará una definición de lo que representa el material de uso común en el concreto de alta resistencia, que se conoce como aditivo. Un *aditivo* es una sustancia química natural o manufacturada distinta a los materiales constitutivos del concreto como el agua, los agregados o el cemento, que se adicionan antes o durante el mezclado del mismo. Algunas de estas sustancias químicas o naturales conocidas como aditivos en la construcción y para uso en el concreto y que son muy frecuentes en su uso son los agentes inclusores de aire, reductores de agua, los retardantes y acelerantes; por mencionar algunos y cada uno de ellos se adapta a la necesidad y situación que sea requerida en determinado momento.

Una razón por la cual se utilizan este tipo de aditivos en las mezclas de concreto es para proporcionarle o aportarle propiedades especiales al concreto ya sea en estado fresco o endurecido; estos aditivos pueden mejorar características en la mezcla del concreto tales como la durabilidad, la trabajabilidad y la resistencia que sea requerida en una mezcla de concreto; además son usados comúnmente para vencer



situaciones difíciles de construcción, como pueden ser los vaciados (colados) en un clima caliente o frío, en requerimientos del bombeado, los requerimientos de la resistencia temprana o las especificaciones de una relación agua/cemento muy baja e incluso para beneficios en lo relacionado con el costo de una mezcla de concreto.

Los aditivos son usados en forma extensa en la producción de concreto de alta resistencia, cabe mencionar que la selección del tipo, marca y los rangos de dosificación de todos los aditivos debe estar basada en la relación con los demás materiales que están siendo considerados para su uso en cualquier proyecto determinado; por otra parte para obtener ventajas en el uso de aditivos, es conveniente la precaución en su uso, ya que un uso inadecuado puede causar cambios o afectar una o más propiedades del concreto, o bien puede contribuir a la aparición de efectos indeseables en el mismo; es conveniente hacer verificaciones antes de su uso ya que existen circunstancias que no se pueden pasar por alto como por ejemplo, existen tipos especiales de cemento donde se especifica la combinación de dos o más aditivos en una mezcla, la compatibilidad con el tipo de cemento, con las prácticas de construcción y especificaciones de trabajo por mencionar algunas, cuando la mezcla y colocación se realizan en condiciones de temperatura muy por encima o por debajo de las temperaturas recomendadas para la fabricación de la mezcla de concreto y como se menciona anteriormente considerar las ventajas económicas que se puedan generar con el uso de estos materiales químicos.

Como se ha mencionado, un aditivo es aquella sustancia que se incorpora a los componentes de la mezcla del concreto y que es distinta a los agregados, el agua, el cemento y que es posible su adición antes o durante el mezclado; sin embargo en la práctica del concreto hidráulico convencional no se les considera como aditivos las puzolanas y las escorias cuando forman parte de un cemento portland-puzolana, portland-escoria, ni las fibras de refuerzo porque dan o irán a concretos que no se consideran convencionales.

Ahora bien para interpretar la definición de aditivo se puede decir que un material sólo puede ser considerado aditivo cuando se incorpora de forma individual al concreto, es decir, que se puede tener un control sobre su dosificación, así de esta manera, las puzolanas y las escorias solamente son aditivos si se les maneja y administra por separado del cemento portland, lo cual no deja de ser una cuestión de forma, ya que cualitativamente sus efectos son los mismos que si se administran por conducto del cemento.

A forma de complementación de la definición de aditivo y de lo que representa esta sustancia química natural o manufacturada, cabe mencionar que el comportamiento y las propiedades del concreto, en sus estados fresco y endurecido, llegan a ser influidos y modificados por diversos factores intrínsecos y extrínsecos; los intrínsecos se relacionan esencialmente con las características de los componentes y las cantidades en que éstos se proporcionan para laborar el concreto, por otro lado los extrínsecos, pueden mencionarse las condiciones ambientales que prevalecen durante la elaboración y colocación del concreto, las prácticas constructivas que se emplean en todo el proceso desde su elaboración hasta el curado y las condiciones de exposición y servicio a que permanece sujeta la estructura durante su vida útil.

De lo anterior se observa que algunos de estos factores pueden ser objetos de maniobra por parte del usuario del concreto, pero otros no; por ejemplo los aspectos relativos a la composición del concreto y las prácticas constructivas son factores susceptibles de ajuste y adaptación, en tanto los que corresponden al medio ambiente y a las condiciones de exposición y servicio, por lo general son factores fuera del alcance y control del usuario.

El uso de aditivos queda comprendido dentro del primer recurso y normalmente representa una medida opcional, para cuando las otras medidas no alcanzan a producir los efectos requeridos, en las condiciones externas actuales o futuras, es decir; la práctica recomendable para el uso de los aditivos en el concreto, consiste en considerarlos en un medio complementario y no como un sustituto de otras medidas primordiales, tales como el uso de un cemento apropiado, una mezcla de concreto bien diseñada. Éstos aditivos suelen usarse para la elaboración de concretos, morteros, no sólo para modificar sus propiedades en los estados fresco y endurecido, sino también por economía, para ahorrar energía y porque hay casos en que el uso de un aditivo puede ser el único medio factible para obtener resultados satisfactorios, citando como ejemplos la resistencia al congelamiento y al deshielo, el retardo o la aceleración del fraguado y la obtención de alta resistencia.

En algún proyecto determinado, cuando sea necesario el uso de algún tipo de aditivo, se debe considerar los motivos para su uso, como por ejemplo; el aumento de la trabajabilidad, la obtención del desarrollo la resistencia, mayor resistencia, retardan o aceleran el fraguado, reducen el desarrollo de calor, aumentan la durabilidad en severas exposiciones ambientales y de uso, controlan la reacción de los álcalis, reducen la permeabilidad, mejoran la bombeabilidad, aumentan la adherencia entre el concreto y acero, así como la adherencia entre el concreto viejo con el nuevo, evitan la corrosión y también influyen en el costo de la obra.

La clasificación de los aditivos se hace de acuerdo con la función principal en el concreto, para mencionar esto se presenta a continuación la siguiente tabla 2.1.12 que hace referencia a la clasificación de aditivos basada en la norma ACI 212.

**TABLA 2.1.12 CLASIFICACIÓN DE ADITIVOS (ACI 212)**

<b>TIPO DE ADITIVO</b>	<b>EFFECTOS DESEADOS EN EL CONCRETO</b>
<b>Acelerantes</b>	Aceleran el desarrollo de resistencia
<b>Inclusores de aire</b>	* Usualmente mejoran la manejabilidad. * Disminuyen el sangrado. * Inducen control de los efectos por congelamiento.
<b>Reductores de agua y Controladores de fraguado</b>	
(A) Reductor de agua simple	Disminuye el contenido de agua.
(B) Retardantes	Inducen un retardo controlado sobre el tiempo de fraguado.
(C) Retardante y reductor de agua	* Induce retardo en el tiempo de fraguado de agua. * Reducción en el contenido de agua.
(D) Acelerante y reductor de agua	* Acelera el desarrollo de resistencia. * Reducción en el contenido de agua.
(E) reductor de agua de alto rango (plastificantes)	* Reduce radicalmente la demanda de agua. * Puede incrementar el revenimiento sin incremento de agua. * Incrementa la fluidez de la mezcla.
(F) reductor de agua de alto rango y retardante	* Marcada reducción de la demanda de agua. * Incrementa la fluidez de la mezcla.

**TABLA 2.1.12 CLASIFICACIÓN DE ADITIVOS (ACI 212)**

TIPO DE ADITIVO	EFECTOS DESEADOS EN EL CONCRETO
<b>Minerales finamente divididos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mejora la resistencia contra el ataque por sulfatos.</li> <li>* Reduce la permeabilidad.</li> <li>* En algunos casos controla la reacción álcali-agregado.</li> <li>* Disminuye los efectos por lixiviación.</li> <li>* Producen disminución del calor de hidratación.</li> </ul>
<b>Diversos</b>	
Formadores de gas	Para formar concretos celulares.
Para mezclas de inyección	Induce estabilidad, reduce la contracción en la mezcla.
Para control de expansión	Regula la expansión.
Adhesivos integrales	Aumentan la adherencia del concreto nuevo con endurecido.
Auxiliares de bombeo	Incrementan la cohesión y viscosidad de la mezcla.
Repelentes de humedad	Reducen la velocidad de penetración del agua en el concreto.
Reductores de permeabilidad	Reducen la permeabilidad.
Inhibidores de reacción tipo álcali-agregado	Reducen las expansiones causadas por esta reacción.
Inhibidores de la corrosión	Crean bloques electroquímicos para impedir la corrosión del acero.

Enseguida se mencionará de forma general los efectos que tienen los aditivos en el concreto para los cuales se hará de la siguiente forma:

### **Aditivos Acelerantes**

Este tipo de aditivos reduce el tiempo de fraguado inicial del concreto y ayuda a obtener una resistencia temprana más alta; estos aditivos no son anticongelantes, sin embargo aceleran la velocidad de su asentamiento y el desarrollo de resistencia, haciéndolo más resistente a los daños producidos por congelamiento en clima frío. Los acelerantes también son utilizados en construcciones de gran velocidad que requieran una temprana remoción de moldes, apertura al tráfico o aplicación de cargas en estructuras. Existen dos tipos de acelerantes, los basados en cloruros y los libres de cloruros, en donde se observa que uno de los más efectivos y económicos es el cloruro de calcio, el cual se especifica una cantidad no mayor del 2% en peso de cemento; por otra parte debido a la corrosión inducida en el acero de refuerzo por los cloruros, los límites de cloruros aplicados al concreto reforzado son menores; a su vez el concreto pretensado y el concreto con elementos embebidos de aluminio o metal galvanizado no deben contener ningún cloruro de calcio debido a la corrosión potencial.

Los acelerantes no son utilizados comúnmente en concretos de alta resistencia a menos que como se ha mencionado anteriormente se requiera un descimbrado temprano crítico; los acelerantes utilizados para incrementar el porcentaje de endurecimiento, normalmente serán contraproducentes en el desarrollo de resistencia a largo plazo.

### **Aditivos Incluidores de Aire**

El uso de este tipo de aditivos incluidores de aire se recomienda para aumentar la durabilidad cuando el concreto está expuesto a ciclos de congelación y deshielo; la inclusión de aire tiene un efecto sobre el concreto de reducción de su resistencia, de forma particular en las mezclas de concreto de alta resistencia, cabe mencionar que puede presentarse una pérdida en su resistencia del 5% por cada 1% de aire incluido;

pero en concretos con bajo contenido de cemento la incorporación de aire afecta menos y puede incrementar la resistencia ligeramente debido a la reducción de agua para lograr un cierto asentamiento o revenimiento. La mayor parte de los concretos de alta resistencia colados en sitio son usados para aplicaciones que no requieren aire incluido; por lo tanto no es recomendable que se usen este tipo de aditivos inclusores de aire en este tipo de concretos.

Por su parte para reducir los efectos que provocan la congelación y el deshielo se ha desarrollado este tipo de aditivos que de manera intencional incluye burbujas o micro-burbujas de aire uniformemente distribuidas en la mezcla del concreto las cuales permanecen después de su endurecimiento. En el concreto en estado plástico los agentes incorporadores de aire mejoran la trabajabilidad y la exudación o sangrado y la segregación; el aire incorporado no es necesario para concreto estructural en interiores que no están sujetas a congelación y deshielo, también no debe ser utilizado en pisos o losas que tengan un acabado muy afinado o muy liso. Ahora bien, para cada mezcla de concreto existe un volumen mínimo de huecos requeridos para la protección de heladas, se encontró que este volumen corresponde al 9% del volumen de la mezcla y es esencial que las burbujas se distribuyan de forma uniforme en la pasta de cemento; la eficacia en la inclusión de aire se puede estimar por medio del factor de espaciamiento; este factor es la máxima distancia de un punto en la pasta del cemento a la periferia de la burbuja de aire más cercana; se requiere un factor de espaciamiento de 0.20 mm para una protección total de los daños por congelamiento y entre más pequeño sea el factor de espaciamiento mejor será la durabilidad del concreto.

Existen diversos factores que influyen en la cantidad de aire resultante en el concreto cuando una cantidad dada de un aditivo inductor de aire se añade, esto se debe a las variaciones en sus componentes, manejo y temperatura, ya que alteran la tensión superficial de agua y por lo tanto la formación de las burbujas; entre estos se tienen:

1. El mezclado con agua dura reduce el contenido de aire incluido.
2. A menudo se requieren mayores dosificaciones de aditivos inclusores de aire (AIA) al aumentar la finura de los productos cementantes.
3. Los cementos altos en álcalis aumentan el contenido de aire incluido.
4. Los concretos con altos contenidos de cemento incluirán menos aire que aquéllos con bajos contenidos.
5. Los concretos con ceniza volante pueden incluir menos aire.
6. Un aumento en el contenido de carbón de la ceniza volante, microsílica o bentonita, disminuye la cantidad de aire incluido.
7. A mayor proporción de finos en el agregado, mayor será el contenido de aire en el concreto.
8. Cuando el tamaño máximo del agregado aumenta, el requerimiento de aire en el concreto disminuye; este efecto es indirecto, ya que entre mayor sea el tamaño máximo, menor será el porcentaje de mortero.
9. El uso de agregado anguloso aumenta la dosificación requerida de aire incluido, no así el redondeado, para la misma trabajabilidad.
10. Revenimientos menores de 7.5 cm requieren mayores dosificaciones de aditivo. Al aumentar el revenimiento hasta 15.0 cm, aumentará el contenido de aire.
11. Para revenimientos mayores de 15.0 cm, el contenido de aire disminuye y las burbujas de aire son menos estables.



12. Se debe optimizar el tiempo y velocidad de mezclado, ya que bajos valores causan la dispersión no uniforme de las burbujas, mientras que mezclar en demasía gradualmente se expulsa algo de aire.
13. La muy rápida rotación de la revolvedora aumenta la cantidad de aire incluido.
14. La prolongada transportación y vibración reduce la cantidad de aire incluido; por lo que el contenido de aire en el concreto debe ser determinado antes de su colocación.
15. Una alta temperatura del concreto fresco da por resultado una baja cantidad de aire y viceversa, el efecto es más significativo en revenimientos mayores.
16. El vapor a presión atmosférica al curar el concreto puede causar expansión de las burbujas de aire y conducir a un agrietamiento incipiente.

### **Aditivos Reductores de Agua y Controladores de Fraguado**

Este tipo de aditivos proveen incrementos en la resistencia sin provocar alteraciones en el porcentaje de endurecimiento; su elección debe basarse en el desarrollo de la resistencia; cabe mencionar que un incremento en las dosis por arriba de las cantidades normales provocarán incrementos en la resistencia, más sin embargo extenderá el tiempo de fraguado del concreto. Estos aditivos son utilizados para reducir la cantidad de agua de mezclado e incrementar la resistencia o bien para incrementar el asentamiento o revenimiento del concreto utilizando el mismo contenido de agua. A su vez muchos aditivos reductores de agua pueden ser también retardadores de fraguado del concreto; algunos son modificados para dar varios grados de retardo mientras que otros no afectan significativamente el tiempo de fraguado.

Estos aditivos dispersan las partículas del cemento en el concreto; esto incrementa la resistencia y permite que se reduzca el contenido de cemento manteniendo la misma relación agua/material cementante. Estos aditivos son utilizados para incrementar el asentamiento en concretos bombeados y se emplean en clima caliente para contrarrestar la creciente demanda de agua; también es muy común su uso ya que mejoran la trabajabilidad del concreto para los acabados en losas. También dentro de este tipo de aditivos se encuentran los llamados súper reductores de agua, que se comportan como los reductores de agua convencionales pero con mucha mayor eficiencia, estos incrementan la fluidez de la pasta y pueden utilizarse para poder obtener reducciones de agua de entre 20 a 30%, además estos difieren de los reductores de agua convencionales y pueden usarse en altas dosificaciones sin una excesiva inclusión de aire y además no producen retardo excesivo aún con altas dosificaciones. Por su parte los aditivos convencionales reductores de agua pueden reducir el requerimiento de agua en el concreto hasta en un 10%, siempre y cuando no se obtengan efectos perjudiciales en otras propiedades del concreto; la reducción mínima permisible es del 5%; ahora mencionando desde el punto de vista en su manejabilidad para un mismo asentamiento, el concreto que tiene un aditivo reductor de agua usualmente la mejora, facilitando la colocación con menor segregación y mejor respuesta a la consolidación; en cuanto al calor de hidratación y la temperatura del concreto éstos se disminuyen para el mismo contenido de cemento al emplear este tipo de aditivos, también se puede reducir la cantidad de cemento para conservar la relación agua/material cementante, lo que conlleva a que el calor liberado por unidad de volumen de concreto y el aumento de temperatura reduzcan; otro efecto es que al reducir el contenido de cemento provoca o genera la disminución de la probabilidad de contracción. En cuanto a la durabilidad la mejoría que se puede esperar es debida a la reducción de agua, reducción de permeabilidad y aumento de la resistencia, que también mejoran el módulo de elasticidad y la adherencia del concreto al acero de refuerzo.

A su vez, dentro de este tipo de aditivos se pueden encontrar los *aditivos reductores de agua de fraguado normal* que como ya se mencionó incrementan la resistencia sin alterar el porcentaje de endurecimiento; la cantidad de estos aditivos, así como de los retardantes usados en mezclas de concretos de alta resistencia han ido variando dependiendo de la aplicación en particular del aditivo. Normalmente, la tendencia ha sido usar cantidades más grandes que las cantidades máximas normales; estos aditivos tienen reducciones típicas de agua de entre 5 a 8% y pueden incrementarse como se mencionó hasta un 10%; incrementos en la arena se han hecho para compensar la pérdida de volumen debida a la reducción de agua en la mezcla.

Los *retardantes reductores de agua* generalmente proveen una resistencia mayor en el concreto si el contenido de agua se reduce y si el contenido de cemento y el revenimiento se mantienen constantes. En concretos de alta resistencia, la reducción en la relación agua/cemento alcanzada por la eliminación de excesos en el agua de mezclado puede producir grandes mejoras en la resistencia como las obtenidas por una reducción similar debida al aumento de cemento. Los retardantes reductores de agua normalmente son más baratos y efectivos que los reductores de agua.

Por otra parte los *aditivos retardantes de fraguado* del concreto han surgido para contrarrestar la reducción en el tiempo de fraguado cuando se presenta una alta evaporación en el colado en clima caliente; estos aditivos se han utilizado indiscriminadamente, siendo que su uso es aplicable fundamentalmente para reducir la aparición de juntas frías. Como es sabido, las condiciones de fraguado del concreto son importantes no sólo para regular los tiempos de mezclado, transportación y colocación de la mezcla, sino porque de ellas también dependen muchas propiedades posteriores del concreto.

La durabilidad de estos aditivos está en función de su influencia en la retracción plástica; dicha retracción se entiende como la disminución en el volumen del concreto superficial originada por una pérdida de humedad por evaporación rápida, antes de que pueda ser reemplazada por agua de sangrado proveniente de las capas inferiores; la retracción plástica ocurre durante las primeras horas después del colado del concreto; la retracción plástica máxima depende de la rigidez de la revoltura y del tiempo de fraguado; esto quiere decir que entre mayor sea la rigidez de la revoltura y menor el tiempo de fraguado, la retracción esperada será menor; por todo lo anterior, el uso de retardantes o aditivos cuyo efecto secundario sea el retardo en el tiempo de fraguado, aumentará la retracción plástica.

También se encuentran los *aditivos reductores de alto rango*; que se puede decir que es un tipo de aditivo especial, que con frecuencia son denominados superplastificantes, reducen el contenido de agua en el concreto entre un 12 y 25%. Por esta razón, este tipo de aditivos se usa para incrementar la resistencia y reducir la permeabilidad del concreto reduciendo el contenido de agua en la mezcla o para incrementar de mayor forma el asentamiento, produciendo un concreto fluido sin la adición de agua; son esenciales en concretos de alta resistencia que tienen altos contenidos de materiales cementantes y mezclas que tengan humo de sílice. Una dosificación se encuentra entre 177 a 591 ml/kg de cemento y ofrecen ventajas con respecto a la reducción contenido de agua sin la pérdida de revenimiento; dosificaciones más altas pueden resultar en un decremento en la resistencia a compresión a menos que el contenido de cemento se incremente para equilibrar ese efecto de reducción; además como se mencionó sirven para incrementar el revenimiento, incrementar la resistencia mediante la reducción del contenido de agua y la relación agua/cemento; o disminuyendo los contenidos de agua y cemento.

Los efectos primarios en la resistencia a compresión del concreto se derivan de su efecto en la relación agua/cemento; cuando se usan para bajos requerimientos de agua al mismo revenimiento y mismo contenido de material cementante, el resultado de la relación agua/cemento incrementará significativamente la resistencia del concreto a todas las edades. Y por lo anterior, y a su efectividad en la reducción de la relación agua/cemento, este tipo de aditivos reductores de alto rango son benéficos en la producción de concretos con resistencia a compresión de  $410 \text{ kg/cm}^2$  a 28 días; además producen altas resistencias principalmente a edades tempranas (24hrs).

### **Minerales Finamente Divididos**

De acuerdo con el ACI 363, los minerales finamente divididos consisten principalmente en ceniza volante y humo de sílice, han sido extensamente utilizados en el concreto de alta resistencia; de tal forma que se mencionará de la siguiente forma cada uno de estos componentes.

### **Cenizas Volantes (Fly Ash)**

La ceniza volante para el concreto de alta resistencia está clasificada en dos clases; una de ellas es la ceniza volante clase F normalmente obtenida o producida por la calcinación de antracita o carbón bituminoso y que tiene propiedades puzolánicas, pero con pocas o ninguna propiedad cementante. Por otro lado se tiene la ceniza volante tipo C, la cual es obtenida también por el método de calcinación de lignito o carbón sub-bituminoso, esta clase de ceniza cuenta con propiedades puzolánicas y además propiedades cementantes.

Las variaciones en las propiedades físicas o químicas de estos aditivos minerales; aunque se encuentren dentro de las tolerancias y especificaciones del ASTM C618, pueden causar variaciones apreciables en las propiedades del concreto de alta resistencia. En el concreto de alta resistencia, los materiales puzolánicos han sido utilizados como un suplemento del cemento portland desde un 10 hasta un 40% por peso del contenido de cemento; en esas situaciones donde se presenta un incremento neto en el volumen absoluto de los materiales cementantes debido a la adición de puzolanas, se hace usualmente una reducción en el volumen absoluto de arena. Como cualquier otro aditivo, los aditivos minerales deben analizarse para verificar la compatibilidad con los demás materiales del concreto para obtener los resultados o las propiedades deseadas en cada una de las aplicaciones y situaciones, donde será utilizado el concreto antes de ser usado en la construcción.

### **Humo de Sílice**

En concretos de alta resistencia se han utilizado el humo de sílice y aditivos con contenidos de humo de sílice para propósitos estructurales y para aplicaciones superficiales, a su vez como material de reparación en situaciones donde la resistencia a la abrasión y la baja permeabilidad son ventajosas. El humo de sílice es un subproducto resultado de la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico en la producción de silicona y ferrosilicón. Este aditivo mineral consiste en partículas vítreas muy finas con un área superficial en el orden de  $20,000 \text{ m}^2/\text{kg}$ ; cuando se mide con técnicas de absorción de nitrógeno (la ceniza volante tiene un área superficial de 400 a  $700 \text{ m}^2/\text{kg}$ ).

La distribución del tamaño de las partículas de humo de sílice típico, muestra que la mayor parte de las partículas es menor a una micra con un diámetro promedio cerca de  $0.1 \mu\text{m}$ ; esto significa que es aproximadamente 100 veces más pequeño que una partícula promedio de cemento. El humo de sílice, debido a su extrema finura y alto contenido de sílice, es un material puzolánico altamente efectivo; el humo de sílice reacciona puzolanicamente con la cal durante el proceso de hidratación del cemento para formar mezclas de concreto estables, normalmente los rangos del contenido de humo de sílice van desde un 5 a un 15% del contenido del cemento.

El humo de sílice se uso en un principio como sustituto del cemento; en aplicaciones generales parte del cemento puede ser reemplazado por una cantidad mucho menor de humo de sílice, sin la pérdida de resistencia, cuidando el contenido de agua para que sea constante; el uso de este aditivo mineral aumenta la demanda de agua; si se desea mantener la misma relación agua/cemento se debe hacer uso de otros aditivos como por ejemplo, aditivos reductores de agua o reductores de alto rango. Ahora bien, considerando su limitada disponibilidad y alto precio; el humo de sílice se ha utilizado como material para mejorar propiedades, como por ejemplo para la obtención de muy alta resistencia a la compresión o con muy altos niveles de durabilidad o en su caso la obtención de ambas propiedades.

Cabe mencionar que dentro de los efectos del uso de este tipo de aditivo mineral en el concreto fresco, la demanda de agua en el concreto que contiene humo de sílice aumenta; lo que conlleva como se mencionó, a utilizar otros aditivos reductores de agua; otra característica es que reduce el sangrado por bloqueo físico de los poros en el concreto fresco, esto es debido a que existe poca agua libre en la mezcla para el sangrado, también reduce la segregación debido a la finura del mismo y a los aditivos y aumenta la resistencia; las grietas por contracción plástica generalmente ocurren cuando el porcentaje de evaporación de agua de la superficie del concreto excede el porcentaje por el cual el agua desaparece en la superficie debido al sangrado, pero como se ha dicho que reduce el sangrado por el uso del humo de sílice, el agrietamiento por contracción plástica aumenta. Con respecto a la trabajabilidad es más cohesivo, generalmente reduce esta propiedad para un determinado contenido de agua. Por otra parte la presencia del humo de sílice no cambiará significativamente el porcentaje de pérdida de revenimiento; sin embargo como se había mencionado influye en el uso de aditivos reductores de agua y reductores de alto rango, por lo tanto puede existir un cambio en las características de la pérdida de revenimiento a causa del uso de los aditivos seleccionados y finalmente el tiempo de fraguado del concreto, indica la experiencia no se ve afectado por el uso de humo de sílice.

Otros efectos provocados por el humo de sílice en el concreto en su estado endurecido, se muestra en la permeabilidad, la cual es determinada por la medida del porcentaje de líquido o vapor que pasa a través del medio, debido a que la permeabilidad está relacionada con la porosidad, la permeabilidad a líquidos y vapores se reduce mediante la adición de humo de sílice. El uso de este aditivo mineral hace que la estructura de los poros de la pasta sea más homogénea, disminuyendo de esta forma el número de poros de mayor tamaño. Dentro de la resistencia, las mezclas del concreto pueden ser dosificadas para producir la resistencia requerida y la velocidad de ganancia de resistencia que sea requerida para la aplicación; con las adiciones que no sean humo de sílice, la velocidad de ganancia de resistencia puede ser más baja inicialmente, pero la ganancia de resistencia es continuada por un periodo de tiempo más largo comparado con las mezclas que sólo poseen cemento portland, lo que da como resultado resistencias últimas más elevadas; se han utilizado cenizas volantes especialmente en la producción de concreto de alta resistencia



de entre 400 y 1000 kg/cm<sup>2</sup>. Con el humo de sílice, los productores de concreto premezclado tienen la capacidad de producir concretos con resistencia de 1400 kg/cm<sup>2</sup> o más si se hace uso de agregados adecuados y de un aditivo reductor de agua de alto rango. Finalmente el control del color del concreto está siendo cada vez más importante, sobre todo cuando se va a quedar aparente, a la vista del público; la variación del color con la que contribuyen los aditivos minerales divididos, puede ser reducido al mínimo usando en la obra un aditivo de un sólo origen o lote.

Como se puede observar, la tendencia sigue siendo un mayor desarrollo en el ámbito de la tecnología del concreto, algunos de esos desarrollos han marcado épocas en esa evolución, en tanto que otros han desempeñado un papel complementario dentro del desarrollo tecnológico, al servir de complemento como en éste caso hacia los aditivos nuevos; el campo de los aditivos es muy amplio y desde las primeras patentes comerciales no se ha detenido su investigación y desarrollo. Como se puede observar, tienen una gran influencia en los cambios y mejoramiento de las propiedades del concreto, para cada uso correspondiente y muy probablemente continuarán teniendo esa amplia influencia en el futuro.

## 2.2 PROPIEDADES FÍSICAS

### 2.2.1 PERMEABILIDAD

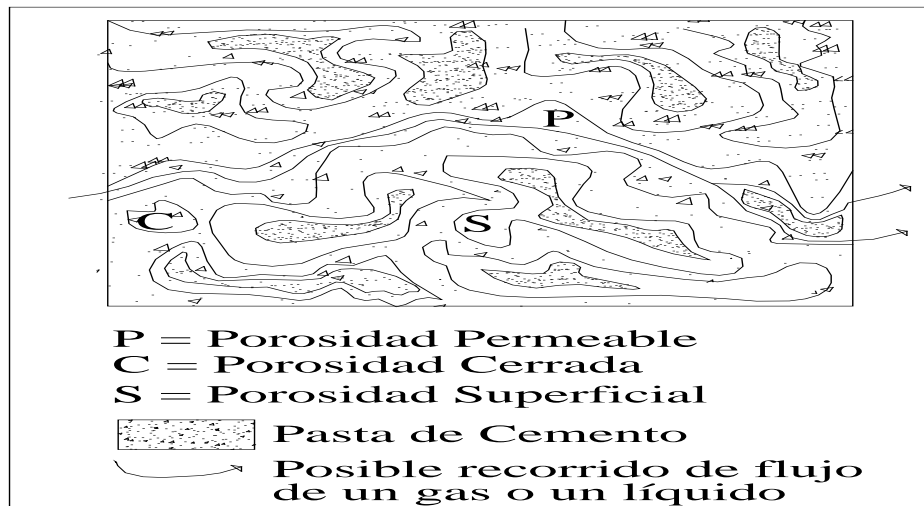
El concreto empleado en estructuras que retengan agua o que estén expuestas a mal tiempo o a otras condiciones de exposición severa debe ser virtualmente impermeable y hermético. La hermeticidad se define a menudo como la capacidad del concreto de refrenar o retener el agua sin escapes visibles; por su parte la permeabilidad se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias (líquido, gas, iones, etc.); por lo general las mismas propiedades que convierten al concreto menos permeable también lo vuelven más hermético.

La permeabilidad total del concreto al agua es una función de permeabilidad de la pasta, de la permeabilidad y granulometría del agregado; la disminución de la permeabilidad mejora la resistencia del concreto al ataque de sulfatos y otros productos químicos y a la penetración del ión cloruro. Los iones cloruros se consideran como el factor más importante que influye en la intensidad de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto armado; el acero depende de factores que debe cumplir el concreto, ya que es el material que envuelve al acero de refuerzo; entre los factores más determinantes para la permeabilidad están:

- *La porosidad del concreto.*- Cuando el cemento se mezcla con agua, sus distintos componentes se hidratan formando un conglomerado sólido, constituido por las fases hidratadas del cemento y una fase acuosa que proviene del exceso de agua de amasado, necesaria para la mezcla adecuada de todos sus componentes y que aporta la trabajabilidad para su coacción; el concreto resulta ser un sólido compacto y denso pero poroso. Esos poros son producto de la evaporación del agua excedente o son formados por el aire atrapado, que provocan o permiten que el concreto presente

una cierta permeabilidad a los líquidos y gases. El hecho de la existencia de la porosidad es importante con respecto a la durabilidad del concreto, por un lado la acción de los agentes agresivos comienza en la parte de la superficie del concreto, desarrollándose más tarde en el interior a través de los poros, pero por otro lado; la superficie interna de los poros es muchas veces mayor que la superficie exterior, ampliando drásticamente la superficie de actuación de los agente agresivos, por lo que interesan tres factores como son, el volumen total de los poros, su distribución en los diferentes tamaños y el grado de accesibilidad de los mismos desde el exterior y su interconexión al interior.

TIPOS DE POROSIDAD



- *La relación agua/material cementante.*- Aproximadamente el 25% del agua de hidratación agregada al concreto interviene en las reacciones químicas, quedando finalmente en forma de poros. Se considera que para relaciones agua/material cementante mayores a valores de entre 0.35 – 0.38, el agua incorporada dará origen a poros capilares; lo antes expuesto recomienda que resulta necesario diseñar la composición apropiada de la mezcla de concreto y debe de hacerse con la más baja relación agua/material cementante posible, de esta forma se logrará una buena compactad y densidad; cabe señalar que también el grado de compactación influye de manera importante para el acomodo de todos los componentes de la mezcla de concreto; se puede tener una relación agua/material cementante alta pero bien compactada y se puede tener una baja permeabilidad, inversamente sucede si se tiene una baja relación agua/material cementante pero con un grado de compactación insuficiente, es muy probable que tenga una mayor permeabilidad.
- *El tipo de cemento.*- El tipo y contenido de cemento tienen una gran influencia en la permeabilidad que finalmente tenga el concreto, el uso de un cemento portland con las características adecuadas y necesarias para que la mezcla de concreto resista los agentes agresivos, se recomiendan usar cementos con un alto grado de finura y un mayor contenido de cemento además de agregados bien graduados, de tal forma que se obtengan concretos más densos y menos porosos; a su vez con la integración de algún aditivo para reducir la permeabilidad o con aditivos inclusores de aire o puzolanas.



La permeabilidad también afecta la capacidad de destrucción por congelamiento en condiciones de saturación; aquí la permeabilidad de la pasta es de particular importancia porque la pasta recubre a todos los constituyentes del concreto; a su vez la permeabilidad de la pasta depende de la relación agua/material cementante como ya se mencionó y de la duración del curado húmedo. Un concreto de baja permeabilidad requiere de una relación agua/material cementante baja y un periodo de curado húmedo adecuado, la inclusión de aire ayuda a la hermeticidad aunque tiene un efecto mínimo sobre la permeabilidad, aumenta con el secado. Una relación agua/material cementante baja reducen también la segregación y el sangrado, contribuyendo de esta forma a la hermeticidad; a su vez para que se logre esta hermeticidad el concreto debe estar libre de agrietamientos y de celdillas.

La permeabilidad consiste en la facilidad con la que el concreto se puede saturar de agua, por lo que un concreto de alta resistencia quiere decir como su nombre lo dice, resistencias altas o una baja permeabilidad, se enlazan una con otra porque la resistencia alta requiere un bajo volumen de poros capilares mayores y para poder conseguir este bajo volumen de poros, la mezcla debe contener una distribución de partículas hasta el tamaño más fino, y esto se logra con la ayuda del humo de sílice el cual llena los espacios entre partículas de cemento y entre el agregado.

Como se puede observar, lo que un concreto de alta resistencia debido a sus características; tiene entre sus prioridades, es lograr una baja permeabilidad para detener el ataque de iones nocivos y de esta forma lograr su durabilidad, lo anterior se obtiene por medio de adiciones puzolánicas, relaciones agua/cemento bajas, la porosidad y forma de los agregados ya que es conveniente una buena granulometría y no utilizar un agregado uniforme ya que produce un concreto muy permeable, la finura del cemento ya que si es grueso tiende a producir una pasta muy porosa, debido a esto influye en la velocidad de la hidratación, además de una muy buena compactación y vibrado.

### 2.2.2 ELASTICIDAD

Uno de los términos que se pueden encontrar en el estudio del concreto es el conocido como módulo de elasticidad, módulo de Young o también llamado constante elástica o elasticidad del material, el cual se designa con la letra “E”. Para el concreto, el mal llamado módulo de elasticidad; ya que mide un índice de rigidez del material y no una propiedad de elasticidad, se puede considerar que mientras más alto sea este valor, menos se deformará el material ante la presencia de una carga; el módulo de elasticidad del concreto puede variar en función de diversos factores como pueden ser el estado de humedad y la compactación del concreto, la relación agua/material cementante y edad de la pasta, así como las características de los agregados.

Tanto la relación agua/material cementante de la pasta como su edad, son factores que determinan su resistencia a compresión del concreto en el momento de su ensaye, por consiguiente su influencia en el módulo de elasticidad, sucede lo mismo con la influencia del uso de los agregados de buena calidad; el módulo de elasticidad se incrementa a medida que aumenta su resistencia a compresión, al mismo tiempo se puede observar que al aumentar su resistencia a compresión el concreto pierde su ductilidad, esto quiere decir que se vuelve más frágil.

Existen algunas expresiones experimentales para poder predecir el módulo de elasticidad, para un concreto Clase I; el Reglamento de Construcción del D.F. proporciona expresiones que correlacionan el módulo de elasticidad  $E_c$  a los 28 días mínimo y son las siguientes:

Para agregado grueso calizo:

$$E_c = 14000 \sqrt{f'_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Las variaciones de los valores obtenidos dependen de las propiedades y proporciones del agregado grueso.

Puede utilizarse también:

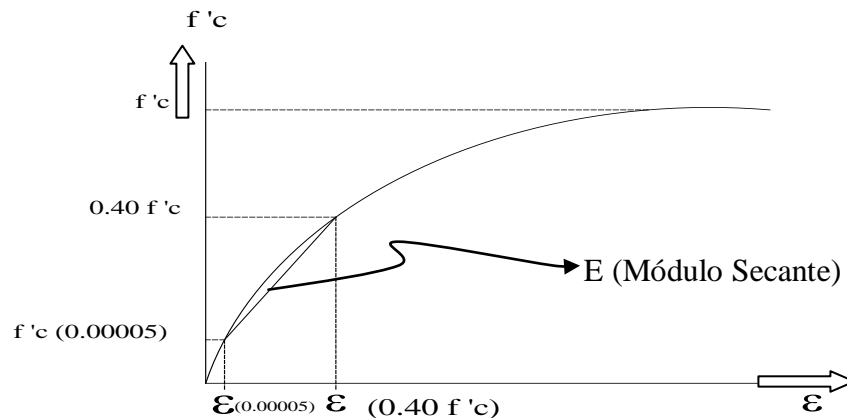
Para agregado basáltico:

$$E_c = 11000 \sqrt{f'_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

De esta forma; el módulo de elasticidad, se define como la secante de la curva esfuerzo-deformación en compresión uniaxial a un nivel de esfuerzo de 40% del esfuerzo máximo, el módulo secante se usa en el laboratorio para definir la deformabilidad de un concreto en estudio.

Esto es; conforme a la Norma NMX C-128, para medir la deformabilidad de un concreto, el módulo secante el cual está dado por la pendiente de la línea que une los puntos de la gráfica esfuerzo axial-deformación unitaria, se recomienda la pendiente de la línea que une los puntos de la curva correspondiente a una deformación de 0.00005 y como se mencionó anteriormente al 40 por ciento de la carga máxima; como se puede observar en la figura 2.2.1.

Figura 2.2.1





### 2.2.3. PLASTICIDAD

El flujo plástico se define como el incremento de la deformación del concreto sujeto a un esfuerzo constante con el transcurso del tiempo; el flujo plástico se considera a partir de la deformación elástica inicial dada por el módulo secante de elasticidad a la edad de la carga como se muestra en la figura 2.2.2. y 2.2.3. Existen muchos factores que influyen en el flujo plástico del concreto en el que se pueden mencionar los siguientes:

- Relativos al concreto: relación agregado-cemento, relación agua-cemento, tipo de agregado y su graduación, composición y finura del cemento, contenido de humedad y edad al momento de la carga.
- Relativos a la estructura: intensidad y duración de la carga, humedad ambiental y tamaño del elemento estructural.
- Relativos al agregado: menor flujo plástico a mayor tamaño máximo del agregado; los concretos que emplean agregados de origen andesítico, por ejemplo en la ciudad de México, presentan mayores valores de flujo plástico que aquellos que usan agregados de origen calizo.
- Relativos a la resistencia a la compresión del concreto: cuanto mayor sea la resistencia a la compresión, menor será el flujo plástico del concreto, considerando la misma intensidad de carga y condiciones geométricas de la estructura y del ambiente.

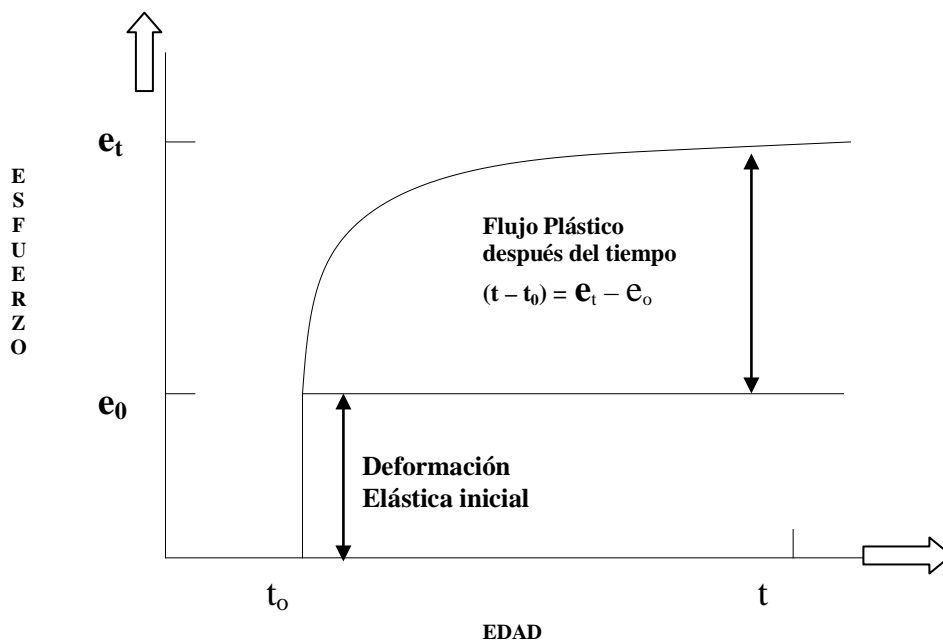
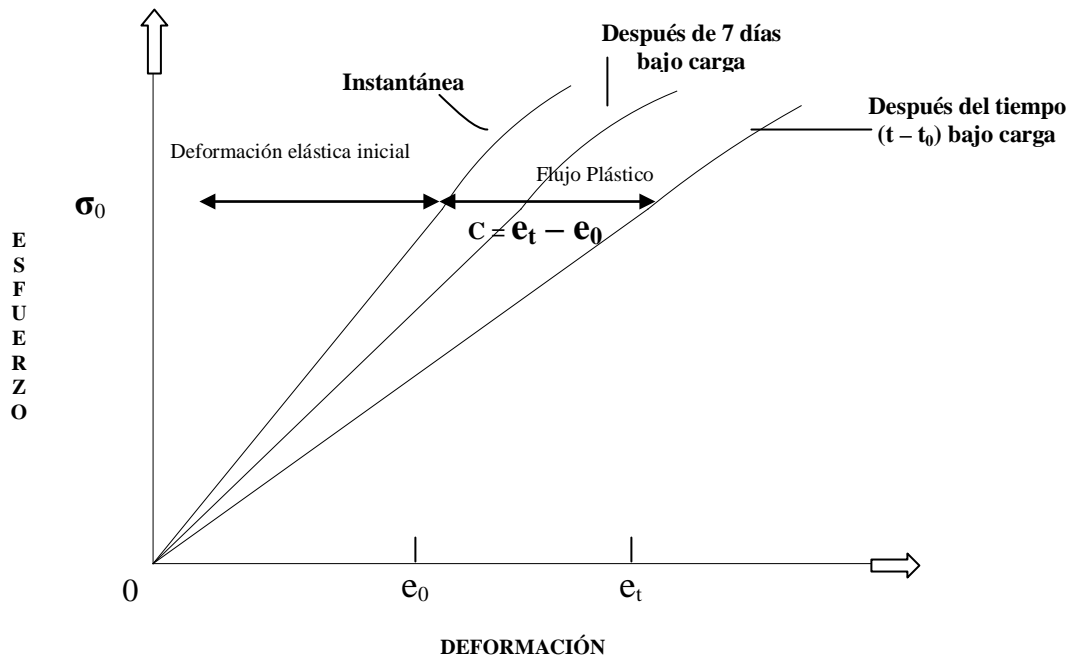


Figura 2.2.2 Flujo Plástico bajo un esfuerzo constante



**Figura 2.2.3** Curvas esquemáticas de esfuerzo-deformación para el concreto; a la aplicación de la carga después de siete días bajo carga, y después de  $(t - t_0)$  días bajo la carga

La mejor forma de disminuir el flujo plástico del concreto es con el uso de agregados de excelentes propiedades mecánicas, ya que el papel principal del agregado es reprimir el flujo plástico en la pasta de cemento, efecto que depende del módulo elástico del agregado y su proporción volumétrica; por lo tanto mientras más rígido sea el agregado, más bajo será el flujo plástico y mientras más alto es el volumen del agregado, más bajo será el flujo plástico. También de tal forma, las bajas relaciones agua/material cementante ya que es el principal factor en la porosidad y a su vez, en la resistencia del concreto, ahora bien para un contenido constante de la pasta de cemento, el efecto de una disminución de la relación agua/material cementante, aminora el flujo plástico y en este caso se observa una relación entre el flujo plástico y la resistencia. Por otra parte los concretos de alta resistencia, los cuales se ha visto, tienen menores valores de flujo plástico que los concretos de menores resistencias.

#### 2.2.4 DURABILIDAD

La durabilidad es la capacidad del concreto hidráulico para resistir satisfactoriamente durante un tiempo determinado (vida útil) la acción ambiental, ataque químico o abrasión y de proteger el acero de refuerzo y demás elementos metálicos de la corrosión o cualquier otro proceso de deterioro, para mantener su forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas; esta definición es la que determina la Norma Mexicana NMX-C-155 y NMX-C-403.

Esta última menciona además, que las estructuras de concreto deben ser diseñadas y construidas con el propósito de cumplir los requisitos de funcionabilidad, lo que quiere decir que no cause gastos extraordinarios debidos a mantenimientos y reparaciones por ejemplo; durante toda la trayectoria de su vida útil. La vida útil se incluye implícitamente en el diseño y en los diferentes reglamentos de construcción sin embargo, prácticamente en ningún caso se establece de forma explícita, de manera general se considera que la vida útil de las edificaciones diseñadas de acuerdo con reglamentos modernos es de 50 años; en otras obras de infraestructura como lo son las presas, diques y otros, la vida útil debe ser superior a los 100 años.

De acuerdo con la agresividad del medio externo se deben tomar medidas adecuadas para lograr la expectativa de la vida útil requerida, como regla general se ha establecido que el concreto para elementos estructurales debe tener una relación agua/material cementante inferior a 0.6. Por otra parte los factores que intervienen con mayor importancia en la durabilidad del concreto son, entre otros; la permeabilidad, la compactación adecuada, la protección del acero de refuerzo, el curado y los recubrimientos adecuados cuando sean requeridos; para que los elementos de concreto cumplan con una durabilidad de por lo menos 50 años según la clase de exposición ambiental, no se debe emplear una relación agua/material cementante mayor que 0.60, ni una resistencia a la compresión simple ( $f'c$ ), con agregado ligero, menor a  $260 \text{ kg/cm}^2$ .

Gracias al desarrollo y empleo de nuevos materiales componentes para el concreto capaces de producir cambios significativos en la microestructura y comportamiento, es factible fabricar hoy en día concretos de alta resistencia; tradicionalmente se han unido los conceptos de calidad, durabilidad y alta resistencia del concreto, este tipo de concreto de alta resistencia son el resultado de una dosificación rica en cemento de alta calidad, con agregados bien seleccionados y bajas relaciones agua/material cementante; estos concretos si son fabricados adecuadamente presentan una muy baja permeabilidad, esta propiedad es de suma importancia porque tiene la capacidad de proteger las armaduras del concreto armado de las acciones agresivas del medio ambiente como se ha mencionado anteriormente.

La durabilidad es uno de los parámetros sin duda más destacables de la calidad del concreto de alta resistencia y una de las características más apreciables de este material de acuerdo con el ACI 116, esta característica a parte de hacer énfasis en la resistencia de la acción del medio ambiente, los ataques químicos, la abrasión y otras condiciones de servicio, hace referencia que debe mantenerse a lo largo de su vida útil; la durabilidad es una propiedad importante como la resistencia, aunque el concreto es un material muy durable se puede deteriorar y llegar a la falla por un sinnúmero de factores que lo pueden afectar de ahí que para el diseño de una estructura se debe conocer el medio ambiente y las características a las que va a estar expuesto, para de esta forma tomar precauciones.

Está claro que la durabilidad de un elemento de concreto depende de sus propiedades y de sus prácticas de colocación, pero también es función de las condiciones que lo rodean, las condiciones ambientales que afectan la durabilidad del concreto pueden ser de origen físico o químico como las que se describen a continuación y como se muestran en la tabla 2.2.1

**Figura 2.2.1 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN EL CONCRETO**

<b>Fuente</b>	<b>Componente más afectado en orden de importancia</b>
Ataque químico: Ataque por ácidos Ataque por sulfatos Reacción álcali-agregado Carbonatación del cemento Corrosión del acero	Pasta Pasta Agregado Pasta Refuerzo
Ataque físico: Congelamiento-deshielo Humedecimiento-secado Cambios de temperatura Abrasión Fuego	Pasta, Agregados Pasta Pasta, Agregados Pasta, Agregados Pasta

**Ataque por ácidos.-** La fuente más común por ataque de ácido al concreto se da especialmente en climas muy calientes, en las alcantarillas en las cuales en ese ambiente de aguas negras generan gas de hidrógeno sulfuroso que se disuelve en el agua y actúa en las paredes de los conductos; así mismo los ácidos inorgánicos están presentes en la atmósfera (lluvia ácida) y los orgánicos en las aguas superficiales y freáticas procedentes de las industrias. El deterioro del concreto expuesto a este tipo de ácidos provoca, cuando es muy permeable el concreto; llegar hasta el acero de refuerzo ocasionando corrosión, dando consecuencias lamentables para la estructura; por su parte la resistencia al ataque de ácidos se puede mejorar si se deja secar el concreto antes que quede expuesto ya que se forma una capa de carbonato de calcio que bloquea los poros y reduce la permeabilidad en la parte superficial; las sales de calcio se precipitan, así sea poca la cantidad de ácido que entra en contacto con la superficie del concreto, este fenómeno puede ser aprovechado para aumentar la durabilidad del concreto, las cuales tapan los poros superficiales e impiden la entrada de nuevos agentes agresivos; existen también tratamientos superficiales como pinturas bituminosas, resinas epóxicas, silicofloruro de magnesio y otros agentes que han demostrado resultados altamente satisfactorios.

**Ataque de sulfatos.-** Los sulfatos de sodio, potasio y magnesio, presentes en el suelo y agua con álcalis, son muchas veces los responsables del deterioro de las estructuras de concreto. La causa del deterioro puede tener dos orígenes, en primer lugar porque los sulfatos reaccionan químicamente con la cal y el aluminato de calcio hidratados en la pasta de cemento, formando sulfato de calcio y sulfoaluminato de calcio, dichas reacciones van acompañadas de una considerable expansión, que ocasiona esfuerzos de tracción internos y que culminan con agrietamiento y rompimiento de la masa de concreto. La segunda causa se presenta cuando el concreto está en contacto con aguas alcalinas lo cual produce la deposición de cristales de sulfato en los poros y canales capilares como consecuencia de la evaporación; el crecimiento de los cristales se da cuando se tiene un ciclo de humedecimiento y secado que pueden eventualmente llenar los poros y desarrollar presiones suficientes para la rotura del concreto.



Para evitar el deterioro del concreto por la primera causa, se recomienda el uso de un cemento con moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos o bien con alta resistencia a los sulfatos, un contenido de cemento mínimo entre  $300 \text{ kg/cm}^2$  hasta  $370 \text{ kg/cm}^2$  dependiendo del grado de ataque; por otra parte la resistencia a la desintegración por el crecimiento de cristales se logra mediante el uso de un concreto denso, de muy baja permeabilidad, una relación agua/material cementante baja en un rango máximo de 0.45 a 0.50 dependiendo del tipo de exposición ambiental y preferiblemente con inclusión de aire.

**Reacción álcali-agregado.-** Es una reacción química que se puede presentar entre agregados que contengan óxidos de sílice inestables y el cemento (hidróxidos alcalinos) y que originan expansiones dentro del concreto endurecido. Algunos agregados conocidos que reaccionan con el álcali del cemento son el sílice opalino, la caliza silicea y en general rocas con alto contenido de sílice. La reacción química de los agregados más conocida es la álcali-silica, los álcalis provienen del cemento y otros ingredientes, los minerales más importantes con sílice reactivo que pueden contener las rocas son: horsteno, opalina, calcedonia y cuarzo; entre las rocas con potencial reactivo se encuentran la toba, la pizarra silicosa, filitas y calizas; si los agregados son altamente reactivos no debe usarse en concretos expuestos al agua de mar o en otros ambientes donde los álcalis estén disponibles para entrar en el concreto en solución; de esta forma es recomendable hacer ensayos petrográficos y exámenes químicos, así como ensayos de expansión de morteros y el uso de cementos con baja reacción álcali-agregado.

**Carbonatación del cemento.-** Este fenómeno sucede cuando el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{HO})_2$ ) presente en la pasta de cemento, en presencia del agua, reacciona con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), produciendo carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generando de esta forma pérdida de volumen. Esta carbonatación se presenta en la superficie del concreto y su profundidad dependerá de la porosidad de la pasta, esta reacción conduce al descascaramiento superficial. La carbonatación producida por la reacción del  $\text{CO}_2$  presente en el aire o agua con el hidróxido de calcio originado al hidratarse el cemento, aunque mejora la resistencia a la compresión, origina contracción y disminuye el pH a valores menores de 10 propiciando corrosión.

**Corrosión del acero de refuerzo.-** En general la forma más común de corrosión es causada por el flujo de una corriente generada dentro del concreto, por la diferencia de humedades, presencia de oxígeno o concentración de electrolitos, así mismo los iones de cloruro de calcio causan corrosión del acero, produciendo expansión y aparición de esfuerzos de tracción que conllevan al agrietamiento. El concreto proporciona normalmente protección contra la corrosión del acero de refuerzo embebido debido a la alta alcalinidad de la pasta de cemento ( $\text{pH} > 12.5$ ), que da como resultado de la formación de una película de óxido de hierro que pasiva o cubre al acero y lo protege de corrosión; la película que protege al acero se despasiva y se inicia el complejo proceso de la corrosión también conocido como electroquímico de la corrosión al carbonatarse la pasta de cemento del concreto, la presencia de humedad y oxígeno que se pernean o se mueven a través del recubrimiento de concreto inician la corrosión, la existencia de grietas acelera el proceso de corrosión ya que éstas proporcionan más fácil acceso a los contaminantes, al aire y la humedad.

La protección del acero de refuerzo puede lograrse de las siguientes formas:

- Manteniendo el acero en un ambiente no corrosivo.
- Aplicando recubrimientos al acero para aislarlo del medio corrosivo.
- Utilizando inhibidores químicos; o
- Instalando una protección catódica.

En cada caso que se desee proteger de la corrosión al acero de refuerzo, el medio por utilizar esta definido por la relación costo – eficiencia – durabilidad. Una protección eficiente al acero, se logra con un proporcionamiento de concreto que produzca baja permeabilidad, utilizando bajas relaciones agua/material cementante, vigilando que el contenido de iones cloro se mantenga lo más bajo posible en la mezcla, proporcionando un buen drenaje, dando un adecuado espesor de recubrimiento, utilizando un adecuado proceso constructivo y realizando un buen curado para disminuir la permeabilidad al aumentar la hidratación del cemento. Han sido utilizados diversas formas y sistemas de protección para las estructuras dañadas por alta carbonatación o expuestas al ambiente marino con alta concentración de iones cloro, entre las cuales se puede mencionar las cubiertas de concreto muy denso de bajo revenimiento, cubiertas de concreto modificado con látex de estireno-butadieno y membranas impermeabilizantes durables.

**Ataque por congelamiento-deshielo.-** Al disminuir la temperatura de un concreto saturado, el agua que se encuentra dentro de los poros aumenta de volumen por congelación produciendo expansión y fisuras en el elemento; esta condición se vuelve crítica cuando los ciclos de descongelamiento-deshielo se hacen repetitivos, porque su efecto es acumulativo.

Y considerando que al congelarse el agua disminuyen las posibilidades para las reacciones químicas, el fraguado y el endurecimiento del concreto se retrasa, quedando de esta forma poca pasta de cemento que pueda ser alterada por la formación de hielo; cuando en su etapa posterior tiene lugar el deshielo, el concreto fraguará y endurecerá en su estado expandido, que contiene un gran volumen de poros y como consecuencia tendrá una baja resistencia. En tal caso el concreto puede vibrarse y recompactarse cuando se deshuela pero este procedimiento no es recomendable, ya que resulta difícil saber con exactitud cuándo ha empezado a fraguar el concreto. Para la prevención del congelamiento del concreto fresco y su protección durante la hidratación inicial, se debe asegurar de que la temperatura del colado sea lo bastante elevada para evitar el congelamiento del agua de la mezcla y que el concreto esté térmicamente protegido durante el tiempo suficiente para desarrollar una resistencia adecuada, o bien usar un cemento de endurecimiento rápido o algún aditivo acelerador para la mezcla de preferencia con una mezcla rica que tenga una relación agua/material cementante baja; otra alternativa después del colado, se logra una adecuada temperatura del concreto aislándolo de la atmósfera y, de ser necesario, mediante la construcción de un cercado alrededor de la estructura, con una fuente de calor dentro del mismo; debe llevarse a cabo un caldeo tal, que impida que el concreto se seque rápidamente, que ninguna parte del

mismo se caliente en exceso y que no resulte una elevada concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera que ocasionará carbonatación.

**Humedecimiento y secado.-** En estructuras hidráulicas una de las principales causas del deterioro es el continuo humedecimiento y secado, el cual también produce expansiones y contracciones creando condiciones de agrietamiento y descascamiento del concreto, al igual que puede aumentar la corrosión del acero de refuerzo. Cuando un elemento de concreto está expuesto a ciclos de humedecimiento-secado se presentan eflorescencias en la superficie del concreto, que son resultado de la filtración de agua a través del material de manera continua o intermitente. La eflorescencia es más un problema estético que de durabilidad, pero indica que está ocurriendo lixiviación dentro del concreto; la lixiviación produce una apariencia arenosa en las superficies expuestas de concreto de los revestimientos de canales, alcantarillas o tuberías como ejemplos.

Si el agua pasa a través de grietas o juntas, la lixiviación también puede erosionar el concreto interior, su exceso aumenta la porosidad, disminuye la resistencia e incrementa la vulnerabilidad a los químicos agresivos; las aguas blandas tales como el agua de lluvia, son las más agresivas, mientras que las aguas duras que contienen grandes cantidades de calcio son menos peligrosas, por su parte la temperatura del agua también se debe considerar porque el hidróxido de calcio es más soluble en agua fría que en agua caliente.

**La abrasión.-** La abrasión se ocasiona por fluidos en movimiento que están en contacto con estructuras de concreto, creando fricción y produciendo desgaste sobre la superficie de éste. En la medida en que la resistencia a la compresión aumenta, se incrementa su resistencia a la abrasión, esta propiedad es importante en elementos sometidos a tráfico, deslizamiento y rozamiento como son los pavimentos, pisos, túneles y estribos de puentes y también los sujetos a la acción del agua como los vertederos.

**Fuego.-** En términos generales el concreto tiene una buena durabilidad y resistencia contra el fuego siendo éste uno de los méritos como material estructural; la resistencia contra el fuego es cada vez menor a medida que aumenta el espesor de la estructura. En el concreto armado sujeto al fuego las capas superficiales calientes tienden a separarse y descascarse desde la parte de la estructura más fría, en consecuencia se producen grietas en las paredes del concreto mal compactadas o en los planos de las varillas de refuerzo, sin embargo la pérdida de resistencia comienza aproximadamente en los  $330\text{ }^\circ\text{C}$  y aún en los  $500\text{ }^\circ\text{C}$  se considera que el concreto conserva el 80% de su resistencia inicial.

La resistencia al ataque del fuego depende de tres factores principales que se pueden mencionar, el tipo de agregados y contenido de humedad, el tipo de cemento y el espesor del elemento de concreto; los agregados de mejor resistencia al fuego son los livianos, esto se debe a que el agregado ligero es manufacturado por un proceso que involucra altas temperaturas se destacan los agregados naturales tales como los calcáreos, tal es el caso de la caliza. El contenido de humedad del concreto también influye en la velocidad de descascamiento, esto es que a mayor contenido de humedad del elemento se produce más rápido este fenómeno; también es posible la elaboración de concretos refractarios, esto se logra con el uso de un cemento especial con un alto contenido de alúmina, el cual produce concretos con una alta resistencia al fuego pero con el problema de que no puede utilizarse para fines estructurales.

Un concreto sujeto a cualquiera de las exposiciones mencionadas anteriormente, se ve afectado por la remoción del mortero, por lo tanto, una reducción en el contenido de arena aumenta y mejora su durabilidad; el uso de agregados resistentes y de tamaño bastante grande, el uso de un adecuado recubrimiento, un buen curado y baja relación agua/material cementante, permiten obtener concretos con una muy buena durabilidad y de gran desempeño cuando son atacados por agentes agresivos; estos factores conducen a un incremento de la resistencia a la compresión, pero cuando las condiciones exigen el empleo de un inclusor de aire, ésta importante propiedad se puede disminuir, por ese motivo el contenido de aire se debe guardar en un mínimo requerido para la durabilidad.

### 2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

En general las propiedades mecánicas del concreto están gobernadas por la resistencia de la pasta endurecida, es por eso que la resistencia del concreto es considerada como la característica más importante entre muchas otras como lo son la durabilidad, impermeabilidad por mencionar algunas; sin embargo la resistencia proporciona un panorama de la calidad del concreto ya que está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento. La resistencia es la habilidad para resistir esfuerzos; el concreto presenta una alta resistencia a los esfuerzos en compresión y muy poca a la flexión, la resistencia a la compresión simple es a la que se le da mayor importancia. Por su naturaleza el concreto es una masa endurecida y heterogénea cuya resistencia depende de la resistencia de la pasta endurecida, la resistencia propia de las partículas de los agregados, y de la adherencia entre la pasta y los agregados. En cuanto a la resistencia de la pasta hidratada, se conoce que el cemento al contacto con el agua forma una masa semi-cristalina llamada *gel* que adquiere su resistencia con el transcurso del tiempo; en lo que se refiere a la resistencia de los agregados, ésta es función de sus propiedades las cuales están bien definidas y son independientes del tiempo; generalmente los agregados son más resistentes que la pasta, excepto en los agregados ligeros o concretos de alta resistencia. Por su parte la adherencia de la pasta con los agregados, se debe que durante el proceso de fraguado y endurecimiento se genera una superficie de cohesión producida por la trabazón o unión entre los agregados y la pasta; la zona de contacto llamada *interfase* “agregado-matriz”, es la fase más importante del concreto que establece el enlace entre ambos.

Entre los factores que inciden en la resistencia del concreto se encuentran la relación agua-cemento, contenido y tipo de cemento, los agregados, la inclusión de algún aditivo, el fraguado, el curado y la edad del concreto. La proporción agua/material cementante es la que tiene mayor influencia en la resistencia del concreto; cuanto mayor sea esta proporción, menor será la resistencia, por lo tanto la resistencia puede aumentarse disminuyendo el valor de la relación agua/material cementante y a su vez utilizando agregados para mayor resistencia, graduando los agregados para reducir menor porcentaje de huecos en el concreto, curando el concreto en húmedo después que ha fraguado, vibrando el concreto en la cimbra y succionando el exceso de agua con una bomba de vacío. La resistencia a corto tiempo o rápida puede aumentarse con un cemento de alta resistencia rápida y la ayuda de aditivos aceleradores como el cloruro de calcio, los aditivos para aumento de la resistencia, por lo general, producen su función porque reducen los requisitos de agua para la trabajabilidad deseada y también con el aumento de la temperatura del curado, sin afectar las resistencias a largo plazo.



### 2.3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En términos generales, la gran mayoría de estructuras de concreto son diseñadas bajo la suposición de que éste resista únicamente esfuerzos a compresión, por consiguiente la resistencia a compresión es el criterio de calidad; dentro de las definiciones de la Norma Mexicana NMX-C-155, se define a la resistencia a la compresión como la capacidad de carga por unidad de área del concreto hidráulico, medida en ensayos de especímenes elaborados, curados y probados en las condiciones estándar especificadas, generalmente expresada en  $\text{kg/cm}^2$  (MPa); donde el concreto debe alcanzar la resistencia especificada a la compresión ( $f'c$ ) a la edad de 28 días u otra edad convenida, esta resistencia debe ser igual o mayor a 20 MPa (200  $\text{kg/cm}^2$ ), a menos que de común acuerdo el productor y el usuario establezcan otra. Por su parte, La Norma Mexicana NMX-C-403; define a la resistencia especificada (característica) a la compresión ( $f'c$ ), como la resistencia a la compresión determinada en proyecto hasta la rotura del espécimen, para una edad convenida y cuya probabilidad de que no sea alcanzada es del 10%, establecida con un nivel de confianza del 99%. Es admisible que el concreto cumpla con la resistencia especificada  $f'c$ , si los promedios de resistencia de todos los conjuntos de tres muestras consecutivas pertenecientes o no al mismo día de colado no son menores que  $f'c$ .

La resistencia a compresión se mide en una máquina de prueba; puede ser de tipo a compresión o universal (figura 2.3), con capacidad suficiente y que pueda funcionar a la velocidad de la aplicación de la carga, sin producir impactos ni pérdida de carga (NMX-C-083); de esta forma la carga se aplica en la superficie superior del cilindro a una velocidad especificada mientras ocurre la falla, la operación dura entre dos y tres minutos quedando registrada la carga aplicada en el tablero anexo de la máquina; este valor obtenido se divide por el área de la sección transversal del cilindro obteniéndose de esta manera el esfuerzo de rotura del concreto, la expresión que se ocupa para determinar esta resistencia es la siguiente:

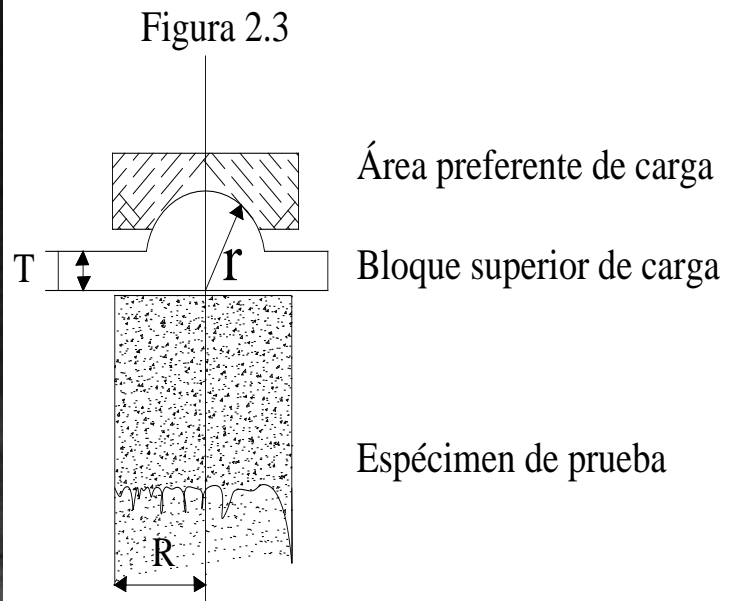
Donde:

$f'c$  : Es la resistencia a compresión

$P_{\text{máxima}}$ : Es la carga máxima soportada

$\text{Área}$ : Es el área donde se ejerce la carga

$$f'c = \frac{P_{\text{máxima}}}{\text{Área}}$$



Donde T no debe ser menor que la diferencia R-r, se deben tener los dispositivos necesarios para sostener el bloque superior en el soporte.

La resistencia se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados ( $\text{kg/cm}^2$ ), megapascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas ( $\text{lb/pulg}^2$  o psi) a una edad de 28 días, se pueden usar otras edades para las pruebas, pero es importante saber la relación entre la resistencia a los 28 días y en otras edades; la resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días.

La medida de la resistencia a compresión del concreto también se puede medir en ensayos con muestras cúbicas o prismáticas, la influencia de la forma y las dimensiones de los especímenes en los resultados de los ensayos a compresión es muy relativa; los resultados de las muestras cúbicas tienen el inconveniente que están afectados por el rozamiento de los platos de la máquina, por otro lado el resultado sobre prismas o cilindros tienen la ventaja que la zona central no está prácticamente afectada por la fricción ejercida de los platos, a lo que se puede concluir que si se elaboran diferentes probetas con diferentes geometrías (cilíndricas, cúbicas, prismáticas, etc.), con la misma mezcla y se someten a un ensayo de compresión, los resultados serán diferentes. Los ensayos en mortero se hacen en cubos de 50 mm (2 pulg.), mientras que los ensayos de concreto se realizan en cilindros de 150 mm (6 pulg.) de diámetro y 300 mm (12 pulg.) de altura, cilindros menores de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg.) también se pueden usar para concreto.

Durante un ensayo de compresión existen algunas variables para tener en cuenta a la hora de tomar decisiones:

- Cuando no hay un curado húmedo a edades tempranas, la resistencia a edades posteriores es baja y el desarrollo de la misma es muy lenta, además no es posible obtener mayor resistencia aplicando un curado a destiempo.
- Si los cilindros curados en campo son expuestos a altas temperaturas durante las primeras 24 horas, cerca del 10% de la resistencia a los 28 días está literalmente perdida y no puede ser recuperada después mediante ningún proceso de curado.
- La aplicación de la carga a velocidades altas produce resultados de resistencias a compresión mayores a los obtenidos sobre las mismas muestras cuando la velocidad de carga es lenta.
- La resistencia a compresión aumenta si se permite el secado de los especímenes; la inmersión en agua de los especímenes secos la reduce nuevamente a un valor similar al obtenido tras el curado continuamente húmedo.
- Además de las variables propias de las determinaciones experimentales, los resultados de los ensayos de resistencia a compresión son afectados por: la forma, dimensiones, superficies de los especímenes, velocidad de carga y tipo de máquina de ensayo.

Además de estas variables existen factores que pueden influenciar en la variabilidad de los resultados de las pruebas, incluyendo los materiales individuales, la planta, los contratistas, la supervisión y las condiciones ambientales; todos los factores que afecten de alguna forma la variabilidad de la resistencia deben ser tomados en cuenta al momento de seleccionar la proporción de la mezcla.

La resistencia mecánica del concreto en su estado endurecido es tradicionalmente la propiedad más identificada con su comportamiento como material dentro de la construcción, lo cual se considera atribuible a las siguientes razones:

- En la mayoría de los casos, la resistencia mecánica tiene influencia directa en la capacidad de carga de la estructura.
- Es la propiedad que puede ser más fácil de determinar en el concreto endurecido.
- Los resultados de su determinación pueden ser utilizados como apoyo o como datos índice de otras propiedades del concreto.

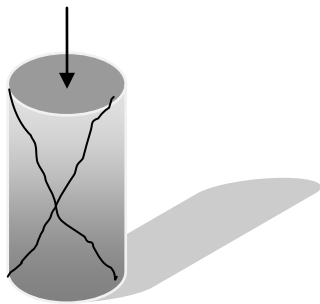
A su vez; normalmente, el concreto se considera aceptable si se cumple (NMX-C-403.):

- El promedio de todos los lotes de los resultados de tres pruebas consecutivas deberá exceder o ser igual a la  $f'_c$  especificada.
- Ninguna prueba individual (el promedio de dos cilindros) deberá caer por debajo a  $f'_c - 35\text{kg/cm}^2$ . (Ver apartado de Tablas y Gráficas; tabla 6 y gráfica 3 Calidad de resistencia).

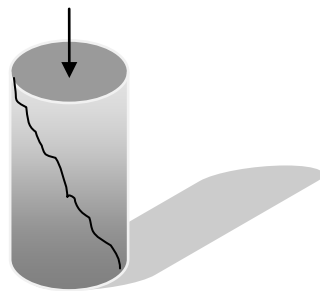
Conforme se ha venido mencionando a lo largo de este capítulo, existen factores que inciden en la resistencia; en general el más importante en la resistencia de un concreto totalmente ya compactado es la relación agua/material cementante. Sin embargo para una mezcla trabajable, bien dosificada y en condiciones normales de mezclado, curado y métodos de ensayo; intervienen otros elementos como el tipo y calidad de cemento, las características de los agregados, el tipo y cantidad de aditivos, el fraguado y la edad, que serán descritos más adelante en el apartado 2.4 de este mismo capítulo.

De lo mencionado anteriormente, la resistencia mecánica del concreto como un todo, es influida por las resistencias individuales de los agregados y la pasta de cemento y por la adherencia entre ambos componentes, y a fin de cuentas la resistencia del conjunto es dictada por la que resulta más débil de las tres. En los concretos de baja resistencia (menores de  $200 \text{ kg/cm}^2$  aproximadamente) a la edad de servicio (más de 28 días) es frecuente que la resistencia propia de la pasta sea el factor predominante, mientras que en los niveles altos (más de  $500 \text{ kg/cm}^2$ ) tiende a predominar la adherencia pasta-agregado como factor determinante de la resistencia del concreto. En niveles intermedios, que son los más usuales en las estructuras que se pueden llamar ordinarias, la resistencia del concreto puede ser limitada indistintamente por la resistencia de la pasta, la adherencia pasta-agregado o una combinación de ambas, dependiendo significativamente de las características de forma, textura superficial y tamaño máximo de los agregados.

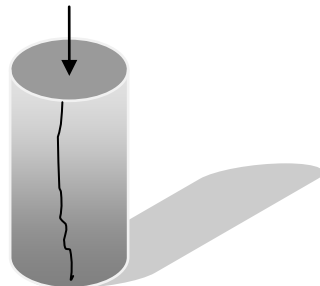
A continuación se muestra en la figura 2.3.1 el diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión.



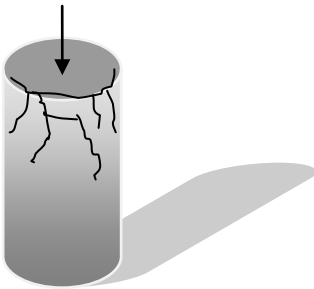
1.- Se observa cuando se logra una carga de compresión bien aplicada sobre un espécimen de prueba bien preparado. Es la falla deseable en compresión.



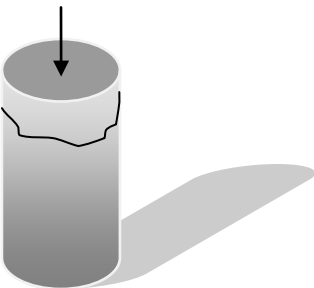
2.- Se observa comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en límite de tolerancia especificada o excediendo esta.



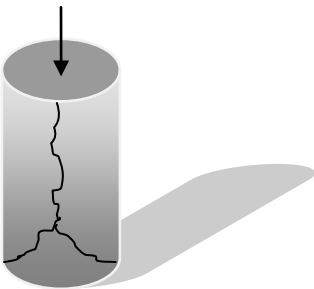
3.- Se observa en especímenes que presentan una superficie de carga convexa y/o deficiencia de material de cabeceo; también por concavidad del plato de cabeceo o convexidad en una de las placas de carga.



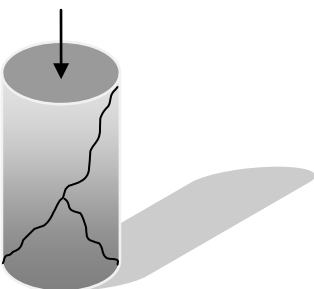
4.- Se observa en especímenes que presentan una cara de aplicación cóncava y/o por deficiencias en el material de cabeceo o también por concavidad en una de las placas de carga.



5.- Se observa cuando se producen concentraciones de esfuerzos en puntos sobresalientes de las caras de aplicación de carga, por deficiencias en el material de cabeceo, rugosidades en el plato cabeceador o placas de carga.



6.- Se observa en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga convexa y/o por deficiencias en el material de cabeceo; rugosidades en el plato cabeceador o placas de carga.



7.- Se observa cuando las caras de aplicación de carga del espécimen se desvían ligeramente de las tolerancias de paralelismo establecidas o por ligeras desviaciones en el centro del espécimen para la aplicación de carga.

### 2.3.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Esta propiedad es una medida de la resistencia a la tracción de concreto, en esta prueba el esfuerzo a la tensión máxima teórica alcanzada en la fibra del fondo de una viga de prueba se conoce como módulo de ruptura; es una medida de resistencia a la falla, el cual es útil en diseño de pavimentos flexibles, losas (pisos, placas) y pistas de aterrizajes por mencionar algunos ejemplos. Este valor comúnmente se evalúa mediante ensayos de flexión sobre vigas de sección cuadrada de 15 cm de lado y 50 cm de longitud como mínimo; el valor del módulo de ruptura depende de las dimensiones de la viga y sobre todo de la disposición de la carga; hasta hoy la carga simétrica en dos puntos ( a los tercios del claro) se usa; esto produce un momento de flexión constante entre los puntos de carga de modo que un tercio del claro está sujeto al esfuerzo máximo y por lo tanto, es ahí donde es muy probable que se produzca el agrietamiento.

La resistencia a la flexión se expresa como se ha mencionado, como el Módulo de Ruptura (MR) en  $\text{kg/cm}^2$  o MPa y se determina mediante el ensaye establecido por la Norma Mexicana NMX-C-191, que indica que la viga será cargada a los tercios del claro o la Norma Mexicana NMX-C-303 que indica que la viga debe ser cargada en el punto medio, como se muestra en la figura 2.3.1.

Con el objeto de asegurar una condición uniforme de humedad, las vigas deben sumergirse 20 horas antes del ensayo en agua saturada con cal a una temperatura de 23 °C; la resistencia a la flexión o módulo de ruptura se calcula mediante la siguiente expresión siempre y cuando la falla ocurra dentro del tercio medio de la longitud libre de la viga:

Donde:

**MR** = Módulo de Ruptura  
**P** = Carga de ruptura aplicada  
**L** = Longitud entre apoyos extremos  
**b** = Ancho de la viga  
**d** = Peralte de la viga

$$\text{MR} = \frac{P L}{b d^2}$$

Por otra parte si la falla ocurre fuera del tercio medio de la viga, pero no está separada de él por más de una longitud equivalente al 5% de la longitud libre, la resistencia a la flexión o módulo de ruptura se debe calcular por medio de la siguiente expresión:

Donde:

**MR** = Módulo de Ruptura  
**P** = Carga de ruptura aplicada  
**b** = Ancho de la viga  
**d** = Peralte de la viga  
**a** = Distancia entre la línea de ruptura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara interior de la viga

$$\text{MR} = \frac{3 P a}{b d^2}$$

Por el contrario si la distancia es mayor que el 5% entre esa distancia, se descarta el resultado y se debe repetir el ensayo.

En algunas ocasiones, la carga  $P$  se aplica en el punto medio de la longitud de la viga y en tales casos la resistencia a la flexión o módulo de ruptura se calcula con la siguiente expresión:

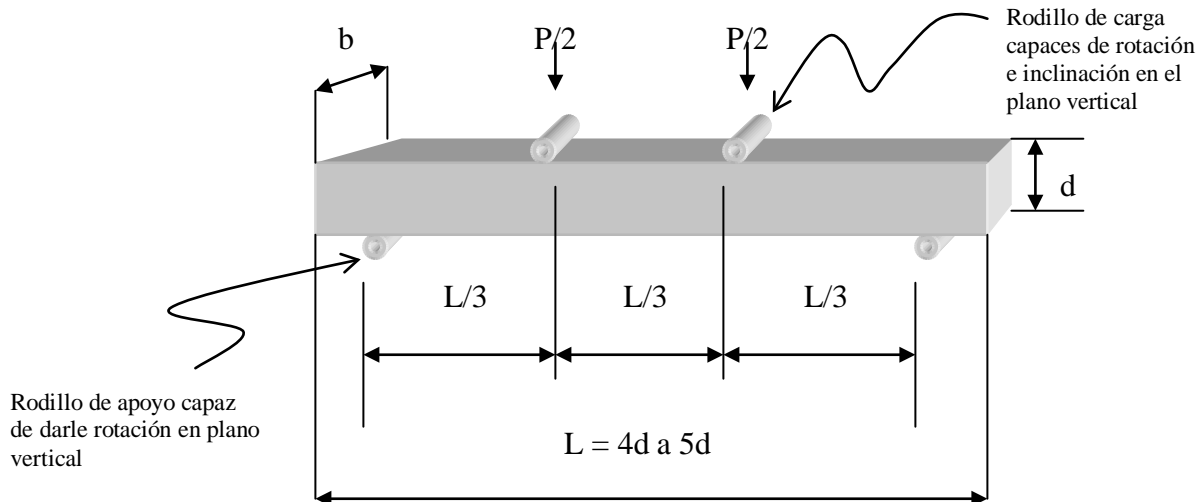
Donde:

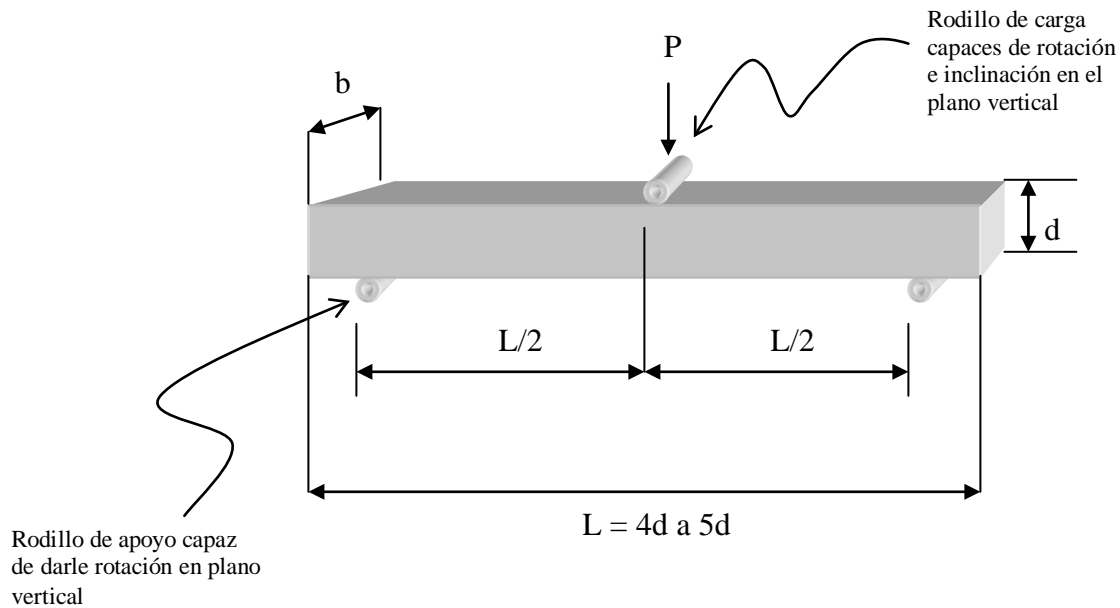
$MR$  = Módulo de Ruptura  
 $L$  = Longitud del claro  
 $P$  = Carga de ruptura aplicada  
 $b$  = Ancho de la viga  
 $d$  = Peralte de la viga

$$MR = \frac{3 P L}{2 b d^2}$$

Generalmente, el módulo de ruptura se encuentra en el 10% y 23% de la resistencia a compresión, como se mencionó anteriormente, depende de las dimensiones; el módulo de ruptura determinado por la viga cargada en los puntos tercios, es más bajo que el módulo de ruptura determinado por la viga cargada en el punto medio; en ocasiones tanto como en un 15%.

Figura 2.3.1 Dispositivo para la prueba del módulo de ruptura Normas Mexicanas NMX-C-191 y NMX-C-303





Cuando se carga una viga, el comportamiento de ésta es elástico y toda la sección contribuye a resistir el momento exterior; cuando la tensión en la fibra más esforzada de alguna sección excede la resistencia del concreto a la tensión, empiezan a aparecer grietas y a medida que se aumenta la carga estas grietas aumentan en número, en longitud y abertura. A partir de las primeras grietas, el comportamiento del espécimen ya no es elástico y las deflexiones ya no son proporcionales a las cargas; en las regiones agrietadas, si el espécimen se encuentra reforzado con acero, el acero toma prácticamente toda la tensión; en esta etapa el esfuerzo del acero aumenta hasta que alcanza su valor de fluencia.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la resistencia del concreto se debe a la adhesión entre la pasta de cemento y el agregado; a su vez, se ha establecido que dentro de las interfases del concreto tienen, antes de aplicarles carga alguna, fisuras finas. Estas microfisuras comienzan a extenderse a esfuerzos de compresión reducidos (del orden del 30% de la resistencia máxima en compresión) y atraviesan la matriz del concreto cuando el esfuerzo de compresión alcanza alrededor del 80% máximo. Esta situación es tan crítica que si se mantiene una carga con una intensidad cercana a este último valor, eventualmente ocurrirá la fractura espontánea del concreto.

El desarrollo de la fisuración puede ser explicado con base en principios de transformación de energía; en esencia estos principios sostienen que si una grieta ha de propagarse en un elemento sujeto a tensión el trabajo de fractura tendrá que ser pagado con energía; esta energía tendrá que provenir, si la carga exterior no aumenta, de la relajación de la energía de deformación diferida; la cual nutre de este modo el aumento de fisuración. Es por esto fácil de predecir que la falla en tensión del concreto ocurrirá principalmente en las fases fisuradas como resultado del incremento de la fisuración original; en efecto, en la práctica, la superficie de falla coincide en su mayor parte en la interfase matriz/agregado grueso.



Por lo mismo el mecanismo de la falla al cargar en compresión un elemento con bordes libres (sin restricciones de la máquina de ensaye o de acero de refuerzo, por ejemplo) es una agrietamiento en la dirección de la aplicación de la carga, ya que en cualquier otra dirección existirán componentes del esfuerzo de compresión de dicha carga; en otras palabras, la falla de compresión mencionada en el apartado anterior 2.3.1; es una falla de tensión indirecta.

Cabe mencionar que se utiliza muy poco el ensayo a flexión para el concreto estructural, sin embargo para los diseñadores de pavimentos si es requerido; también es necesario conocer que existen ciertos factores que pueden alterar los resultados de estos ensayos en el laboratorio como pueden ser un secado prematuro, puede ocasionar una baja resistencia, además este tipo de ensayos son muy sensibles a la preparación, manipulación y el procedimiento del curado; las vigas muy pesadas pueden ser dañadas mientras se manipulan y transportan del lugar de trabajo hasta el laboratorio; el cumplimiento de los factores anteriormente mencionados es un trabajo extremadamente difícil, lo que da como consecuencia valores en el Módulo de Ruptura del concreto no confiables y generalmente muy bajos.

La industria del concreto y las agencias de inspección y ensayos están mucho más familiarizados con los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas para el control y la aceptación del concreto; la flexión puede ser utilizada para efectos de diseño, pero la resistencia a compresión correspondiente debe ser utilizada para ordenar y aceptar el concreto; en el momento en que se realicen las mezclas de prueba se deben llevar a cabo ambos ensayos a flexión y compresión para que pueda ser desarrollada una correlación para el control de campo.

## 2.4 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA

Dentro del desarrollo de éste tema, donde se habla de las características del concreto; se han mencionado los factores más importantes que influyen dentro de la elaboración, los requisitos de diseño y el cumplimiento de los objetivos del concreto, para que de esta forma sea un concreto; como bien lo dice su nombre, de alta resistencia. En realidad, en sí todo el desarrollo para la elaboración de un concreto sea o no de alta resistencia, requiere de un buen control en cada etapa de su elaboración, de su manejo, en su diseño, en la colocación, transporte y desde luego en la calidad de todos sus componentes.

De forma general y a manera de lista; de todo lo mencionado anteriormente, se hará mención de estos factores que influyen dentro de la resistencia, específicamente del concreto de alta resistencia.

- **Relación Agua/Material Cementante:** Para mezclas trabajables, de materiales determinados y sujetos a condiciones de prueba dadas, la resistencia del concreto mantiene una dependencia fija con la relación agua/material cementante. La relación agua/material cementante es el punto preciso para la resistencia; este factor tiene gran influencia en todas las propiedades del concreto; la relación agua/material cementante se describe como la cantidad de agua en masa, sin incluir el agua absorbida por los agregados, sobre la cantidad de cemento en masa. Se entiende que al referirse al material cementante, además del tipo y contenido de cemento; si el diseño de la mezcla lo específica, está también incluido alguna adición mineral tales como la microsílica y la escoria de alto horno.

Para producir concretos de alta resistencia la relación agua/material cementante debe estar en el rango de 0.20 a 0.50, relaciones más altas influyen de manera inapropiada para este tipo de concretos. La resistencia está estrechamente relacionada con la relación agua/cemento, de tal forma que entre mayor sea el contenido de agua de mezclado, mayor será la influencia en el contenido de cemento y por consiguiente; al disiparse el agua de la pasta, será más porosa y la resistencia del concreto disminuirá. Ésta propiedad fue demostrada por Duff Abrams en el año de 1918, señalando que para un concreto perfectamente compactado, empleando materiales con las mismas características y condiciones de ensayo, la resistencia a una compresión dada es inversamente proporcional a la relación agua/material cementante.

- **Contenido y Tipo de Cemento:** El contenido y tipo de cemento tiene gran influencia en la resistencia que finalmente obtendrá el concreto, debido a que el cemento es un material químicamente “activo” en la mezcla. Lo más importante en lo que respecta al cemento es su contenido dentro del concreto, porque en la medida que se aumenta se consiguen mayores resistencias; en esta afirmación se debe tener precaución porque es válida hasta un cierto límite, ya que valores mayores del contenido de cemento requerido puede provocar una mala hidratación, lo que generaría que este material pasará a ser un material inerte de relleno en el concreto, además de disminuir su resistencia. El contenido de cemento está ligado estrechamente a la cantidad de agua requerida, además de las características del tipo de agregado; pueden afectar la resistencia y tener efectos en el comportamiento inducidos por la contracción, provocando agrietamiento en la pasta o una pérdida de adherencia entre el cemento y el agregado. Valores en el contenido de cemento para concretos de alta resistencia son comunes entre  $380 \text{ kg/cm}^3$  y  $560 \text{ kg/cm}^3$ . La selección del tipo de cemento depende de la aplicación del tipo de estructura y bajo que condiciones se encontrará; existen una amplia gama de tipos de cemento, pero esta selección debe ser cuidadosa referente a las propiedades físicas y químicas del cemento y a la reacción que se tenga junto con los demás agregados del concreto e incluso debe existir una compatibilidad con el aditivo, en dado caso que se requiera el uso de alguno de ellos; todo esto para el mejor desempeño de la estructura o elemento y para que cumpla con los requisitos para la que fue diseñada. El desarrollo de la resistencia a compresión de los concretos elaborados con diferente tipo de cemento, depende de la velocidad con que el cemento utilizado adquiere esta propiedad. La variación de la marca, así se trate del mismo tipo, puede producir efectos sobre la resistencia y, por lo tanto, no debe de ser intercambiada sin antes hacer un riguroso análisis de los cambios que se producirán en la resistencia.
- **Características de los Agregados:** De manera general se puede decir que para una misma relación agua/cemento, las partículas del agregado con textura rugosa o forma angular forman concretos más resistentes que otras redondeadas o lisas, debido a que hay una mayor adherencia entre los granos gruesos y la pasta, por otra parte con igual contenido de cemento; los primeros exigen mayor cantidad de agua para lograr una determinada manejabilidad, lo cual puede generar algunas variaciones en su resistencia, de ahí la importancia de su forma y su textura. Para concretos de alta resistencia se recomienda utilizar agregados gruesos de peso normal, duros, libres de fisuras o de superficies planas, ya que tendrá una gran influencia en la resistencia y las propiedades de la estructura; además de que representa tres cuartas partes del volumen del concreto, sin dejar pasar por alto el tamaño del agregado grueso, cuyo tamaño máximo nominal se

encuentra entre valores de 25 mm ó 20 mm, para producir concretos con resistencias hasta 635 kg/cm<sup>2</sup>; y de 12 ó 9.5 mm por encima de 635 kg/cm<sup>2</sup>. Una masa de agregados cuya granulometría sea continua, permite elaborar mezclas de alta compacidad, mucho más densas y por lo tanto se consiguen mayores resistencias. Por su parte, la rigidez misma de los agregados es un factor que también influye en la resistencia del concreto, a su vez la influencia del tamaño máximo del agregado, que en general la diferencia en tamaño máximo de un mismo tipo de agregado bien gradado, tiene dos efectos opuestos en la resistencia a la compresión del concreto. En primer lugar para una consistencia dada y para igual contenido de cemento, el uso de tamaños máximos mayores requieren menos agua de mezclado que los agregados de tamaño máximo menores. Por otro lado, mezclas con la misma consistencia e igual relación agua/material cementante, presentan resistencias más bajas cuando se utilizan agregados de tamaño máximo mayor. En particular, se ha estudiado que para concretos de alta resistencia, mientras mayor sea la resistencia requerida, menor deberá ser el tamaño máximo; a su vez, para concretos de “baja resistencia” por decirlo de alguna forma, mientras mayor sea el tamaño máximo, mayor será la eficiencia. Respecto al agregado fino, éste tiene la función principal de darle a la mezcla de concreto trabajabilidad, debe cumplir con un módulo de finura entre 2.30 y 3.10, además de cumplir una granulometría especificada; una mala graduación o tamaño máximo del agregado influye en la proporción relativa de los agregados, mayor demanda de agua y cemento, en la trabajabilidad, en economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto y por consiguiente en su resistencia, además de que influyen de manera considerable en la uniformidad de la mezcla del concreto.

- **Tipo y dosificación de aditivos:** Existen diversas sustancias que son distintas a los agregados, el agua y el cemento; que es posible su adición antes o durante el mezclado y que al ser incorporadas a los componentes de la mezcla del concreto, tienen la función de mejorar las propiedades del concreto tales como la durabilidad, trabajabilidad y resistencia; a éstas sustancias se le denominan aditivos. Anteriormente se ha mencionado los efectos que tienen los aditivos en las mezclas de concreto, la selección del aditivo, debe estar basada en los requerimientos de la mezcla de concreto, como por ejemplo algunos aditivos producen diversos efectos sobre la resistencia, como es el caso de los acelerantes; que originan altas resistencias iniciales, pero que demoran el desarrollo de la resistencia a edades posteriores; los aditivos minerales contribuyen a la adquisición de la resistencia, sin embargo, la velocidad con que se adquiere esta característica varía con frecuencia respecto a la de un concreto sin aditivo. La adquisición de resistencias tempranas puede ser menor, debido a la baja velocidad de hidratación que tienen algunos de éstos aditivos, especialmente si las temperaturas de curado son bajas.
- **Fraguado del Concreto:** La pasta que se forma cuando el cemento es mezclado con agua permanece plástica durante un corto periodo de tiempo; en esta etapa aún es posible alterar el material y remezclarlo sin dañarlo ( la revibración es realmente benéfica), pero a medida que las reacciones entre el cemento y el agua continúan, la masa pierde su plasticidad; este periodo inicial de su endurecimiento se le llama periodo de fraguado; cuando cesa la respuesta al re trabajado o a la revibración posterior, comienza el endurecimiento y empieza a desarrollar su resistencia; este es otro de los factores que afectan la resistencia del concreto, es el tiempo y la temperatura durante el proceso de fraguado; en climas fríos, como ya se mencionó, el proceso de hidratación es más lento, debido a que el medio ambiente le restringe parte del calor de hidratación con el subsiguiente

retardo del tiempo de fraguado, lo que provoca que la adquisición de la resistencia sea más tarde. Por el contrario cuando la temperatura es más elevada, se aumenta la resistencia a muy temprana edad, pero se disminuye aproximadamente después de los siete días; éste fenómeno tiene una razón; ocurre porque una rápida hidratación inicial de los granos del cemento es superficial y parece formar una pasta con una estructura física más pobre y posiblemente más porosa. Debe considerarse que también es posible encontrarse con el término de fraguado falso o endurecimiento prematuro, es un endurecimiento inicial de la pasta o del concreto que se presenta entre uno y cinco minutos después del mezclado; este fraguado se puede eliminar por un continuo mezclado o por un remezclado y puede pasar inadvertido en obras donde se surte el concreto por medio de camiones mezcladores o cuando el concreto es mezclado en una planta central y agitado camino a la obra. Si hay evidencia de fraguado errático o rigidez rápida temprana, demanda de mayor cantidad de agua, incremento de agrietamiento, bajas resistencias, debe verificarse si el cemento presenta tendencia al fraguado falso. Una causa común del fraguado falso es la deshidratación del yeso, que resulta si la temperatura se eleva demasiado durante la molienda; posteriormente, al agregarse agua al cemento, el yeso deshidratado comienza a endurecerse inmediatamente, causando un endurecimiento temprano.

- **Edad del concreto:** Inmediatamente después que se presenta el fraguado del concreto, comienza el proceso de adquisición de la resistencia con el transcurso del tiempo. Para concretos convencionales se especifica que puede alcanzar la resistencia de diseño a los 28 días. La explicación es que después de este tiempo el aumento de la resistencia es muy poco. Sin embargo para concretos de alta resistencia se especifica a los 56 ó 90 días, porque el aumento después de los 28 días es considerable. Cabe decir que la elección de la edad a los 28 días no tiene importancia científica, es simplemente que los primeros cementos ganaban resistencia lentamente y fue necesario basar la descripción de resistencia en el concreto en el cual ya había ocurrido una importante hidratación del cemento. La elección específica de un múltiplo de semanas se hizo, con toda probabilidad, para que las pruebas, así como la colocación, cayeran en un día laboral. En los cementos portland modernos, la rapidez de hidratación es mucho mayor que en el pasado, tanto porque tienen una finura mucho mayor. Es discutible que un período menor a los 28 días pudiera emplearse para la caracterización de la resistencia, pero parece que la edad de 28 días ha adquirido una posición inmutable; por lo tanto, el cumplimiento de la especificación está invariablemente establecido en función de la resistencia a 28 días.

El conocimiento de la relación resistencia/tiempo, es importante cuando se va a poner en uso una estructura, es decir, sujeta a carga total, en edad posterior, en dicho caso, puede tomarse en cuenta, para el diseño, la ganancia en la resistencia después de 28 días. En algunas otras situaciones, por ejemplo, en concreto prefabricado o en concreto presforzado o cuando se requiera temprana remoción de la cimbra, es necesario conocer la resistencia a edad temprana. Es importante decir, que la resistencia física, es la propiedad más importante del concreto, porque influye en forma directa en las demás características de significado práctico. En general, los más resistentes son más densos, menos permeables y más resistentes al intemperismo y a ciertos agentes destructivos. De otra forma, los concretos resistentes usualmente exhiben mayor contracción por fraguado y menor extensibilidad, por lo tanto son más propensos al agrietamiento.



#### 2.4.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA

Un factor importante dentro de las propiedades internas del concreto es la temperatura; como se conoce la reacción entre un tipo de cemento y el agua para concreto, provocan una generación de calor que tienen influencia en el fraguado, curado, agrietamiento, cambios de volumen que a su vez éstas influyen en otras propiedades más, si este calor no se disipa con la misma rapidez con la que es generado, queda un remanente que al ser acumulado incrementa la temperatura de la masa de concreto.

Este calentamiento del concreto provoca expansión, que a su vez al momento de enfriarse sufre una contracción, normalmente restringida, que provoca esfuerzos capaces de agrietarlo; este fenómeno es más probable que se presente a medida que aumenta la cantidad y la velocidad de generación de calor y que disminuyen las facilidades y posibilidades de su disipación; es decir que este agrietamiento se incrementa cuando se emplea un cemento de rápida y alta hidratación o cuando la estructura tiene un gran espesor, lo que por su parte una combinación de estos últimos factores representan condiciones pésimas.

Como medidas preventivas y de diseño, cuando se requiera la aplicación de una estructura voluminosa o donde se requieran altos contenidos de cemento, es recomendable el uso de un cemento que comparativamente genere menos calor de hidratación, ya que las reacciones de endurecimiento del concreto se caracterizan por la liberación de calor, este calor de hidratación como ya se menciona es un factor de importancia por ejemplo en estructuras masivas como las presas, donde existe poca posibilidad de liberación de calor, la temperatura puede aumentar varios grados, en contraste cuando se presenta enfriamiento por clima frío, ocasiona agrietamiento y cambios de volumen.

El efecto de la temperatura en el concreto influye de forma significativa, limita la cantidad y el tipo de cemento en la mezcla, alguna modificación de la mezcla con hielo, puzolanas y retardantes puede convenir; en el contenido de cemento, una mezcla rica en cemento frecuentemente tiene una demanda de agua mayor y a su vez genera más calor de hidratación.

El entorno ambiental al que se está expuesto el concreto fresco es otro factor que tiene influencia en el comportamiento del concreto; se puede observar que en nuestro país corresponden un clima cálido a la parte sur del país y clima templado en la parte norte, en el sur es uniformemente cálido y con precipitaciones, en la región central el clima suele ser templado con moderadas variaciones de temperatura que ocasionalmente y por corto tiempo llega a descender por debajo del punto de congelación, por otro lado en la parte norte del territorio nacional, el clima es más variable pues suele ser semi-desértico particularmente al Norte y Noroeste, con pocas lluvias y fuertes variaciones estacionales de temperatura, muy cálidas en verano y muy frías en invierno con algunos días consecutivos en que la temperatura se mantiene más baja que el punto de congelación del agua.

El ingeniero debe entender los efectos de la generación de calor en los diferentes elementos estructurales y tratar a éstos en las especificaciones del proyecto y en la práctica laboral; a continuación se menciona en que fases influye el efecto de la temperatura:

- **Reacción química del cemento y el agua de mezclado:** Como se ha mencionado en el transcurso de la reacción del cemento con el agua; o hidratación del cemento, genera desprendimiento de calor porque se trata de una reacción exotérmica, provocando una generación de calor en el seno de la masa de concreto. En invierno, el calor de hidratación ayudará a proteger el concreto provocado por el daño de temperaturas de congelación, por otro lado altas temperaturas puede producir esfuerzos indeseables al enfriarse después de endurecer.
- **Fraguado del concreto:** Cuando el cemento es mezclado con agua, permanece de forma plástica durante un corto periodo de tiempo, pero conforme van evolucionando las reacciones entre el cemento y el agua, la masa va perdiendo su plasticidad; este periodo inicial de su endurecimiento se le llama periodo de fraguado y que puede variar en un clima frío que provoca un proceso de hidratación más lento, sin embargo en un clima donde la temperatura es más elevada aumenta la resistencia a muy temprana edad y que puede ir disminuyendo después de los siete días.
- **Curado del concreto:** El curado del concreto como se mencionará más adelante y con más detalle, consiste en propiciar y mantener un ambiente de apropiada temperatura y contenido de humedad en el concreto recién colocado, para que de ésta forma desarrolle el potencial de las propiedades que se esperan de él, un buen curado ayuda al concreto a alcanzar su resistencia y durabilidad, será más impermeable y tendrá menos fisuración.
- **Concreto en clima frío:** Se ha hablado de los efectos que puede presentar el concreto expuestos a la congelación y deshielo, como afectan la durabilidad, en éstas circunstancias lo más deseable es que al mezclar el concreto, éste posea una temperatura adecuada y la conserve el tiempo necesario para la hidratación del cemento, protegiéndolo hasta que adquiera la suficiente resistencia para soportar sin daño la remoción de cimbras y los efectos de las bajas temperaturas, es necesario a su vez que al final del periodo de protección se evite el choque térmico producido por un enfriamiento brusco, adoptando medidas para que éste sea gradual; para aumentar la temperatura del concreto al mezclarlo, el medio más efectivo es precalentar el agua, pero no tanto que pueda provocar el fraguado instantáneo del cemento; cabe mencionar que el fraguado y el endurecimiento del concreto se desarrollan más lentamente en este tipo de ambientes, por lo que la remoción de cimbras requiere más tiempo.
- **Concreto en clima cálido:** Las altas temperaturas pueden afectar la calidad y durabilidad del concreto, los componentes de una mezcla de concreto que es colado en clima caluroso deben ser seleccionados no sólo en función de estas condiciones, sino también de condiciones posteriores, por ejemplo una estructura que se construya en verano durante en condiciones calurosas, puede requerir un aditivo inclusor de aire que lo proteja de las heladas en el mismo sitio cuando se presente el invierno. Al igual que en una mezcla colada en clima frío, aquí el agua es el componente que comparativamente ejerce mayor influencia sobre la temperatura en la elaboración del concreto, pero al contrario de un concreto elaborado en clima frío donde el agua se precalienta, aquí el agua se somete a un enfriamiento o sustituirla por hielo en escamas finamente molido, el enfriamiento del agua requiere de equipos e instalaciones especiales por lo que su aplicación no resulta accesible, por tal medida la aplicación del enfriamiento del agua para colados en climas



## CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE DURMIENTES PARA EL STC-METRO



calurosos sólo se aplica en obras de cierta importancia, pero que es recomendable tomar otras opciones o medidas para contrarrestar este efecto de las altas temperaturas ambiente como lo pueden ser el cubrir los depósitos de agregados para evitar su calentamiento por efectos del sol, conservar la humedad de las gravas, mantener el agua de mezclado a su temperatura original de suministro almacenándola en depósitos cerrados y protegiendo las tuberías con aislamiento térmico, evitar el empleo de un cemento caliente y de ser posible efectuar los colados en las horas en que las temperaturas sean las más bajas posibles; y al contrario que en clima frío la remoción de cimbras debe efectuarse lo más pronto posible para poder curar las superficies de concreto recién desmoldadas y disipar el calor interno del concreto.

La Norma Mexicana NMX-C-155, establece que para aquellos casos en que se proceda a calentar los materiales para compensar las bajas temperaturas, la temperatura máxima del concreto hidráulico en el momento de producción y colocación no debe exceder de los 32 °C; en climas cálidos la temperatura del concreto hidráulico en el momento de producción y colocación debe ser la más baja posible, no es conveniente exceder temperaturas de 38 °C. A su vez para contrarrestar el efecto de las temperaturas altas se deben enfriar los materiales y la posibilidad de enfriar el agua, sin que la temperatura del concreto fresco descienda a menos de 10 °C.

El rango actual de temperaturas se ha ampliado debido a la gran cantidad de construcción moderna que se lleva a cabo en países de clima cálido y en regiones muy frías, por lo que como se ha visto, es importante el conocimiento de los efectos de la temperatura del concreto, estudiar la influencia de la temperatura del concreto fresco y como afecta a la resistencia, durante la colocación, el fraguado, en el curado del concreto y el desarrollo del calor de hidratación; son por mencionar partes esenciales para el buen desarrollo de las propiedades del concreto, acompañadas además del estudio y conocimiento de las mezclas elaboradas en clima caliente o frío; y una vez endurecido el concreto, los efectos que las altas o las bajas temperaturas ejercen una influencia considerable en la durabilidad de este material de construcción.



## CAPITULO 3 CONSIDERACIONES ESPECIALES EN LA ELABORACIÓN DE DURMIENTES DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

### 3.1 DISEÑO DE MEZCLAS

Un diseño de mezcla deberá cumplir con características adecuadas de trabajabilidad, consistencia y resistencia; por otra parte se debe trabajar para éste tipo de concreto con relaciones agua/material cementante bajas, para así de esta forma lograr mayores resistencias a compresión, a su vez; el concreto debe ser compactado totalmente, esto puede ser por medio de una simple compactación mecánica (varillado) o por vibración. Cabe mencionar que una alta cohesión aumenta la resistencia del concreto, considerándose a ésta, como la forma más directa para conseguir concretos de alta resistencia.

El procedimiento de diseño se basa en recomendaciones y resultados obtenidos en trabajos realizados anteriormente o en guías y ayudas proporcionadas por algunas entidades o instituciones que han efectuado estudios sobre el tema. Existe un moderado panorama de recopilación de información sobre experiencias realizadas para concreto de alta resistencia, éstos reportes de información ayudan a tomar y considerar algunas recomendaciones sobre los contenidos de cemento dentro de la mezcla, revenimiento, proporción del agregado fino y grueso, relaciones agua/material cementante y en caso que se requiera la adición de algún aditivo. Aún cuando la disponibilidad de ayudas de diseño de mezcla para concreto de resistencia normal es conocida, el procedimiento de diseño de mezclas de concreto de alta resistencia requiere experiencia, intuición, un profundo conocimiento de los principios básicos, conocimiento de los materiales disponibles y una apreciación de las limitaciones bajo condiciones de campo. Como en la mayoría de los procesos de diseño de mezclas de concreto, es necesario el uso de mezclas de prueba.

Ahora bien, de lo anterior se puede definir el diseño de la mezcla como el proceso de selección de los ingredientes adecuados del concreto, para determinar sus cantidades relativas con el propósito de producir un concreto económico, notable manejabilidad, resistencia, durabilidad y que cumpla con las propiedades requeridas que especifica el diseño de la estructura.

El diseño, en el sentido estricto de la palabra, no es posible; ya que los materiales usados varían en muchos aspectos y muchas de sus propiedades no se pueden evaluar real y cuantitativamente, por lo que se puede decir que se está haciendo una inteligente suposición de las condiciones óptimas de los ingredientes. Por lo tanto como se ha mencionado, para obtener una mezcla satisfactoria, se debe verificar las proporciones calculadas haciendo mezclas de prueba y, si es necesario, efectuar ajustes apropiados a las proporciones hasta que se haya obtenido una mezcla que cumpla con los requerimientos, a los cuales estará sometida la estructura en estudio.

Cabe mencionar que antes de determinar alguna proporción de la mezcla, deben ser seleccionadas sus características considerando el uso que se le va a dar al concreto; las condiciones a las que va a estar expuesta, tamaño y forma de los elementos y sus propiedades físicas del concreto tales como la resistencia a la congelación y la resistencia mecánica, que son requeridas para la estructura; posteriormente que se



hayan elegido las características se puede proceder a proporcionar o dosificar la mezcla a partir de datos de campo o laboratorio.

La información que se tiene de los durmientes de concreto de alta resistencia, es que se tiene que alcanzar una resistencia a la compresión en promedio de  $490 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días de acuerdo con la norma NMX-C-083 y en resistencia de flexión en promedio  $65 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días de acuerdo a la norma NMX-C-303. Se recomienda un tamaño máximo del agregado de 19 mm, con revenimiento cero; hasta este momento se considera que no incluirá la adición de algún aditivo. El cemento a utilizar debe ser del Tipo I ó II, y cumplir con los parámetros establecidos en la norma ASTM-C-150 y/o NMX-C-414 para cemento clasificado como tipo CPO o CPC. A partir de esta información se procede hacer el proporcionamiento de la mezcla de concreto para los durmientes de concreto de alta resistencia del sistema de transporte colectivo metro. (Ver apartado de tablas y gráficas; especificación ejecutiva para la fabricación y suministro de durmientes de concreto de alta resistencia. Tabla 1).

### 3.2 PROPORCIONAMIENTO

El proporcionamiento de las mezclas de concreto de alta resistencia varia ampliamente dependiendo de factores tales como el nivel de resistencia requerida, la edad del ensaye, las características del material y el tipo de aplicación, todo esto influye en el proporcionamiento. A su vez se ve afectado por aspectos económicos, los requerimientos estructurales, la práctica de fabricación, ambiente de curado e inclusive por la época del año.

El proporcionamiento de la mezcla de concreto de alta resistencia conlleva a un proceso más crítico que el diseño de mezclas de concreto de resistencia normal, se considera esencial el uso de una baja relación/agua material cementante; cuando se requieren alcanzar resistencias a compresión mayores de  $400 \text{ Kg/cm}^2$ , las propiedades de los agregados asumen una gran importancia. Debe tenerse en cuenta que en algunas ocasiones la resistencia de los agregados limita la resistencia del concreto y que las mezclas con alto contenido de cemento y baja relación agua/material cementante no necesariamente producen concretos de alta resistencia; por lo tanto se puede afirmar que el proceso de diseño de mezclas de concreto de alta resistencia, se enfoca a la búsqueda del agregado apropiado.

Se ha mencionado que las características de los agregados tienen una gran influencia en la dosificación de las mezclas de concreto de alta resistencia, porque ellos influyen de manera directa en la trabajabilidad del concreto fresco, debido a que ocupan mayor volumen que cualquier otro ingrediente en el concreto. Estas características son la granulometría y la naturaleza de las partículas como lo es su forma, porosidad y textura superficial; que sea mencionado en el capítulo anterior.

Para la fabricación de durmientes del STC-Metro, se llevo a cabo una investigación consciente sobre el agregado fino, de tal manera que satisficiera las necesidades de nuestra mezcla de concreto. El estudio físico de arena, presentó una arena andesítica para el proporcionamiento.



En primera instancia en el estudio se hizo el cálculo de la masa volumétrica suelta y compactada como se menciona a continuación:

### 1. Masa Volumétrica de Arena Suelta ( $\text{kg/m}^3$ )

1.- Inicialmente se debe conocer el peso del recipiente volumétrico que es usado en el laboratorio.

$$\text{Masa del recipiente (kg)} = 3.298$$

2.- Masa del material más la masa del recipiente.

$$\text{Masa de la arena + Masa del recipiente (kg)} = 11.005$$

3.- Masa del material.

$$\text{Masa Arena (kg)} = 7.707$$

4.- Volumen y/o factor del recipiente.

$$\text{Factor del recipiente} = 0.20$$

5.- Masa volumétrica.

$$\underline{\text{Masa volumétrica Arena Suelta (kg/m}^3\text{)} = 7.707 * 0.20 = 1.541}$$

### 2. Masa Volumétrica de Arena Compacta ( $\text{kg/m}^3$ )

1.- Masa del recipiente volumétrico usado en el laboratorio.

$$\text{Masa del recipiente (kg)} = 3.298$$



2.- Masa del material más la masa del recipiente.

$$\text{Masa de la arena + Masa del recipiente (kg)} = 11.527$$

3.- Masa del material.

$$\text{Masa Arena (kg)} = 8.229$$

4.- Volumen y/o factor del recipiente.

$$\text{Factor del recipiente} = 0.20$$

5.- Masa volumétrica.

$$\underline{\text{Masa volumétrica Arena Compacta (kg/m}^3\text{)} = 8.229 * 0.20 = 1.646}$$

### 3. Determinación de la Masa Específica (SSS)

Ahora se procede hacer el cálculo para la determinación de la masa específica saturado con superficie seca (SSS); considerando lo siguiente:

Masa del material sss (g)= 500 .....(a)

Masa del picnómetro lleno de agua (g)= 1492.....(b)

Masa del picnómetro con muestra lleno de agua(g)= 1785.....(c)

Se tiene ahora:

$$\text{Mess} = (a) / [(b + a) - c]$$

$$\underline{\text{Mess (kg/dm}^3\text{)} = 500 / [(1492 + 500) - 1785] = 2.42} \text{ (Densidad)}$$

#### 4. Determinación de la Absorción (%)

La absorción se determina de la siguiente forma:

- Masa del material sss (g)= 500.....(a)  
 Masa seca (g)= 480.....(b)  
 Diferencia de (a) y (b)= (500 – 480)= 20.....(c)

**% de absorción= (c/b) \* 100= (20/480)\*100= 4**

#### 5. Pérdida por lavado sobre malla No. 200

Para pérdida por lavado se hace lo siguiente:

- Masa de material seco sin lavar (g)= 932.7.....(a)  
 Masa de material seco lavado (g)= 816.3.....(b)  
 Diferencia de (a) y (b)= (932.7 – 816.3)= 116.4.....(c)

**% de pérdida por lavado= (c/a)\*100= (116.4/932.7)\*100= 12.5**

#### 6. Granulometría

Se obtuvo los siguientes valores:

Malla No.	Abertura de la malla (mm)	Masa de suelo Retenido (g)	Masa de suelo Retenido (%)	Masa de suelo Acumulado (%)	% que pasa
(3/8")	9.52	0	0	0	100
(No. 4)	4.76	14.1	1.6	1.6	98.4
(No. 8)	2.38	174.4	19.9	21.5	78.5
(No. 16)	1.13	211.5	24.1	45.6	54.4
(No. 30)	0.59	144	16.4	62.0	38.0
(No. 50)	0.297	134	15.3	77.3	22.7
(No. 100)	0.149	129.1	14.7	92.0	8.0
CH	-	70.0	8.0	100	0.0
	Suma=	877.1			
	MF=	3.0			



Una vez realizado el estudio físico de la arena, se procede al análisis del agregado grueso; el cual fue obtenido de un banco de material que presenta una grava basáltica, obteniendo los siguientes valores en el estudio físico de la grava. Inicialmente se hace el cálculo de la masa volumétrica suelta y compacta como se menciona a continuación:

### **7. Masa Volumétrica de Grava Suelta ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )**

1.- Masa del recipiente.

$$\text{Masa del recipiente (g)} = 3298$$

2.- Masa del material más la masa del recipiente.

$$\text{Masa Grava Suelta + Masa Recipiente (g)} = 10706$$

3.- Masa de material neto.

$$\text{Masa Neta de Grava Suelta – Masa Recipiente (g)} = 7408$$

4.- Volumen y/o factor del recipiente.

$$\text{Volumen y/o Factor del Recipiente} = 0.20$$

5.- Masa Volumétrica.

$$\underline{\text{Masa Volumétrica de Grava Suelta (kg}/\text{m}^3) = 7408 * 0.20 = 1.482}$$



**8. Masa Volumétrica de Grava Compacta (kg/m<sup>3</sup>)**

1.- Masa del recipiente.

**Masa del recipiente (g)= 3298**

2.- Masa del material más la masa del recipiente.

**Masa Grava Compacta + Masa Recipiente (g)= 11249**

3.- Masa de material neta.

**Masa Neta de Grava Compacta – Masa Recipiente (g)= 7951**

4.- Volumen y/o factor del recipiente.

**Volumen y/o Factor del Recipiente= 0.20**

5.- Masa Volumétrica.

**Masa Volumétrica de Grava Compacta (kg/m<sup>3</sup>)= 7951 \* 0.20 = 1.590**

**9. Determinación de la Masa Específica (SSS)**

Se procede hacer el cálculo para la determinación de la masa específica saturado con superficie seca (SSS); considerando lo siguiente:

- Peso del material sss (g)= 1064 .....(a)
- Masa de tara sumergido en agua (g)= 2959.....(t)
- Masa bruta sumergida en agua (g)= 3628.....(b)
- Masa de agua desalojada (g)= [a - (b - t)]= 395.....(v)

Se tiene ahora:

**Mess= (a) / (v)**

**Mess (kg/dm<sup>3</sup>)= 1064/ 395 = 2.69** (Densidad)

### 10. Determinación de la Absorción (%)

La absorción se determina de la siguiente forma:

Masa del material sss (g)= 1064.....(a)  
 Masa seca (g)= 1055.7.....(b)  
 Diferencia de (a) y (b)= (1064 – 1055.7)= 8.3.....(c)

**% de absorción= (c/b) \* 100= (8.3/1055.7)\*100= 0.8**

### 11. Pérdida por lavado sobre malla No. 200

Para pérdida por lavado se hace lo siguiente:

Masa de material seco sin lavar (g)= 7144.....(a)  
 Masa de material seco lavado (g)= 7079.....(b)  
 Diferencia de (a) y (b)= (7144 – 7079)= 65.....(c)

**% de pérdida por lavado (c/b)\*100= (65/7079)\*100= 0.9**

### 12. Granulometría

Se obtuvo los siguientes valores:

Malla No.	Abertura de la malla (mm)	Masa de suelo Retenido (g)	Masa de suelo Retenido (%)	Masa de suelo Acumulado (%)	% que pasa
(1")	25.4	0	0	0	100
(3/4")	19.0	1337	9.3	9.3	90.7
(3/8")	9.52	7086	49.5	58.8	41.2
(4)	4.76	4464	31.2	90.0	10.0
(8)	2.38	1002	7.0	97.0	3.0
CH	-	432	3.0	100	0
	Suma=	14311			
	MF=		Tamaño Máx. de Agregado (mm)		19

Teniendo finalmente las tablas ilustrativas 3.2.1 y 3.2.2 (Ver también apartado de Tablas y Gráficas; tablas 2 y 3).

**TABLA 3.2.1 ESTUDIO FÍSICO DE LA ARENA**

<b>ESTUDIO FÍSICO DE LA ARENA</b>						
Ensaye No.: 05			Fecha de Muestreo: Diciembre 2009			
Procedencia:			Fecha de Reporte: Diciembre 2009			
Localización:			Reporte No.: 01			
Obra: Durmientes de concreto de alta resistencia			Cliente: Sistema De Transporte Colectivo Metro			
<b>MASA VOLUMÉTRICA</b>						
Masa Volumétrica Suelta (Kg)			Masa Volumétrica Compacta (kg)			
Recipiente Volumétrico No.: 08			(a) Peso de recipiente (kg)= 3.298			
Peso de material (kg) + (a)= 11.005			Peso de material (kg) + (a)= 11.527			
Peso de material (kg) - (a)= 7.707			Peso de material (kg) - (a)= 8.229			
Volumen y/o factor de recipiente= 0.20			Volumen y/o factor de recipiente= 0.20			
Masa Volumétrica (kg/m3)= 1.541			Masa Volumétrica (kg/m3)= 1.646			
<b>DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA (SSS)</b>						
a.- Peso de material sss (g)= 500			b.- Peso de picnómetro lleno de agua (g)= 1492			
c.- Masa de picnómetro con muestra lleno de agua (g)= 1785			Messs= (a / ((b + a) - c)) (kg/dm3)= 2.42			
<b>DETERMINACIÓN DE ABSORCIÓN (%)</b>						
a.- Peso de material sss (g)= 500			b.- Peso seco (g)= 480			
c.- Diferencia de a - b= 20			% de absorción (c/b)*100= 12.5			
<b>PÉRDIDA POR LAVADO SOBRE MALLA No. 200</b>						
a.- Peso de material seco sin lavar (g)= 932.7			b.- Peso de material seco lavado (g)= 816.3			
c.- Diferencia de a - b (g)= 116.4			% de pérdida por lavado (c/a)*100= 12.5			
<b>GRANULOMETRÍA</b>						
Malla No.	Abertura de malla (mm)	Peso de suelo retenido (g)	Peso de suelo retenido (%)	Peso de suelo Acumulado (%)	% que pasa	Normas de referencia <b>NMX-C-73, NMX-C-165, NMX-C-084, NMX-C-77</b>  <b>Observaciones</b>
3/8"	9.52	0	0	0	100	
4	4.76	14.1	1.6	1.6	98.4	
8	2.38	174.4	19.9	21.5	78.5	
16	1.13	211.5	24.1	45.6	54.4	
30	0.59	144	16.4	62.0	38.0	
50	0.297	134	15.3	77.3	22.7	
100	0.149	129.1	14.7	92.0	8.0	
CH	—	70	8.0	100.0	0.0	
	<b>Suma=</b>	<b>877.1</b>				
<b>MF= 3.0</b>						



**TABLA 3.2.2 ESTUDIO FÍSICO DE LA GRAVA**

ESTUDIO FÍSICO DE LA GRAVA						
Ensaye No.: 02			Fecha de Muestreo: Diciembre 2009			
Localización:			Fecha de Reporte: Diciembre 2009			
			Reporte No.: 01			
Obra: Durmientes de concreto de alta resistencia			Cliente: Sistema de Transporte Colectivo Metro			
MASA VOLUMÉTRICA						
Datos		Suelta		Compacta		
a) Peso de recipiente (g):		3298		3298		
Recipiente Volumétrico No.:		8		8		
b) Peso de material más recipiente (g):		10706		11249		
c) peso de material neto (b - a) en gramos:		7408		7951		
d) Volumen y/o factor de recipiente:		0.2		0.2		
Masa Volumétrica en kg/m <sup>3</sup> (c * d):		1.482		1.590		
DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECIFICA (SSS)						
a.- Peso de material M <sub>sss</sub> (g)= 1064			t.- Masa de tara sumergido en agua (g)= 2959			
b.- Masa bruta sumergida en agua (g)= 3628			v= Masa de agua desalojada (a - b) + t= 395			
Messs: Masa especifica saturada y superficie seca (kg/dm <sup>3</sup> ) = a / v= 2.69						
DETERMINACIÓN DE ABSORCIÓN (%)						
a.- Peso de material sss (g)= 1064			b.- Peso seco (g)= 1055.7			
c.- Diferencia de a - b= 8.3			% de absorción (c/b)*100= 0.8			
PÉRDIDA POR LAVADO SOBRE MALLA No. 200						
a.- Peso de material seco sin lavar (g)= 7144			b.- Peso de material seco lavado (g)= 7079			
c.- Diferencia de a - b (g)= 65			% de pérdida por lavado (c/a)*100= 0.9			
GRANULOMETRÍA						
Malla No.	Abertura de malla (mm)	Masa de suelo retenido (g)	Masa de suelo retenido (%)	Masa de suelo Acumulado (%)	% que pasa	Normas de referencia: NMX-C-73, NMX-C-164, NMX-C-084, NMX-C-77
1"	25.4	0	0	0	100	
3/4"	19	1337	9.3	9.3	90.7	
3/8"	9.52	7086	49.5	58.8	41.2	
4	4.76	4464	31.2	90.0	10.0	
8	2.38	1002	7.0	97.0	3.0	
CH	-	432	3.0	100.0	0.0	Observaciones
	Suma=	14321				
MF=			Tamaño Máx. de agregado (mm)= 19			



Posteriormente se procede a las correcciones por humedad y contaminación de los agregados.

Para determinar las correcciones por humedad, primero se inicia con el cálculo de humedades.

**13. Determinación de humedades**

Para la arena lavada:

- Masa húmeda (g)= 565.....(a)
- Masa Seca (g)= 532.....(b)
- Diferencia de Masas (g)= (565) – (532)= 33.....(c)

**% de humedad= [(c) / (b)] \*100= 6.2**

Para la arena sucia:

- Masa húmeda (g)= 543.....(a)
- Masa Seca (g)= 518.....(b)
- Diferencia de masas (g)= (543) – (518)= 25.....(c)

**% de humedad= [(c) / (b)] \*100= 4.8**

Para la grava:

- Masa húmeda (g)= 3186.....(a)
- Masa Seca (g)= 3157.....(b)
- Diferencia de masas (g)= (3186) – (3157)= 29.....(c)

**% de humedad= [(c) / (b)] \*100= 0.9**

**14. Corrección por contaminación**

La corrección por contaminación no se lleva a cabo dado que los agregados están libres de materiales contaminantes; por lo que se prosigue a la corrección por humedad de los componentes de la mezcla de concreto.

Se tiene lo siguiente:

La cantidad de cemento fue definida por la experiencia del ingeniero de laboratorio en base a proporcionamientos y dosificaciones ya establecidas y aplicadas en el laboratorio, se utilizó un cemento portland ordinario de clase resistente 40 (CPO 40) de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-C-414; para cumplir con las especificaciones de proyecto.



La cantidad de agua agregada, de igual forma fue definida por el ingeniero de laboratorio, en base a mezclas de concreto ya establecidas en el laboratorio y cumpliendo la Norma Mexicana NMX-C-122; así como las especificaciones del proyecto.

Teniendo lo siguiente:

**Cantidades Saturadas (kg/m<sup>3</sup>)**

Cemento= 465

Arena lavada= 551

Arena sucia= 236

Grava= 1005

Agua= 142

**Suma de cantidades saturadas= 2399**

**15. Corrección por humedad**

**Humedad (kg)**

Conociendo las humedades de los agregados en % se tiene:

Arena lavada= [(Cantidad saturada de arena lavada) \* (% de humedad de arena lavada)] / 100

$$\text{Humedad arena lavada (kg)} = (551 * 6.2) / 100 = 34.16$$

Arena sucia= [(Cantidad saturada de arena sucia) \* (% de humedad de arena sucia)] / 100

$$\text{Humedad arena sucia (kg)} = (236 * 4.8) / 100 = 11.34$$

Grava= [(Cantidad de grava) \* (% de humedad de arena sucia)] / 100

$$\text{Humedad grava (kg)} = (1005 * 0.9) / 100 = 9.05$$

**Absorción (kg)**

Conocida la absorción de los agregados se tiene:

Arena lavada= [(Cantidad saturada de arena lavada) \* (% de absorción de arena lavada)] / 100

$$\text{Absorción arena lavada (kg)} = (551 * 4) / 100 = 22.04$$



Arena sucia= [(Cantidad saturada de arena lavada) \* (% de absorción de arena sucia)] / 100

$$\text{Absorción arena sucia (kg)} = (236 * 4) / 100 = 9.44$$

Grava= [(Cantidad de grava) \* (% de absorción de grava)] / 100

$$\text{Absorción grava (kg)} = (1005 * 0.8) / 100 = 8.04$$

### Cantidades Corregidas (kg/m<sup>3</sup>)

Cemento= 465

Arena lavada= [(Cantidad saturada de arena lavada + humedad de arena lavada) – (absorción)]

$$\text{Cantidad corregida (kg/m}^3\text{)} = [(551 + 34.16) - (22.04)] = 563$$

Arena sucia= [(Cantidad saturada de arena sucia + humedad de arena lavada) – (absorción)]

$$\text{Cantidad corregida (kg/m}^3\text{)} = [(236 + 11.34) - (9.44)] = 238$$

Grava= [(Cantidad de grava + humedad de grava) – (absorción)]

$$\text{Cantidad corregida (kg/m}^3\text{)} = [(1005 + 9.05) - (8.04)] = 1006$$

Para el contenido de agua se tiene que:

### Contenido de Agua

Agua (kg/m<sup>3</sup>)= 142

Humedad agregados= (humedad arena lavada + humedad arena sucia + humedad grava)

$$\text{Contenido de agua en base a humedad (kg)} = (34.16 + 11.34 + 9.05) = 55.0$$

Absorción agregados= (absorción arena lavada + absorción arena sucia + absorción grava)

$$\text{Contenido de agua en base a absorción (kg)} = (22.04 + 9.44 + 8.04) = 40.0$$



Cantidad Corregida= [(contenido de agua – contenido de agua en base humedad) + (contenido de agua en base absorción)]

$$\text{Cantidad de agua corregida} = [(142 - 55.0) + (40)] = 127$$

Se tiene ahora ya las cantidades finales corregidas por humedad

Cemento= 465  
Arena lavada= 563  
Arena sucia= 238  
Grava= 1006  
Agua= 127

**Suma de cantidades corregidas por humedad = 2399**

Finalmente como se puede observar la suma de las cantidades saturadas de los componentes de la mezcla coincide con las cantidades corregidas por humedad; por lo tanto se comprueba de esta manera que el cálculo es satisfactorio y que los resultados de los agregados grueso y fino son adecuados y cumplen las características requeridas para la mezcla de concreto de durmientes de concreto de alta resistencia. (Ver apartado de Tablas y Gráficas; Tabla 4 Reporte de correcciones por humedad y contaminación de agregados y Tabla 5 Comparación entre el diseño teórico y corrección por humedad).

Por consiguiente:

### Relación agua/material cementante

Relación agua/material cementante= Contenido de agua / Contenido de cemento

$$\text{Relación agua/material cementante} = (127 / 465) = 0.27$$

### Relación grava/arena

Relación grava/arena= Cantidad de grava / Cantidad de arena lavada

$$\text{Relación grava/arena} = (1006 / 563) = 1.79$$



### Contenido de grava (%)

Contenido de grava (%)= (Contenido de grava / suma de cantidades corregidas por humedad) \* 100

$$\text{Contenido de grava (\%)} = [(1006 / 2399) * 100] = 41.9$$

### Contenido de arena (%)

Contenido arena (%)= (Contenido de arena lavada / suma de cantidades corregidas por humedad) \* 100

$$\text{Contenido de arena (\%)} = [(563 / 2399) * 100] = 23.5$$

Y como se mencionó anteriormente, no existirá inclusión de algún aditivo químico, ni minerales finamente divididos para este diseño y proporcionamiento de la mezcla en estudio; lo cual también, cabe recalcar el revenimiento que se buscó obtener es un revenimiento cero para la mezcla de prueba de concreto de alta resistencia, dado que es un revenimiento adecuado para elementos estructurales macizos y prefabricados sometidos a alta vibración.

### 3.3 DESARROLLO DE LA RESISTENCIA

Inmediatamente después que se presenta el fraguado del concreto, comienza el proceso de adquisición de resistencia con el transcurso del tiempo. Para concretos convencionales se especifica que puede alcanzar la resistencia de diseño a los 28 días; la explicación es que después de dicho tiempo el aumento de resistencia es muy poco. Sin embargo para concreto de alta resistencia puede llegar a especificarse a los 56 ó 90 días, porque puede darse que el aumento de la resistencia después de los 28 días llegue a ser considerable.

Por otra parte, el concepto de madurez utiliza el principio en que la resistencia del concreto y otras propiedades se encuentran relacionadas con la edad y el desarrollo de la temperatura. El concepto de madurez da por hecho que las muestras de una mezcla de concreto que tengan la misma madurez, tendrán resistencias similares; independientemente de la combinación de tiempo y temperatura con la que se alcance la madurez, por ejemplo un concreto curado a una temperatura de 10 °C por 7 días puede tener el mismo índice de madurez que un concreto curado a 27 °C por tres días y como consecuencia tendrían resistencias similares. El índice de madurez, en función de su desarrollo de temperatura y edad, es utilizado para estimar el desarrollo de la resistencia basado en una calibración predeterminada de la relación tiempo-temperatura-resistencia desarrollada sobre ensayos de laboratorio para dicha mezcla.



Como se ha mencionado la madurez se basa en el principio de que el desarrollo de la resistencia en el concreto es función del tiempo de curado y de la temperatura. Conforme el ACI 306R-88 y la ASTM C 1074, se puede usar el concepto de madurez para la evaluación del desarrollo de la resistencia cuando las temperaturas de curado prescritas no se hayan mantenido durante el tiempo requerido o cuando las temperaturas de curado hayan fluctuado.

El concepto de madurez no es preciso y tiene algunas limitaciones, pero es útil para la evaluación del curado del concreto y estimar la resistencia en relación al tiempo y a la temperatura; también a ganado una gran aceptación para representar la resistencia a compresión del concreto para la remoción del apuntalamiento o para la apertura del pavimento para el tráfico, pero no es un sustituto del control de calidad y de las prácticas adecuadas de colado.

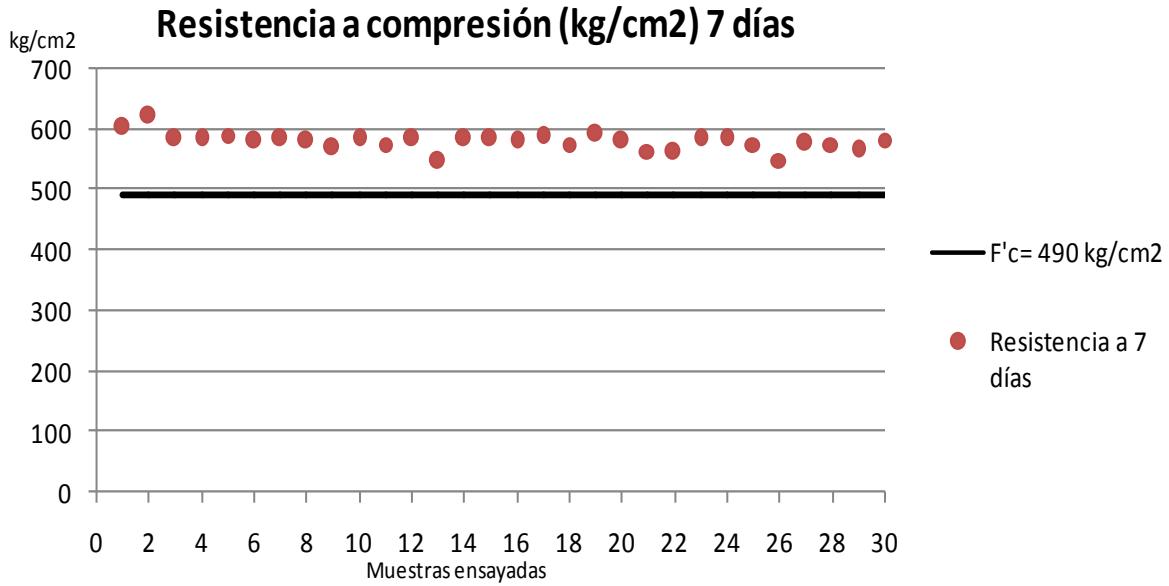
La siguiente información debe estar disponible para el control del desarrollo de la resistencia del concreto en la estructura, a través del concepto de madurez:

1. La relación entre la resistencia y madurez del concreto usado en la estructura. Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión en varias edades en una serie de cilindros producidos con un concreto similar al usado en la estructura, sirve para determinar la curva de relación entre la resistencia y el factor de madurez. Los cilindros se deben curar en el laboratorio a una temperatura de  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $73\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).
2. Registro de la temperatura del concreto en la obra a lo largo del tiempo. Las lecturas de la temperatura se obtienen con la colocación en el concreto de termistores o termopares en diversas profundidades. El lugar en el cual se obtienen los valores más bajos, proporciona las lecturas de temperatura que se van a usar.

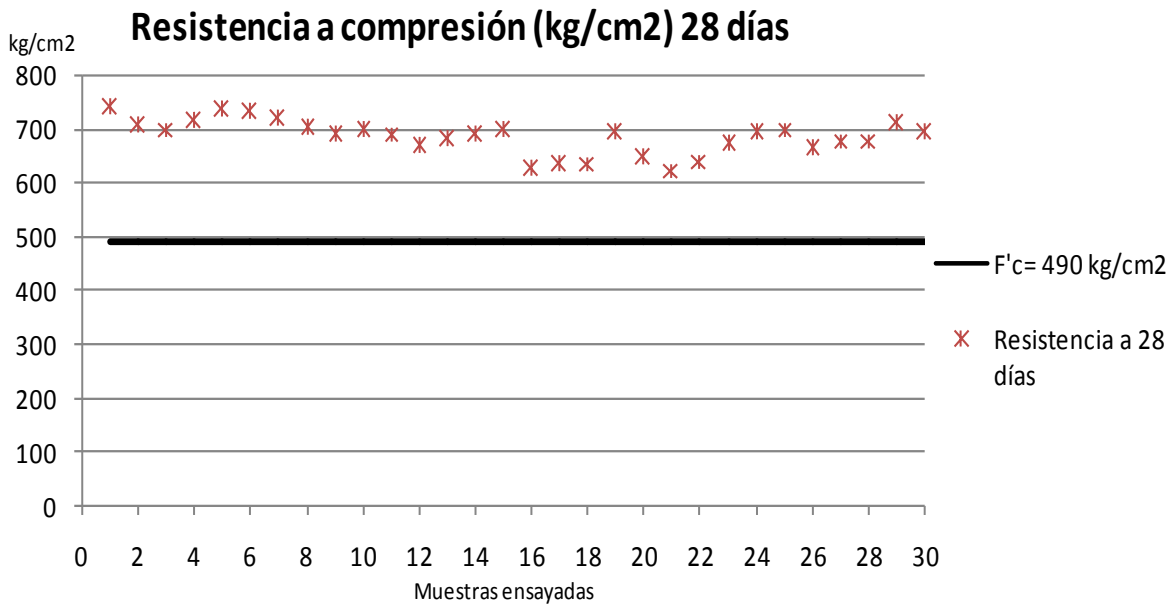
La selección de la proporciones de la mezcla pueden estar influenciadas por la edad de la prueba; puede variar dependiendo de los requerimientos de construcción, por ejemplo en el concreto pretensado pueden requerirse altas resistencias tempranas en 12 ó 24 horas, en el concreto postensado se requieren alcanzar altas resistencias aproximadamente en 3 días. Cuando se seleccionan las proporciones de la mezcla, el tipo de curado debe ser considerado junto con la edad de la prueba, especialmente cuando en el diseño se requieren altas resistencias tempranas. Los concretos ganan resistencia en función de su madurez, la cual es comúnmente definida como una función del tiempo y la temperatura del curado (ACI 363R-92).

Las variaciones del desarrollo de la resistencia se observa con mayor claridad a partir de las tablas de resultados de los ensayos a compresión y flexión estudiados a 7 y 28 días respectivamente, que se muestran en el apartado siguiente (tablas 3.4.1 a 3.4.4). Los resultados para señalar el incremento de las resistencias a compresión y tensión a 7 y 28 días se ilustran a través de las gráficas 1 a 6.

GRÁFICA 1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 7 DÍAS

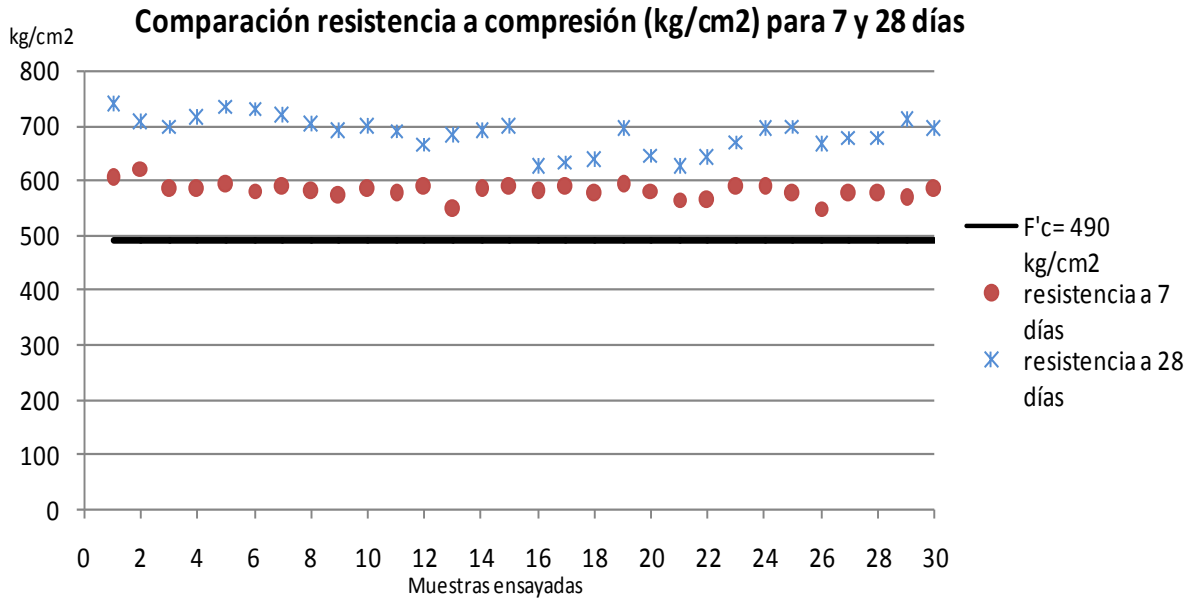


GRÁFICA 2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 28 DÍAS



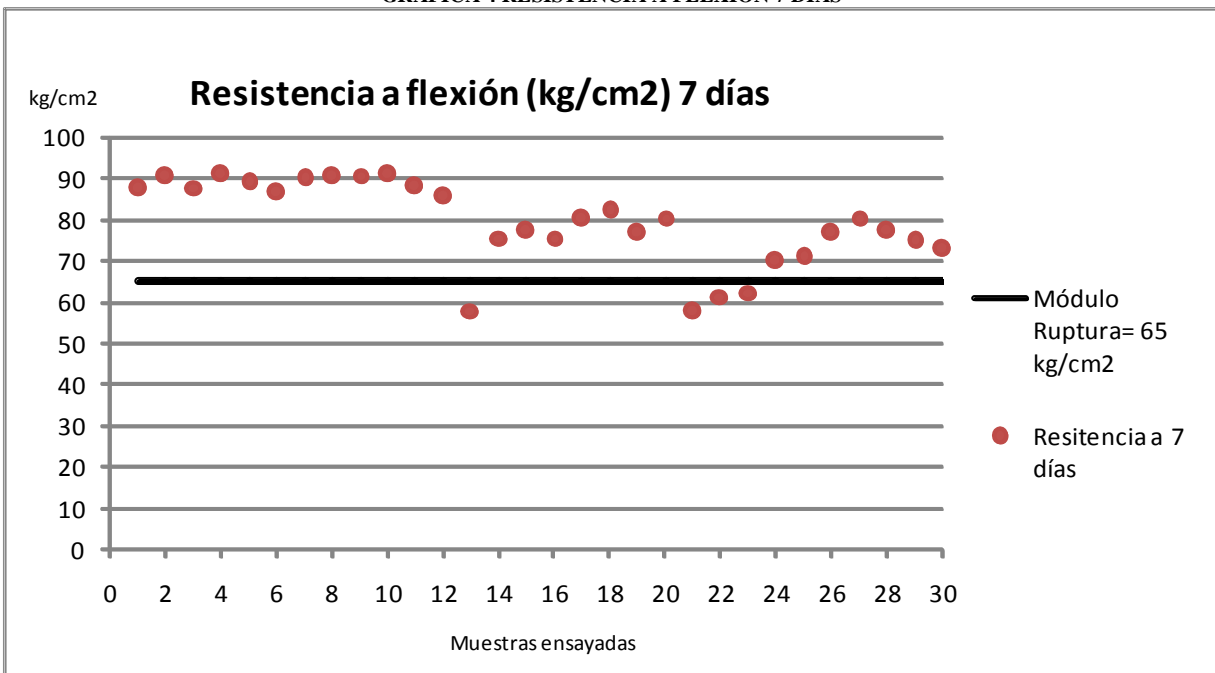


GRÁFICA 3 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA AMBAS EDADES 7 Y 28 DÍAS

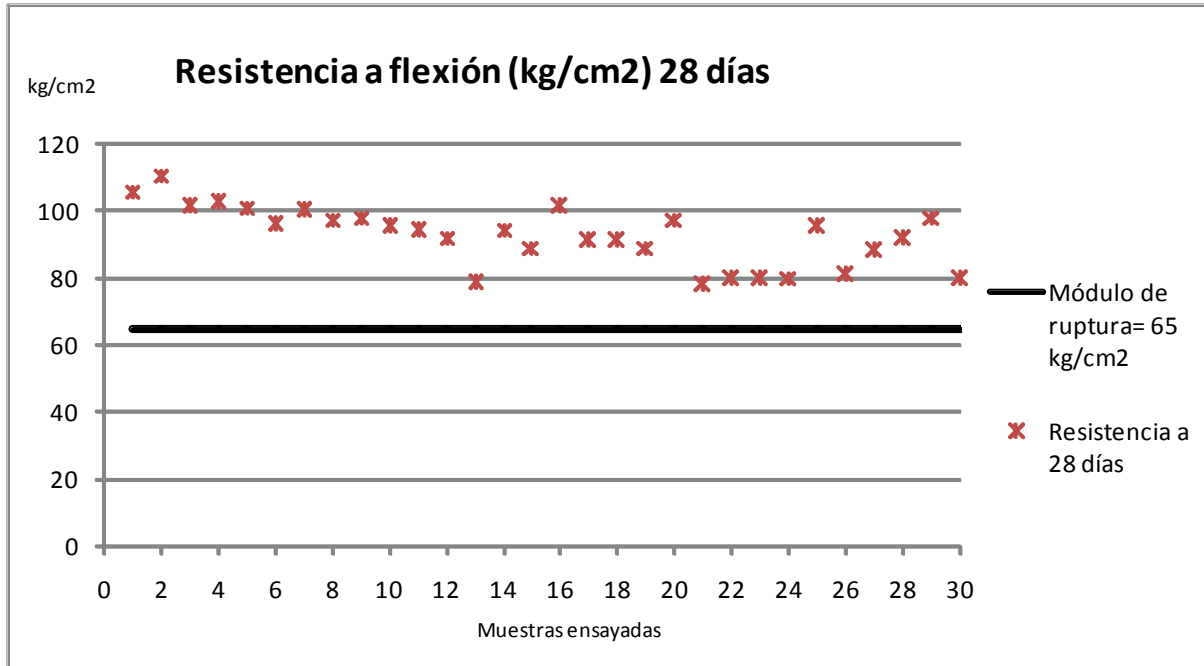


Para la resistencia a flexión se tienen las siguientes gráficas:

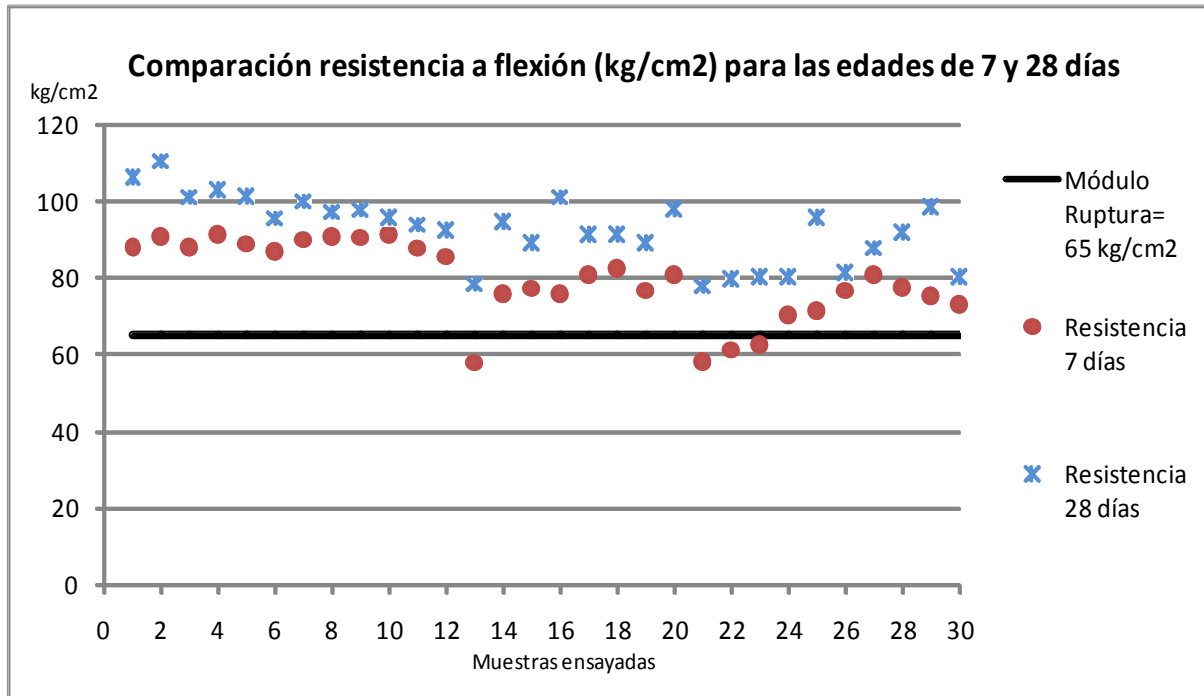
GRÁFICA 4 RESISTENCIA A FLEXIÓN 7 DÍAS



GRÁFICA 5 RESISTENCIA A FLEXIÓN 28 DÍAS



GRÁFICA 6 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA AMBAS EDADES 7 Y 28 DÍAS



Se puede notar el incremento de la resistencia con respecto al tiempo y la edad; aunque en algunos casos existe una pequeña variación entre resistencias, se logra ver un incremento notable con respecto de la edad. Por lo general, la relación entre la resistencia flexión respecto de la resistencia a compresión es más baja mientras es más alta es la resistencia compresiva.

Sin embargo, hay otros factores que afectan la relación entre las dos resistencias, las principales son: el método de prueba del concreto a tensión, el tamaño del espécimen, la forma y la condición de humedad. Además cabe mencionar que influyen de manera directa aspectos como es el método empleado de curado y su eficacia, así como de la influencia de la temperatura que a menudo si se tiene una mayor temperatura durante el colado, mayor será el índice de desarrollo de la resistencia inicial, pero menor la resistencia a largo plazo; es por ello que es importante reducir la temperatura del concreto fresco cuando se fabrica en climas cálidos.

### 3.4 PRUEBAS DE LABORATORIO

La Norma Mexicana NMX-C-403, define a la resistencia a la compresión como la capacidad de carga por unidad de área del concreto hidráulico, medida en ensayos de especímenes cilíndricos elaborados, curados y probados en las condiciones estándar especificadas y que es expresada por lo general en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Para este estudio de los durmientes de alta resistencia, es importante conocer la relación entre las resistencias de 7 y 28 días; se estima que la resistencia a los 7 días normalmente es del 75% de la resistencia a los 28 días, en su caso si se requiriera a otra edad de la prueba como por ejemplo a los 56 ó 90 días se estima que aproximadamente la resistencia será mayor entre un 10% y 15% en comparación de la edad de los 28 días.

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, la resistencia está en función de la relación agua/material cementante, de cuanto la hidratación ha progresado, del curado, de las condiciones ambientales y de la edad del concreto. La resistencia compresión es una propiedad principalmente física y frecuentemente usada en los cálculos de diversas estructuras; su determinación se obtiene a través de ensayos en probetas de concreto o mortero; para el caso de los durmientes de concreto de alta resistencia, el método de prueba utilizó probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro (6 pulg.) y 300 mm de altura (12 pulg).

Una vez que se han superado las etapas del diseño de mezcla y el proporcionamiento, así como la fabricación para  $1 \text{ m}^3$  de concreto, la elaboración de las probetas cilíndricas, el tiempo transcurrido y el método de curado, se procede a la práctica de ensaye de los cilindros de concreto. La Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE; nos indica que para la determinación de la resistencia a compresión de los cilindros de concreto, se debe contar con una máquina de prueba tipo a compresión o universal, que tenga capacidad suficiente y pueda funcionar a la velocidad de aplicación de la carga, sin producir impactos ni pérdida de carga. La velocidad de la carga debe estar dentro del intervalo de 137 kPa/s a 343 kPa/s (84  $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{min}$  a 210  $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{min}$ ), equivalente para un diámetro estándar de 15 cm. Es permitido una velocidad mayor durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima esperada siempre y cuando durante la segunda mitad se mantenga la velocidad especificada.

Los resultados de las pruebas a compresión de los cilindros de concreto de alta resistencia se muestran en las tablas 3.4.1 y 3.4.2; los cuales fueron tomados para cada fecha indicada y como lo menciona la Norma Mexicana NMX-C-155-ONNCCE el concreto debe alcanzar la resistencia especificada a compresión ( $f'c$ ) a la edad de 28 días; además de cumplir con lo siguiente:

- 1.- Se acepta que no más del 10% del número de pruebas de resistencia a compresión, tengan valores inferiores a la resistencia especificada  $f'c$ .
- 2.- Se permite no más del 1% del promedio de pruebas de resistencia a compresión consecutivas, puede ser inferior a la resistencia especificada.
- 3.- Se requiere un mínimo de 30 pruebas.

**TABLA 3.4.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS A 7 DÍAS**

<b>Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC</b>									
<b><math>F'c</math> (kg/cm<sup>2</sup>): 490</b>									
<b>T.M.A. (mm): 19</b>									
<b>Rev. Proy. (cm): 0</b>									
<b>Curado empleado:</b>									
Fecha de Colado	Muestra N°	Rev. cm	<b>a 7 días</b>						
			t (kN)		Área en cm <sup>2</sup>		kg/cm <sup>2</sup>		Prom.
21-Dic-09	1	0	107.1	106.6	176.7	176.7	606	603	<b>604</b>
22-Dic-09	2	0	110.1	111.1	176.7	179.1	623	621	<b>622</b>
23-Dic-09	3	0	103.5	103.0	176.7	176.7	586	583	<b>584</b>
24-Dic-09	4	0	103.0	103.5	176.7	176.7	583	586	<b>584</b>
25-Dic-09	5	0	104.0	104.5	176.7	176.7	589	592	<b>590</b>
26-Dic-09	6	0	103.0	102.5	176.7	176.7	583	580	<b>581</b>
27-Dic-09	7	0	104.0	103.0	176.7	176.7	589	583	<b>586</b>
28-Dic-09	8	0	102.0	103.0	176.7	176.7	577	583	<b>580</b>
29-Dic-09	9	0	101.0	100.4	176.7	176.7	571	568	<b>570</b>
30-Dic-09	10	0	102.0	103.0	176.7	174.4	577	591	<b>584</b>
31-Dic-09	11	0	102.0	101.5	176.7	176.7	577	574	<b>576</b>
1-Ene-10	12	0	103.0	104.0	176.7	176.7	583	589	<b>586</b>
2-Ene-10	13	0	94.8	96.9	174.4	176.7	544	548	<b>546</b>
3-Ene-10	14	0	103.5	103.0	176.7	176.7	586	583	<b>584</b>
4-Ene-10	15	0	103.0	104.0	176.7	176.7	583	589	<b>586</b>
5-Ene-10	16	0	102.0	103.0	176.7	176.7	577	583	<b>580</b>
6-Ene-10	17	0	104.0	103.5	176.7	176.7	589	586	<b>587</b>
7-Ene-10	18	0	102.0	101.5	176.7	176.7	577	574	<b>576</b>
8-Ene-10	19	0	105.0	104.0	176.7	176.7	594	589	<b>592</b>
9-Ene-10	20	0	101.5	102.5	174.4	176.7	582	580	<b>581</b>
10-Ene-10	21	0	99.9	99.4	176.7	176.7	566	563	<b>564</b>
11-Ene-10	22	0	100.4	99.9	179.1	176.7	561	566	<b>563</b>
12-Ene-10	23	0	104.0	103.0	176.7	176.7	589	583	<b>586</b>

**TABLA 3.4.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS A 7 DÍAS**

<b>Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC</b> <b>F'c (kg/cm²): 490</b> <b>T.M.A. (mm): 19</b> <b>Rev. Proy. (cm): 0</b>									
<b>Curado empleado:</b>									
Fecha de Colado	Muestra N°	Rev. cm	<b>a 7 días</b>						
			t (kN)		Área en cm²		kg/cm²		Prom.
13-Ene-10	24	0	104.0	103.0	176.7	176.7	589	583	<b>586</b>
14-Ene-10	25	0	102.0	101.5	176.7	176.7	577	574	<b>576</b>
15-Ene-10	26	0	97.4	95.3	176.7	174.4	551	547	<b>549</b>
16-Ene-10	27	0	103.0	102.0	179.1	176.7	575	577	<b>576</b>
17-Ene-10	28	0	101.5	102.0	176.7	176.7	574	577	<b>576</b>
18-Ene-10	29	0	99.9	100.4	176.7	176.7	566	568	<b>567</b>
19-Ene-10	30	0	103.0	101.5	176.7	174.4	583	582	<b>582</b>

**TABLA 3.4.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS A 28 DÍAS**

<b>Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC</b> <b>F'c (kg/cm²): 490</b> <b>T.M.A. (mm): 19</b> <b>Rev. Proy. (cm): 0</b>									
<b>Curado empleado:</b>									
Fecha de Colado	Muestra N°	Rev. cm	<b>a 28 días</b>						
			t (kN)		Area en cm²		kg/cm²		Prom.
21-Dic-09	1	0	131.0	130.0	176.7	176.7	742	736	<b>739</b>
22-Dic-09	2	0	123.9	123.4	174.4	176.7	710	698	<b>704</b>
23-Dic-09	3	0	122.4	124.4	176.7	176.7	693	704	<b>698</b>
24-Dic-09	4	0	126.4	125.4	176.7	176.7	716	710	<b>713</b>
25-Dic-09	5	0	130.5	129.5	176.7	176.7	739	733	<b>736</b>
26-Dic-09	6	0	129.5	129.0	176.7	176.7	733	730	<b>731</b>
27-Dic-09	7	0	126.4	125.4	174.4	176.7	725	710	<b>717</b>
28-Dic-09	8	0	123.4	124.4	174.4	179.1	707	695	<b>701</b>
29-Dic-09	9	0	122.4	122.9	179.1	176.7	683	695	<b>689</b>
30-Dic-09	10	0	122.4	121.9	176.7	174.4	693	699	<b>696</b>
31-Dic-09	11	0	122.4	121.9	176.7	176.7	693	690	<b>691</b>
1-Ene-10	12	0	117.3	118.3	176.7	176.7	664	669	<b>667</b>
2-Ene-10	13	0	120.8	119.3	176.7	176.7	684	675	<b>680</b>
3-Ene-10	14	0	121.3	121.9	176.7	176.7	687	690	<b>688</b>
4-Ene-10	15	0	121.9	122.4	176.7	174.4	690	702	<b>696</b>

**TABLA 3.4.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS A 28 DÍAS**

<b>Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC</b>									
<b>F'c (kg/cm²): 490</b>									
<b>T.M.A. (mm): 19</b>									
<b>Rev. Proy. (cm): 0</b>									
<b>Curado empleado:</b>									
Fecha de Colado	Muestra N°	Rev. cm	<b>a 28 días</b>						
			t (kN)		Area en cm²		kg/cm²		Prom.
5-Ene-10	16	0	110.1	109.1	176.7	174.4	623	626	<b>624</b>
6-Ene-10	17	0	110.6	111.7	176.7	174.4	626	640	<b>633</b>
7-Ene-10	18	0	111.1	112.2	176.7	174.4	629	643	<b>636</b>
8-Ene-10	19	0	120.8	122.4	176.7	174.4	684	702	<b>693</b>
9-Ene-10	20	0	114.2	112.7	176.7	174.4	646	646	<b>646</b>
10-Ene-10	21	0	108.1	110.6	176.7	174.4	612	634	<b>623</b>
11-Ene-10	22	0	112.2	113.7	176.7	176.7	635	643	<b>639</b>
12-Ene-10	23	0	117.3	118.3	176.7	174.4	664	678	<b>671</b>
13-Ene-10	24	0	122.9	121.9	176.7	176.7	695	690	<b>693</b>
14-Ene-10	25	0	122.9	122.4	176.7	174.4	695	702	<b>699</b>
15-Ene-10	26	0	115.7	117.3	174.4	176.7	664	664	<b>664</b>
16-Ene-10	27	0	120.3	119.3	176.7	176.7	681	675	<b>678</b>
17-Ene-10	28	0	120.3	119.3	176.7	176.7	681	675	<b>678</b>
18-Ene-10	29	0	124.4	125.9	176.7	176.7	704	713	<b>708</b>
19-Ene-10	30	0	122.4	122.9	176.7	176.7	693	695	<b>694</b>

La resistencia a flexión o módulo de ruptura (rotura) de los durmientes de concreto de alta resistencia se ha explicado con más detalle en el capítulo anterior, en donde la Norma mexicana NMX-C-191, indica que la viga debe ser cargada en los tercios del claro o bien la Norma Mexicana NMX-C-303 que indica que la viga debe ser cargada en el punto medio; para el caso de los durmientes de concreto de alta resistencia, se utilizaron vigas con dimensiones de 15 cm de peralte por 15 cm de ancho y 50 cm de longitud restando 2.5 cm para los apoyos en cada extremo de la viga quedando el claro de la viga de 45 cm y fueron sometidas a carga a flexión en el centro de la viga . La resistencia a flexión de concreto de peso normal, es de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetro cuadrado; o bien, la resistencia a la flexión del concreto es aproximadamente del 10% a 23% de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetro cuadrado, dependiendo del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado.

Los resultados de la prueba a flexión son expresados en las tablas 3.4.3 y 3.4.4; los cuales fueron ensayados para las edades de 7 y 28 días, cabe mencionar que la mezcla en estudio es la misma que se utilizó para la prueba de compresión, correspondientes a las mismas fechas de colado.

**TABLA 3.4.3 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE MUESTRAS A 7 DÍAS**

Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC													
F'c (kg/cm <sup>2</sup> ): 490													
T.M.A. (mm): 19													
Rev. Proy. (cm): 0													
Fecha de colado	Muestra N°	Cantidad Fabricada Durmiente tipo		Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> ) a 7 días									
				Carga (kg)	Altura (cm)		Prom. (cm)	Ancho (cm)		Prom. (cm)	Long. (cm)	Mod. de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Prom.
		S	O		1	2		1	2				
21-12-09	1	31	0	4324	15.0	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	45.0	86.2	87.5
				4451	15.0	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1		88.7	
22-12-09	2	54	0	4492	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	15.1	45.0	89.2	90.4
				4607	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	15.1		91.5	
23-12-09	3	30	0	4320	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	86.4	87.8
				4456	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		89.1	
24-12-09	4	90	13	4506	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	15.1	45.0	89.5	90.9
				4610	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		92.2	
25-12-09	5	0	49	4418	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	88.4	89.0
				4480	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		89.6	
26-12-09	6	0	107	4360	15.0	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	45.0	86.9	86.4
				4297	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		85.9	
27-12-09	7	0	63	4482	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	89.6	90.1
				4539	15.0	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1		90.5	
28-12-09	8	0	45	4495	15.0	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	45.0	89.6	90.4
				4560	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		91.2	
29-12-09	9	0	100	4545	15.0	15.0	15.0	15.1	15.0	15.1	45.0	90.6	90.7
				4539	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		90.8	
30-12-09	10	0	48	4590	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	91.8	91.0
				4510	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		90.2	
31-12-09	11	0	107	4390	15.0	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	45.0	87.5	87.9
				4420	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		88.4	
01-01-10	12	0	119	4250	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	85.0	85.6
				4310	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		86.2	
02-01-10	13	0	106	2949	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	58.9	58.0
				2858	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		57.1	
03-01-10	14	0	162	3822	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	76.2	75.6
				3782	15.0	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0		75.1	

**TABLA 3.4.3 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE MUESTRAS A 7 DÍAS**

<b>Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC</b> <b>F'c (kg/cm²): 490</b> <b>T.M.A. (mm): 19</b> <b>Rev. Proy. (cm): 0</b>													
Fecha de colado	Muestra N°	Cantidad Fabricada Durmiente tipo		Resistencia (kg/cm²) a 7 días									
				Carga (kg)	Altura (cm)		Prom. (cm)	Ancho (cm)		Prom. (cm)	Long. (cm)	Mod. de ruptura (kg/cm²)	Prom.
		S	O		1	2		1	2				
04-01-10	15	0	148	3840	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	76.7	77.4
				3909	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		78.0	
05-01-10	16	0	90	3860	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	76.9	75.6
				3750	15.0	15.0	15.1	15.1	15.0	15.1		74.2	
06-01-10	17	132	0	3905	15.0	15.1	15.0	14.9	15.0	15.0	45.0	78.3	80.3
				4120	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		82.3	
07-01-10	18	49	0	4139	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	82.7	82.0
				4080	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		81.4	
08-01-10	19	101	0	3,840	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	76.4	76.9
				3,920	15.0	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0		77.5	
09-01-10	20	150	0	4,110	15.0	15.1	15.1	15.0	14.9	15.0	45.0	81.7	80.4
				3,980	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0		79.2	
10-01-10	21	60	0	2,976	15.1	15.1	15.0	15.0	14.9	15.0	45.0	59.8	57.7
				2,770	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		55.6	
11-01-10	22	0	146	3,146	15.1	14.9	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	62.6	61.3
				2,980	15.0	15.1	15.0	15.0	14.9	15.0		60.0	
12-01-10	23	0	104	3,216	15.0	15.0	15.0	15.1	14.9	15.0	45.0	64.7	62.3
				3,010	15.0	14.9	15.0	15.1	15.1	15.1		59.8	
13-01-10	24	0	97	3,420	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	68.3	69.9
				3,580	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		71.5	
14-01-10	25	59	48	3,510	14.9	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	70.0	70.9
				3,620	15.0	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0		71.9	
15-01-10	26	120	0	3,873	15.0	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	76.4	76.9
				3,928	15.2	15.2	15.0	15.2	15.2	15.2		77.4	
16-01-10	27	120	0	3,960	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	78.9	80.4
				4,120	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0		81.8	
17-01-10	28	120	0	3,910	15.2	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	78.1	77.2
				3,820	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		76.3	



**TABLA 3.4.3 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE MUESTRAS A 7 DÍAS**

Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC													
F'c (kg/cm <sup>2</sup> ): 490													
T.M.A. (mm): 19													
Rev. Proy. (cm): 0													
Fecha de colado	Muestra N°	Cantidad Fabricada Durmiente tipo		Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> ) a 7 días									
				Carga (kg)	Altura (cm)		Prom. (cm)	Ancho (cm)		Prom. (cm)	Long. (cm)	Mod. de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Prom.
					1	2		1	2				
18-01-10	29	60	0	3,720	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	74.2	74.8
				3,802	15.0	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0		75.5	
19-01-10	30	95	0	3,650	15.0	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	72.0	72.7
				3,720	15.1	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0		73.4	

**TABLA 3.4.4 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE MUESTRAS A 28 DÍAS**

Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC													
F'c (kg/cm <sup>2</sup> ): 490													
T.M.A. (mm): 19													
Rev. Proy. (cm): 0													
Fecha de colado	Muestra N°	Cantidad Fabricada Durmiente tipo		Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> ) a 28 días									
				Carga (kg)	Altura (cm)		Prom. (cm)	Ancho (cm)		Prom. (cm)	Long. (cm)	Mod. de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Prom.
					1	2		1	2				
21-12-09	1	31	0	5362	15.0	15.0	15	15.1	15.1	15.1	45.0	106.5	105.7
				5351	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1		104.9	
22-12-09	2	54	0	5624	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	111.7	110.6
				5495	15.0	15.0	15.0	15.1	15.0	15.1		109.5	
23-12-09	3	30	0	5017	15.0	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	99.7	101.1
				5130	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		102.6	
24-12-09	4	90	13	5120	15.1	15.1	15.1	15.1	15.0	15.1	45.0	100.7	102.4
				5203	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		104.1	
25-12-09	5	0	49	5120	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	101.7	100.9
				4990	15.0	15.0	15.0	15.0	14.9	15.0		100.1	
26-12-09	6	0	107	4848	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	96.3	95.7
				4790	15.0	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0		95.2	
27-12-09	7	0	63	5139	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	102.1	100.1
				4910	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		98.2	

**TABLA 3.4.4 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE MUESTRAS A 28 DÍAS**

Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC													
F'c (kg/cm <sup>2</sup> ): 490													
T.M.A. (mm): 19													
Rev. Proy. (cm): 0													
Fecha de colado	Muestra N°	Cantidad Fabricada Durmiente tipo		Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> ) a 28 días									
				Carga (kg)	Altura (cm)		Prom. (cm)	Ancho (cm)		Prom. (cm)	Long. (cm)	Mod. de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Prom.
					1	2		1	2				
28-12-09	8	0	45	4910	15.1	14.9	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	98.2	<b>97.3</b>
				4897	15.1	15.1	15.1	15.1	15.0	15.1		96.3	
29-12-09	9	0	100	4890	15.0	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	97.2	<b>97.9</b>
				4997	15.0	15.2	15.1	15.0	15.0	15.0		98.6	
30-12-09	10	0	48	4783	15.1	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	94.4	<b>95.3</b>
				4810	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		96.2	
31-12-09	11	0	107	4,695	15.0	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	45.0	93.6	<b>93.9</b>
				4,710	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		94.2	
01-12-10	12	0	119	4,620	15.0	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	45.0	92.1	<b>92.0</b>
				4,593	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		91.9	
02-12-10	13	0	106	3982	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	79.1	<b>78.5</b>
				3890	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		77.8	
03-12-10	14	0	162	4832	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	96.6	<b>94.3</b>
				4632	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0		92.0	
04-12-10	15	0	148	4450	15.0	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	88.4	<b>88.9</b>
				4503	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0		89.5	
05-12-10	16	0	90	5206	15.1	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	102.7	<b>101.2</b>
				5064	15.1	15.1	15.1	15.1	15.0	15.1		99.6	
06-12-10	17	132	0	4642	15.1	15.0	15.1	15.1	15.1	15.1	45.0	91.6	<b>91.1</b>
				4592	15.1	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0		90.6	
07-12-10	18	49	0	4691	15.1	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	45.0	92.6	<b>91.1</b>
				4510	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0		89.6	
08-12-10	19	101	0	4515	15	15	15	15	15	15	45.0	89.4	<b>88.9</b>
				4415	15	15	15	15	15	15		88.3	
09-12-10	20	150	0	4991	15	15	15	15	15	15	45.0	99.2	<b>97.4</b>
				4812	15	15	15	15	15	15		95.6	
10-01-10	21	60	0	3940	15	15	15	15	15	15	45.0	78.3	<b>77.9</b>
				3875	15	15	15	15	15	15		77.5	
11-01-10	22	0	146	4005	15	15	15	15	15	15	45.0	79.8	<b>79.5</b>
				3980	15	15	15	15	15	15		79.1	

**TABLA 3.4.4 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE MUESTRAS A 28 DÍAS**

Obra: Rehabilitación del Sistema de Vías del STC													
F'c (kg/cm <sup>2</sup> ): 490													
T.M.A. (mm): 19													
Rev. Proy. (cm): 0													
Fecha de colado	Muestra N°	Cantidad Fabricada Durmiente tipo		Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> ) a 28 días									
				Carga (kg)	Altura (cm)		Prom. (cm)	Ancho (cm)		Prom. (cm)	Long. (cm)	Mod. de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Prom.
					1	2		1	2				
12-01-10	23	0	104	4105	15	15	15	15	15	15	45.0	81.6	<b>79.8</b>
				3903	15	15	15	15	15	78.1			
13-01-10	24	0	97	4192	15	15	15	15	15	15	45.0	83.3	<b>80.0</b>
				3901	15	15	15	15	15	76.7			
14-01-10	25	59	48	4810	15	15	15	15	15	15	45.0	96.2	<b>95.3</b>
				4720	15	15	15	15	15	94.4			
15-01-10	26	120	0	4073	15	15	15	15	15	15	45.0	81.2	<b>81.0</b>
				4036	15	15	15	15	15	80.7			
16-01-10	27	120	0	4401	15	15	15	15	15	15	45.0	88.0	<b>87.9</b>
				4390	15	15	15	15	15	87.8			
17-01-10	28	120	0	4535	15	15	15	15	15	15	45.0	90.7	<b>91.5</b>
				4611	15	15	15	15	15	92.2			
18-01-10	29	60	0	4895	15	15	15	15	15	15	45.0	97.9	<b>98.0</b>
				4903	15	15	15	15	15	98.1			
19-01-10	30	95	0	4055	15	15	15	15	15	15	45.0	81.1	<b>79.7</b>
				3945	15	15	15	15	15	78.4			

Como se puede observar, el promedio de los especímenes números 13, 21, 22 y 23 sujetos a la prueba a flexión a 7 días, caen por debajo de la resistencia especificada de proyecto para esta prueba de flexión o módulo de ruptura, la cual es 65 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días. Se determinó que las causas probables para no alcanzar la resistencia de esas muestras a 7 días; pudo haber estado involucrado en primera instancia un mal curado de los especímenes, probablemente no fueron sometidos a la temperatura y el tiempo de curado necesario para las muestras de concreto y así alcanzar su resistencia; otra causa más que se considera es, un mala aplicación de la carga, es decir la rapidez con que la que fue efectuada la carga. Más sin embargo, considerando que la misma mezcla de prueba a 28 días, es alcanzado y superado por mucho, el módulo de ruptura especificado del proyecto de 65 kg/cm<sup>2</sup> a esta edad e incluso a la edad de 7 días se encuentra en un promedio alto de resistencia para esta edad, por lo que se alcanza el objetivo del proyecto, cumpliendo de esta forma con las especificaciones del proyecto de fabricación de durmientes de concreto de alta resistencia.

### 3.5 FACTORES QUE DETERMINAN LA CALIDAD

Existen diversos factores que pueden llegar afectar la calidad del concreto; fuera de lo que son las características de los componentes de la mezcla de concreto de alta resistencia, es decir las pruebas que controlan la calidad interna de la mezcla; como los son características del cemento, de los agregados, aditivos y cualquier otro factor que influya de manera interna en lo que es la matriz del concreto. Otros factores también afectan directamente la calidad del concreto de alta resistencia, pueden presentarse en la producción, la colocación, el transporte, el acabado hasta llegar finalmente al curado del concreto.

En el laboratorio, al ser ensayado el concreto de alta resistencia es necesario algunos cambios y presentar una mayor atención en los detalles, por mencionar algunos ejemplos, como el tipo de molde de los cilindros que es recomendable que sean de acero reutilizables o de plástico, el cabeceo usando compuestos adecuados para esta etapa del ensaye de los cilindros, el pulimento de las extremidades del cilindro es una recomendación para el cabeceo; incluso influyen las características físicas de la máquina de ensayo dado que pueden tener gran impacto en los resultados de las pruebas a compresión.

Una alternativa para conservar la calidad del concreto, puede ser un programa de control de calidad para la producción de concreto de alta resistencia tanto en la planta como en la obra, de esta forma se garantiza la producción y colocación del concreto de alta resistencia.

Las recomendaciones que son presentadas en este capítulo, bosquejan brevemente métodos y procedimientos para lograr buenos resultados en la mezcla de concreto de alta resistencia, en lo que se refiere a fabricación, su transporte, colocación, acabado y curado en la obra.

#### 3.5.1 FABRICACIÓN

La fabricación del concreto de alta resistencia consiste en producir una mezcla que tenga ciertas propiedades específicas, para que cumpla con los requisitos que sean requeridos en el diseño de cualquier estructura y permitir así un buen comportamiento en la construcción.

La fabricación del concreto de alta resistencia fundamentalmente consiste en las siguientes etapas:

- Dosificación
- Mezclado

La dosificación tiene como objetivo principal, la reproducción fiel de las proporciones en que intervienen los materiales en la mezcla; de la uniformidad de los componentes materiales en el momento de la dosificación, dependerá mucho la uniformidad y consistencia que se logre en el concreto.

Al llevar a cabo la dosificación se debe tener cuidado en algunas precauciones en los elementos que se van a emplear y que por lo general son:

1. Agregados: Se debe tener cuidado que éstos cumplan con los requisitos que son establecidos en el estudio granulométrico, también se deberá observar que no vayan a estar contaminados por alguna otra partícula, ya que esto repercutirá en la resistencia a compresión.
2. Cemento: Es de suma importancia para este material, el cuidado desde el momento en que es almacenado, debe procurarse que no exista ninguna humedad. Al tomar esta precaución se evitará que el cemento se hidrate y pierda de esta manera sus propiedades y características originales.
3. Agua: Como se ha mencionado, debe tenerse en consideración la calidad del agua, que no contenga impurezas que puedan interferir con el endurecimiento del cemento o que llegue a afectar de manera directa la resistencia por una mala medición de las cantidades requeridas e incluso se vea afectada la superficie del concreto en el acabado, a su vez que sea un agua de calidad que no afecte el acero de refuerzo.
4. Aditivos: Se deben considerar las cantidades a utilizar y el tipo de aditivo que vaya a ser empleado en la mezcla de concreto, ya que esto repercute en otras propiedades en relación a los materiales de la mezcla de concreto en su estado fresco y endurecido.

Por su parte, el mezclado consiste en incorporar íntimamente todos los materiales componentes del concreto, para formar una masa homogénea. Para llevar a cabo esta operación existen equipos de varios tipos y capacidades, los más comunes son de tambor giratorio con inclinación y espas pegadas en la pared interna que mueve los ingredientes, mejor conocidos como “trompos” y que son utilizados muy frecuentemente.

En esta etapa del mezclado se debe tener en consideración el tiempo de mezclado, el cual es medido a partir del momento en que todos los componentes del concreto están dentro de la mezcladora, a excepción de un 10% de agua. El tiempo de mezclado depende de la eficiencia, la velocidad, la rotación y capacidad de la revolvedora. El ACI y la ASTM especifican que en aquellos casos donde no se verifique la uniformidad de la mezcla, el tiempo de mezclado aceptable debe ser igual cuando menos 1 minuto en mezcladoras con una capacidad no mayor a  $0.73 \text{ m}^3$ .

El proceso de fabricación, la dosificación y el mezclado de la mezcla de concreto de alta resistencia se ilustra de la siguiente forma:

#### **PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LA MEZCLA PARA LOS CÍLINDROS DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA:**

1. En primer lugar, se debe considerar la calidad de los agregados fino y grueso; el agregado fino debe ser una arena limpia y dura, no debe tener residuos orgánicos, sales, arcillas u otros materiales extraños. La grava también debe ser limpia y dura; no debe tener porosidades, no debe tener sales, arcilla u otras materias extrañas adheridas. Deben ser colocados de forma uniforme en capas horizontales, es recomendable que al ser apilados se evite que rueden por pendientes fuertes para evitar de esta manera la segregación.

2. El agua debe ser almacenada en recipientes adecuados, no debe estar contaminada y no debe afectar la resistencia del concreto.
3. El cemento cuando está protegido puede mantener sus cualidades y así asegurar el máximo aprovechamiento de su calidad. Las bodegas deben ser lugares ventilados que impidan la acumulación de humedad, no se debe almacenar el cemento durante el invierno durante 30 días. En su caso si el cemento está almacenado en sacos, en largas estadías en la bodega, es recomendable rotar periódicamente la posición de los sacos y cubrirlos completamente con polietileno.
4. Una vez tomado estas precauciones, se procede a la toma de muestras de los agregados fino y grueso, cabe mencionar que para el agregado grueso es recomendable al llenar la carretilla, tomar con la pala muestras en diferentes puntos del lugar donde se encuentra apilada el agregado fino o grueso, de esta manera se asegura que habrá una proporción de tamaño del agregado grueso, recomendable para la elaboración del concreto.
5. Los agregados son vaciados sobre un área limpia y se revuelven para formar una muestra homogénea.
6. A continuación el material se extiende y se divide en cuatro partes haciendo un corte en cruz, se eliminan las dos partes opuestas y se limpian los excedentes de las dos partes eliminadas.
7. Las dos partes restantes se revuelven nuevamente, se extiende el material y se repite la operación de cuarteo, para dejar una cantidad suficiente para su análisis, quedando dos sacos para la grava y uno para la arena.
8. La medida de los agregados se debe considerar en estado seco.
9. En esta etapa de la fabricación se considera la cantidad de cemento que ha sido diseñada para el proporcionamiento, debe ser medido por sacos de cemento o en su caso en una balanza, no es recomendable medirse en volumen dado que su densidad aparentemente es variable.
10. La cantidad de agua que ha sido diseñada para el proporcionamiento, debe considerar la humedad de los agregados y al ser agregado al trompo no es recomendable hacerlo con manguera sino con recipientes de 10 ó 15 lt. Para el control de la cantidad de agua y cumplir con la trabajabilidad del concreto, se utiliza el cono de Abrams; la cantidad de agua influye directamente en la resistencia.
11. Para el mezclado manual se debe tener en el laboratorio un área específica y limpia para realizar el mezclado del concreto o bien se puede tener una placa metálica de 5 mm de espesor; a continuación se vacía la arena y se extiende se le agrega el cemento distribuyéndolo y se revuelve hasta que se obtenga una perfecta uniformidad, una vez logrado esto se agrega el agregado grueso y se revuelve con la mezcla uniforme de arena y cemento, posteriormente una vez mezclado estos tres componentes adecuadamente, se agrega el agua en toda la mezcla en una sola vez, no es recomendable agregar el agua parcialmente a medida que se va revolviendo. Se revuelve hasta tener una masa uniforme, no se recomienda dejar pasar más de media hora entre la preparación y la colocación de la mezcla, no se debe agregar más agua para ablandarla.
12. Si se usa un tambor giratorio con aspas mejor conocido como “trompo”, cuando se prepara la primera amasada se disminuye un 50% de la grava de la dosificación, permitiendo así que parte del mortero de la mezcla quede pegado a las paredes del trompo. Se carga el 90% del agua de mezclado.
13. Posteriormente a la primera amasada, se agrega toda la mezcla de arena y cemento y el otro 50% de grava y el 10% de agua restante. Se debe considerar el número total de revoluciones por minuto del trompo para obtener un concreto uniforme desde el comienzo hasta el final de la descarga. El mezclado lento demoran la fabricación de la mezcla y si se hace el mezclado rápido segregan el

concreto pegándolo a las paredes del trompo. El concreto debe salir con la trabajabilidad requerida, si esto no sucede se debe devolver el concreto al trompo y revolver nuevamente. En caso de que sea necesario agregar más agua en el interior del trompo se debe considerar el efecto que tendrá en las características de la mezcla en estudio; nunca se debe agregar agua al concreto que está en la carretilla.

14. En el siguiente paso del procedimiento, se hace la prueba de revenimiento, se vacía el concreto dentro del cono de Abrams, previamente limpiado con agua, y se llena en tres capas de igual altura, apisonando cada una de las capas con 25 golpes de la varilla teniendo cuidado que esta penetre en la capa anterior. Una vez llenado el cono, se enrasa la parte superior y se limpia los excesos de concreto derramados en la plancha metálica; se levanta verticalmente y cuidadosamente el cono y se coloca al lado del concreto moldeado y se mide la diferencia de altura entre el cono y el concreto, colocando la varilla horizontalmente sobre el cono y efectuando una sola medición en el eje central del llenado.

A su vez, el mezclado del concreto se puede llevar acabo de diversas maneras dependiendo de las necesidades de las condiciones de uso, de la ubicación del sitio de colocación, las condiciones del clima, el tiempo de entrega; por esta razón se han desarrollado métodos de mezclado que se adaptan a estas condiciones mencionadas. Entre las diversas maneras de mezclado del concreto que se mencionarán a continuación de forma breve son, el mezclado estacionario, concreto premezclado y el mezclado en mezcladora continua.

- Mezclado estacionario.- En ocasiones el concreto requiere ser mezclado en la obra y uno de los métodos para esta función es a través de una mezcladora estacionaria. Se debe considerar una cuidadosa atención en relación al tiempo de mezclado requerido, muchas especificaciones requieren un tiempo mínimo de mezclado de 1 minuto más 15 segundos para cada metro cúbico; a menos que se tenga información que periodos más cortos, son aceptables y que pueden producir una mezcla de concreto uniforme. Este periodo de mezclado empieza a partir del momento en que el cemento y los agregados estén en el tambor y desde que toda el agua sea integrada antes que transcurra un cuarto del tiempo de mezclado (ACI 304R.00). Esta misma norma recomienda que bajo condiciones normales, hasta un 10% del agua de mezcla debe ser agregada al tambor antes que los materiales sólidos; el agua restante debe ser adicionada de manera uniforme con los materiales componentes del concreto y dejando otro 10% para ser añadido después de que estén dentro del tambor todos los materiales sólidos.
- Concreto premezclado.- Los concretos de alta resistencia pueden ser mezclados en la obra en un camión mezclador, sin embargo debe considerarse que cuando la mezcla de concreto de alta resistencia tiene un bajo revenimiento, no todos los camiones mezcladores pueden mezclar el concreto. En el caso de los concretos premezclados de alta resistencia, se debe tener un cuidadoso control de obra en las operaciones a fin de evitar que los camiones mezcladores permanezcan tiempo innecesario en el sitio de la obra debido a las longitudes de las operaciones de colocación.

En estos casos la adición de un aditivo retardante, pudiera ser empleado para prolongar el tiempo que el concreto deberá responder a la vibración después que ha sido colocado en la cimbra o moldes, otra recomendación sugiere que se retenga algo del agua de mezclado hasta que los camiones lleguen al sitio de la obra; después de añadir el agua remanente se deberá efectuar 30 revoluciones a la velocidad de mezclado a fin de incorporar la totalidad de agua en la mezcla de manera adecuada, como lo establece el ACI 304.

Cuando las pérdidas de asentamiento o trabajabilidad no pueden ser evitadas con las medidas indicadas, la dosificación y el mezclado total, deberán efectuarse en el sitio de la obra. Siguiendo las recomendaciones para mezclado en camión, la norma ASTM C 94 indica que la máxima capacidad de mezclado del camión no deberá ser excedida; el volumen del concreto no deberá exceder el 64% del volumen total del tambor.

Esta norma también menciona que para determinar si el mezclado es adecuado, se observa que las variaciones en el asentamiento durante la descarga indican un pobre mezclado; por ejemplo si el asentamiento cambia unos centímetros o pulgadas del comienzo al fin de la tanda durante una carga continua, ello es un índice que el concreto no se ha mezclado adecuadamente.

- Mezcladora continua.- Este tipo de mezcladoras son camiones especiales que dosifican por volumen; el mezclador volumétrico para concreto es una mezcla de un camión revolver y una planta dosificadora móvil para concreto, se encuentra montado sobre un camión para que de esta manera se pueda operar de forma móvil o en una estructura para operar de forma estacionaria. El mezclador tiene compartimientos independientes para cada material, de manera que el mezclado del concreto se produce en forma continua o intermitente, en el sitio donde la mezcla va a ser colocada. El diseño de la mezcla es calculado para una resistencia específica o propiedades específicas de acabado, fraguado, trabajabilidad. La mezcla es proporcionado de acuerdo a las cantidades de los volúmenes conocidos en el diseño de la mezcla, los ingredientes son adicionados y es mezclado usando un sistema a través de helicoide, posteriormente una cantidad de agua es añadida para realizar el mezclado; una vez en la tolva de descarga, el helicoide mezcla rápida y continuamente los ingredientes, produciendo una descarga uniforme de concreto.

### 3.5.2 TRANSPORTE

El medio de transporte de los durmientes de alta resistencia durante todo su proceso de fabricación, es básicamente por medio de montacargas; se estiban para proceder a la etapa de curado. Una vez que hayan sido sometidos a la etapa de curado y que se encuentren en condiciones para ser cargados al camión transportador, los durmientes son trasladados de igual forma por medio de montacargas, de manera que en la maniobrabilidad no resulten golpeados, dañados o fisurados. Por lo tanto el operador del montacargas debe ser una persona capacitada para dicho traslado, evitando cualquier maniobra que dañe o perjudique la estructura, dado que un mal manejo del montacargas podría influir en fisuras o daños severos a los durmientes de alta resistencia, por lo que la capacidad de los durmientes se vería afectada y no cumpliría con las especificaciones establecidas. De esta manera, el manejo y transporte de los durmientes de concreto de alta resistencia dentro del patío de maniobras de la planta de producción es por medio de montacargas hasta su lugar de origen para su colocación.





Los procedimientos de transporte a ser empleados en el proceso de puesto en obra de los concretos de alta resistencia, no son diferentes en principio de aquellos empleados para concreto convencionales, por ello se recomienda seguir las recomendaciones del Comité ACI 304.

Dentro de otras consideraciones generales, se mencionan que el concreto de alta resistencia puede ser transportado en cualquier equipo de los empleados para transportar concreto de resistencia normal, por una variedad de métodos y equipos, tales como camiones mezcladores, camiones estacionarios con o sin agitador, tuberías o mangueras o fajas transportadoras. Cada tipo de transporte tiene sus ventajas y desventajas específicas dependiendo de las condiciones de uso, ingredientes mezclados, accesibilidad y ubicación del sitio de colocación, capacidad requerida y tiempo disponible para la entrega y condiciones de clima. Después de la descarga, el equipo debe ser limpiado en la misma forma que para un concreto convencional; el camión debe ser limpiado muy pronto después de la descarga. (Ver apartado de Tablas y Gráficas; Tablas 7 y 8 Métodos y equipos para el transporte y manejo del concreto).

- Carretillas y vagonetas, manuales o mecanizadas.- Se usan para trasladar volúmenes reducidos en distancias cortas, se requiere utilizar ruedas neumáticas y habilitar vías de tránsito; la distancia máxima de entrega para el equipo mecanizado es de 120 m y para equipos manuales de 60m.
- Concreto mezclado en camión.- Es un proceso en el cual los materiales para concreto adecuadamente proporcionados en una planta dosificadora son transferidos en un camión mezclador en el cual todo el proceso de mezclado se efectúa. El camión es usado para transportar el concreto al sitio de la obra; algunas veces los materiales secos son transportados a la obra en el tambor del camión con el agua de mezclado separada en un tanque montado en el camión, el agua es añadida y el mezclado es completado. El método implica una solución a largas distancias y demoras en la colocación; es adaptable a la producción de concreto de alta resistencia cuando es deseable retener la trabajabilidad tanto como sea posible y siguiendo la recomendación de la ASTM C94 indica que no debe exceder el 64% del volumen total del tambor. También recomienda generalmente de 70 a 100 revoluciones para la velocidad de mezclado y como máximo 300 revoluciones; si transcurre más tiempo después del mezclado y antes de la descarga, la velocidad del tambor debe disminuirse o en su caso debe ser detenido; entonces antes de la descarga la mezcladora debería operar a una velocidad de mezclado en aproximadamente 30 revoluciones para mejorar la uniformidad. Como la mezcla, la agitación y la velocidad es variable para cada camión mezclador, la norma requiere de que estas velocidades, la agitación de la mezcla y la capacidad del tambor aparezca en una placa como especificación para su uso
- Camiones estacionarios con o sin agitador.- Las unidades empleadas en esta forma de transporte generalmente consisten de un cuerpo abierto en la coronación, montado sobre un camión. El cuerpo metálico generalmente es diseñado para descargar el concreto por la parte trasera cuando es inclinado; una compuerta de descarga y un vibrador son previstos en el punto de descarga, el plazo máximo de entrega es de 30 a 45 minutos aunque por las condiciones climáticas puede ser que se requiera más tiempo. Este tipo de camiones se usan en las plantas mezcladoras, donde el transporte es corto y rápido, de igual manera la colocación es rápida para grandes volúmenes de concreto.

- Fajas transportadoras.- El empleo de fajas para transportar el concreto no es novedoso en las construcciones; el sistema de transporte deberá ser adecuadamente soportado para obtener un transporte suave y sin vibraciones a lo largo de la faja; el ángulo de inclinación deberá ser controlado para eliminar la tendencia del agregado grueso a segregar la cantidad de concreto. Las distancias para el transporte del concreto que tiene un rango de revenimiento entre 25 a 100 mm, varían entre los 60 y 90 metros, dado que distancias mayores o extensión en los lapsos de tiempo de colocación deberán significar pérdidas de revenimiento y trabajabilidad. Se pueden emplear coberturas para proteger el transportador contra lluvias, viento, sol o temperaturas ambiente extremas, a fin de evitar cambios en el revenimiento o la temperatura misma del concreto; finalmente como todos los métodos de transportación del concreto de alta resistencia, es un adecuado planeamiento, distribución y control.
- Bombas neumáticas o de pistones.- Su desempeño es satisfactorio con mezclas cohesivas con revenimiento entre 9 cm y 15 cm.

### 3.5.3 COLOCACIÓN

Existen diversas formas de trasladar el concreto de la revolvedora a la cimbra, todas pueden producir un buen concreto cuando son debidamente usadas, pero a su vez la mayoría puede ser mal empleada y producir un concreto pobre en cuanto a calidad ya colocado. El método de entrega idóneo es aquel que coloque el concreto lo más cerca de su posición final o en la misma cimbra si es posible.

La colocación tiene importancia en su ejecución con el propósito de asegurar los requerimientos de resistencia, impermeabilidad y durabilidad del concreto; el objetivo de la colocación es colocar el concreto lo más cerca posible, evitando la segregación y permitiendo a su vez la compactación. Para lograr una colocación adecuada existen recomendaciones como las que se mencionan a continuación:

- Evitar el palear a mano y mover el concreto por inmersión.
- El concreto debe colocarse en capas uniformes, no en montones o capas desniveladas.
- El espesor de una capa debe ser compatible con el método de vibración, de manera que el aire que se encuentra atrapado pueda ser removido del fondo de cada capa.
- Cuando se requiera un buen acabado y un color uniforme en columnas y muros, la cimbra debe ser llenada a razón de, por lo menos, 2 m por hora, evitando demoras prolongadas, que resultan en la formación de las juntas frías.
- Cada capa debe quedar totalmente compactada antes de colocar la siguiente, deben ser colocadas cuando la capa inferior esté aún plástica, para lograr una construcción monolítica.
- Evitar el choque entre el concreto y la cimbra o el acero de refuerzo, se recomienda para secciones profundas un tubo largo hacia abajo o un tremie, para asegurar la precisión en la ubicación del concreto y conseguir una segregación mínima.



El método más común para la colocación del concreto es el canal de la revolvedora, puede brindar grandes resultados cuando es usado adecuadamente; si el canal se encuentra en una posición demasiado horizontal o es muy largo, el concreto deberá de tener un mayor contenido de agua para poder fluir, pero por su lado la calidad se verá afectada significativamente. Por ejemplo el uso de “buggies” o carretillas motorizados es fácil y rápido, pero pueden originar algunos problemas al expeler algunos gases, tanto para los trabajadores, como para el concreto si no son rápidamente eliminados del área de la construcción; en su caso los trabajadores pueden estar respirando mucho monóxido de carbono y muy poco aire, en el concreto la superficie puede ser dañada por la carbonatación que es ocasionada por los gases.

Los concretos de alta resistencia en muchos casos deberán ser adecuados para ser bombeados, se pueden usar bombas que puedan manejar bajos revenimientos y proporcionar alta presión al bombeo. Los concretos de alta resistencia a ser bombeados deberán tener un alto contenido de material cementante y un tamaño máximo del agregado pequeño, dado que ambos factores facilitan el bombeo. En el sitio de la obra, la bomba debe ser colocada lo más cerca del área de colocación del concreto como sea posible, la línea de bombeo deberá ser colocada con un mínimo de torceduras, empleando líneas y tuberías flexibles o mangueras alternadas a fin de que su colocación sea adecuada en la cimbra sin la necesidad de que su colocación sea manipulada con algún otro método. La comunicación directa es esencial entre el operador de la bomba y el responsable de la colocación; el bombeo continuo es deseable debido a que si la bomba es parada, los movimientos del concreto en la línea pueden ser más difíciles o imposibles cuando se comienza nuevamente.

La pérdida de aire entre el canal de la revolvedora y la descarga de la bomba llega a ser un problema en algunas construcciones; diferentes bombas han tenido diferentes pérdidas de aire, aún en el mismo proyecto; se desconoce si esto está relacionado con el tipo de bomba o con la distancia entre el punto más alto de la línea de bombeo y la descarga, es recomendable vigilar este problema que se puede llegar a presentar.

Los cangilones de concreto movidos por grúa son muy comunes en la construcción de puentes y edificios de gran altura; son buenos y la mezcla no requiere modificaciones especiales, los dos únicos problemas que se pueden presentar en su uso son el vaciar todo el concreto, esto quiere decir vaciar todo en un solo lugar y dejarlo caer desde una gran altura; para estos casos se sugiere usar una “trompa de elefante” en la descarga del cangilón. Los cangilones deben ser de paredes verticales o de cantos muy empinados, con el objeto de evitar la segregación; una importante precaución de seguridad es no permanecer debajo del cangilón.

El ingeniero responsable de la colocación del concreto de alta resistencia debe ser consciente que, al inicio del trabajo y durante el mismo se pueden presentar situaciones anormales, las cuales requieren algunos aspectos de preparación que no pueden ser realizados en el último minuto en que el concreto es colocado. Por otra parte, la preparación deberá ser hecha para transportar, colocar, consolidar y acabar el concreto en el menor tiempo posible; ello obliga en primer lugar, a entregar el concreto en obra inmediatamente después de su arribo, especialmente las primeras tandas. Durante la colocación no se debe añadir agua al concreto para mejorar o conservar su trabajabilidad, dado que, al igual que los concretos convencionales, demasiada agua reduce la resistencia y la durabilidad.



El equipo para la colocación deberá tener la capacidad adecuada para cumplir su función de manera eficiente a fin de evitar los tiempos perdidos en la obra. Para la etapa de consolidación deberá contarse en obra con equipo adecuado de vibración y personal capacitado para poder consolidar el concreto sin problemas en las áreas difíciles.

Cualquier falla o demora en la colocación del concreto de alta resistencia que paren o hagan más difícil la operación del concreto pueden afectar seriamente la calidad del trabajo. Siempre debe recordarse que la operación de colocación de concretos de alta resistencia, puede ocasionar varios problemas, especialmente en climas cálidos, cuando el equipo vibrador falla y el equipo de reserva es inadecuado; también debido a la rápida pérdida del asentamiento las precauciones sobre el equipo vibrador deberán ser mayores, de acuerdo a ello deberá considerarse tener en reserva un número de vibradores, por lo menos uno por cada tres que estén en uso.

Para el caso de los durmientes de concreto de alta resistencia, la colocación y la compactación fue por medio de la mesa vibratoria, la cual proporciona una forma confiable de compactación para unidades de concreto precolado y tiene la ventaja de asegurar una vibración uniforme. Este sistema puede considerarse como un caso de cimbra o encofrado fijo al vibrador, siendo lo opuesto a un vibrador externo, aunque el principio de vibración de concreto y cimbra juntos es el mismo. Generalmente, un peso excéntrico de rotación rápida hace vibrar la mesa con un movimiento circular pero, al tener dos ejes que rotan en direcciones opuestas, la componente horizontal de la vibración puede ser neutralizada, de modo que la mesa vibratoria transmite un movimiento sólo en dirección vertical. Una mesa vibratoria de amplitud variable y de frecuencia variable, es deseable cuando se tiene unidades de vibración que varían de tamaño y para uso de laboratorio; aunque en la práctica la frecuencia varía rara vez.

Lo ideal es usar un incremento en la frecuencia y una amplitud decreciente a medida que avanza la consolidación del concreto, ya que el movimiento inducido debe corresponder al espaciamiento de las partículas, una vez que ha ocurrido la compactación parcial; una vibración de amplitud demasiado grande en relación con el espacio entre partículas, da por resultado un concreto en estado fluido, por lo que nunca se logra la compactación total; desafortunadamente no es posible predecir las amplitudes y frecuencias requeridas para una mezcla determinada.

Finalmente se puede recalcar que una planeación anticipada puede ser de gran ayuda en la elección del método más apropiado para el manejo y transporte del concreto, dado que esto incurre en la calidad del trabajo; además que se puede evitar de esta manera tres factores como lo son los retrasos, el endurecimiento del concreto y la segregación.

Es por esto que el objetivo de la planeación en cualquier programa de trabajo, es realizarlo con rapidez, con el menor esfuerzo laboral y con el equipo de trabajo adecuado; más aún cuando hoy en día las máquinas de transporte y manejo siguen mejorando para el mejor aprovechamiento de estos y dar una mejor calidad al trabajo realizado. La productividad deseada será alcanzada si se planea el trabajo para aprovechar el trabajo en conjunto del trabajo del personal y de los equipos para evitar los retrasos durante el transporte y la colocación del concreto.

Otro factor que debe considerarse dentro del programa de trabajo es el endurecimiento del concreto que ocurre al momento en que se mezclan los componentes del concreto, se puede colocar y compactar en un periodo de 1 ½ hora después del mezclado, a no ser que las condiciones de temperatura sean elevadas o el contenido de cemento aceleren la hidratación; es por esto que en la planeación se deben eliminar o minimizar las variables que puedan permitir el endurecimiento del concreto a tal grado que no se logre una consolidación completa y que vuelva el acabado difícil. Y como se ha venido considerando a lo largo en los métodos de mezclado, transporte y colocación; la segregación es otro factor que hay que evitar durante todo el proceso de trabajo del concreto, dado que la segregación es la tendencia de la separación del agregado grueso del mortero de cemento y el agregado fino; esto nos indica que en parte de la mezcla tiene poca cantidad de agregado grueso y el resto de la mezcla tiene una cantidad excesiva. Esto se ve reflejado en la mezcla, en donde la parte que tiene menos agregado grueso comienza a retraerse y fisurarse más y provocando poca resistencia a la abrasión; en tanto que la parte con cantidad excesiva de agregado puede ser muy áspera, dificultando la consolidación y acabado, siendo esta una causa común del surgimiento de agujeros.

### 3.5.4 ACABADO Y CURADO

#### ACABADO

Para los durmientes de concreto de alta resistencia no se llevo a cabo ningún tipo de acabado en especial, dado que el método de vibrado es adecuado para no formar oquedades. Una vez que se quita la cimbra o molde, la superficie del concreto prácticamente es limpia y lisa y por lo tanto no requiere someterse a ningún otro proceso para mejorar la apariencia de las superficies cimbradas. Sin embargo, para la consolidación del concreto y para eliminar la concentración de agregado grueso, oquedades y aire atrapado existen diversos métodos que ayudan a un buen acabado del concreto; los métodos de consolidación empleados para la fabricación de durmientes fueron la vibración interna y externa.

Para la consolidación o compactación del concreto pueden usarse métodos manuales o mecánicos, esto depende de la consistencia de la mezcla de concreto y de las condiciones de colocación, así como la forma de la cimbra y el espaciamiento del acero de refuerzo. Un método mecánico muy común que ayuda a obtener y mejorar el acabado de la superficie del concreto es por medio de vibración interna o externa, algunas mezclas trabajables y fluidas pueden ser consolidadas por medio de varillado manual, donde la varilla debe ser lo suficientemente larga para alcanzar el fondo de la cimbra y lo suficientemente delgada para que pase fácilmente entre el acero de refuerzo y la cimbra. Para mejorar la superficie del concreto puede emplearse un azadón, se debe insertar y retirar varias veces junto a la cimbra, de esta forma el agregado grueso es removido para evitar que concentre en las orillas de la cimbra, además que el azadón provoca que el aire suba y pueda escapar por la superficie.

El ACI 363R menciona que la vibración interna es el método más efectivo para la consolidación del concreto de alta resistencia, dado que la fricción interna entre las partículas del agregado se anula temporalmente y el concreto se comporta como un líquido o en su caso, evita la concentración de los agregados.

Los vibradores internos o de inmersión, no deben ser usados para mover el concreto horizontalmente ya que pueden llegar a provocar segregación, debe bajar verticalmente en el concreto con espaciamientos regulares, penetrando hasta el fondo de cada capa que se esté colando, se recomienda que cada capa sea aproximadamente la longitud de la cabeza del vibrador o generalmente no superior a 50 cm en cimbras regulares.

Para otras aplicaciones tales como losas delgadas, el vibrador se debe insertar inclinando o de manera horizontal, a fin de que se mantenga inmersa la cabeza del vibrador, sin embargo no debe ser arrastrado el vibrador en la losa por lo ya mencionado anteriormente que puede provocar segregación. Una adecuada vibración se juzga por la experiencia y por los cambios en la apariencia de la superficie del concreto; los cambios que se deben observar son la inmersión de agregado grueso o partículas grandes del agregado, la nivelación general de la superficie, la aparición de una película fina de mortero sobre la superficie y la interrupción de la subida de aire atrapado.

Para los durmientes de alta resistencia, se uso la vibración interna así como la externa a base de una mesa vibratoria. Los vibradores de cimbras diseñados para que sean fijados con seguridad son útiles para consolidar el concreto en elementos estructurales que son delgados o están muy congestionados con refuerzo, incluso para suplementar la vibración externa y para mezclas rígidas como es el caso de la mezcla de los durmientes de concreto de alta resistencia.

Estos vibradores deben estar espaciados para distribuir de manera uniforme toda intensidad de la vibración, en ocasiones se recomienda para mejores resultados, frecuencias de vibración diferentes. Este tipo de método de vibración como lo es la mesa vibratoria puede causar un movimiento hacia adentro y afuera que puede crear un hueco entre el concreto y la cimbra, es por esto que para los durmientes de concreto se empleó también vibradores internos.

Es muy común el uso de las mesas vibratorias en plantas de elementos prefabricados (premoldeados, precolados); deben estar equipadas con controles de frecuencia y amplitud, de acuerdo al tamaño del elemento a colocar y de la consistencia del concreto, las mezclas rígidas requieren frecuencias bajas pero amplitudes mayores, de esta forma se mejora la consolidación del concreto. Para minimizar efectos sobre la superficie del concreto El ACI 309R, recomienda:

- El período de vibración sea suficiente
- Las inmersiones del vibrador deben ser separadas
- El concreto debe ser vibrado de abajo hacia arriba
- Detalles de diseño y formas complejas deben evitarse
- La profundidad de las capas deben ser limitadas
- El vibrador debe penetrar en la capa anterior a la que se está colocando

Algunos defectos causados por falta de vibración o una vibración excesiva son:

- Agujeros.- Que resultan cuando el espacio entre las partículas no se llena con mortero y pueden ser provocados por una excesiva cantidad de agregado grueso o congestión entre el acero de refuerzo.
- Aire atrapado.- También se puede producir otro defecto tal como la cantidad excesiva de aire atrapado que es similar a los agujeros pero no es tan severa y por lo general son producidos por los equipos de vibración.
- El rayado de arena.- Se da cuando el sangrado o exudación excesiva retira el mortero a lo largo de la cimbra, puede ser causado por el contacto del equipo vibrador con el acero de refuerzo. Las mezclas ásperas con poca trabajabilidad por falta de mortero o agregado fino puede causar el rayado de la arena.
- Juntas frías.- Son mejor conocidas como discontinuidades resultantes del retraso en la colocación que permite que una capa se endurezca antes de la capa adyacente; estas discontinuidades pueden reducir la integridad estructural del elemento en estudio si las capas sucesivas no se unen adecuadamente.
- Líneas de colocación.- Se conocen también como líneas de vertido, son oscuras entre la colocación de amasadas (revolturas) adyacentes. Ocurren si durante la vibración de la capa superior, el vibrador no penetra en la capa inferior para que se entrelacen las capas.
- El agrietamiento.- Puede ocurrir al momento del asentamiento del concreto cerca del inicio del fraguado, cuando se sedimenta o asienta sobre el acero de refuerzo, en elementos profundos que no hayan sido vibrados adecuadamente.
- Segregación.- Esto ocurre por una excesiva vibración, dado que el agregado más pesado se sedimenta, mientras que los más ligeros suben.
- Pérdida de aire.- Una mala vibración puede ocasionar este fenómeno.
- Flecha o deflexión.- Causada también por una mala colocación del concreto así como de su vibración, pueden dañar la cimbra.
- Falla de cimbra.- Comúnmente ocasionada por la presión excesiva de la vibración en un solo lugar por mucho tiempo o por una elevada velocidad de colocación del concreto.

Otras formas del acabado del concreto son bien conocidas tales como la nivelación o enrasado, el aplanado, el bordeado y juntado, emparejado, el alisado y el escobillado; las cuales se mencionarán a continuación de manera general.

- Nivelación: Conocido como el proceso de corte del exceso de concreto para que la superficie quede en el nivel apropiado. Se utiliza el método manual de la regla, la cual puede tener el borde inferior recto o ligeramente curvado, dependiendo de la superficie. Las reglas a veces están equipadas con vibradores que consolidan el concreto que ayudan y facilitan el enrasado. La combinación de reglas y vibradores se conocen como plantillas vibratorias.

- **Aplanado:** Se utiliza una llana inmediatamente después del enrasado para eliminar los puntos altos y bajos y embeber las partículas grandes de agregado. El aplanado debe ser completado antes de que el agua de sangrado se acumule sobre la superficie, se puede utilizar una flota de mango largo en donde se presente un área grande y no se puede tener acceso con una de mango corto; frecuentemente se utilizan reglas de autopistas para que se obtengan superficies muy planas. Por su parte, estas herramientas pueden ser de madera, pero cuando el concreto tenga aire incluido debe ser de una aleación de aluminio o magnesio. Una vez que el concreto empiece a endurecerse ligeramente o cuando el brillo del agua de sangrado haya desaparecido y el concreto pueda soportar la presión provocada por los pies con un hundimiento de 6 mm la superficie está lista para acabados adicionales si es que se requieren.
- **Bordeado y junteado:** En ocasiones se requiere el bordeado a lo largo de todo el borde de la cimbra y de las juntas de aislamiento y construcción de los pisos y losas externas, tales como paseos (calzadas, andenes, veredas, caminos), pavimentos y patios. Este tipo de acabado densifica y compacta el concreto cerca de las cimbras, donde el alisado y el emparejado son menos efectivos, disminuyendo el descascaramiento y la fragmentación. Las prácticas adecuadas de junteado pueden eliminar fisuras antiestéticas. Las juntas de control o de contracción se llevan a cabo con una acanaladora manual.
- **Emparejado:** Después del bordeado y del junteado, el concreto debe ser emparejado, con una llana manual o con una máquina para acabado equipado con cuchilla pala de emparejar. Cabe mencionar que el objetivo del emparejado es insertar partículas del agregado que estén cerca de la superficie, así como mover imperfecciones, salientes y vacíos, también ayuda a compactar el mortero en la superficie como preparación para otras operaciones de acabado. Este tipo de acabado produce una textura relativamente uniforme pero rugosa, que tiene buena resistencia a resbalones y se usa en general como acabado final, principalmente en losas externas.
- **Alisado:** Cuando se desea tener una superficie suave, dura y densa, después del emparejado se prosigue por el alisado con cuchara metálica, es importante que el alisado no se lleve a cabo sobre una superficie que no haya sido emparejada; es muy común que después en losas que se haga el emparejado y enseguida el alisado pero esta operación se debe hacer hasta que el concreto haya secado lo suficiente para que el material fino y el agua no se disloquen hacia la superficie.
- El emparejado y alisado prematuros pueden resultar en descascaramiento, fisuración y una superficie con menor resistencia al desgaste. También es importante mencionar que no es recomendable esparcir cemento seco sobre la superficie húmeda con la intención de absorber el exceso de agua, ya que esto puede causar fisuración; también es de consideración conocer que el concreto exterior no se debe de alisar porque puede llevar a la pérdida de aire incluido causada por el exceso de acabado de la superficie y la superficie alisada puede ser resbaladiza bajo condiciones húmedas.



- Cepillado: Mejor conocido como escobillado, se debe realizar antes de que el concreto haya endurecido en su totalidad, pero se debe llevar a cabo cuando esté lo suficientemente duro, de manera que pueda mantener el grabado del cepillado, produciendo así una superficie resistente al derrape o resbalón. Para conseguir este acabado se puede usar un rodillo de garfios o una escoba de cerdas duras; en pavimentos de autopistas la textura del acabado se logra con alambres duros para mejorar la fricción.

Como puede observarse, existen diversos tipos de acabado del concreto, de los cuales en base a los requerimientos del proyecto, se debe elegir cuál es el mejor para nuestro tipo de obra, incluso existen acabados texturizados, coloreados y recubrimientos transparentes. Siempre considerando las prevenciones pertinentes que enmarcan las normas para un mejor desempeño de nuestra obra.

### **CURADO**

Un concepto muy importante y que tiene considerables efectos en el concreto es el curado del concreto; el cual la Norma Mexicana NMX-C-155, lo define como el proceso mediante el cual, en un ambiente especificado de humedad y temperatura, se favorece la hidratación del cemento hidráulico y en su caso, de los materiales cementantes en la mezcla. El objetivo principal del curado es prevenir la pérdida de humedad del concreto recién colado y mantener la temperatura favorable en el mismo por un periodo definido después de la colocación y el acabado.

El curado también tiene el propósito de que se desarrollen las propiedades deseadas, tales como son la resistencia, rigidez y durabilidad, entre otras. La Norma Mexicana NMX-C-403 establece que el método de mayor efectividad para curar el concreto depende de las circunstancias y tipo de obra; así como son aceptables métodos de curado que:

- Mantengan la presencia de agua de mezclado en el concreto durante el periodo inicial de endurecimiento. Entre éstos se incluye la inundación con agua limpia, el rociado permanente y las cubiertas húmedas saturadas, el cubrir con arenas húmedas y aplicación de vapor de agua a presión atmosférica. Este método es propio para el curado de elementos horizontales.
- Eviten la pérdida de agua de mezclado del concreto sellando la superficie. Esto puede lograrse cubriendo al concreto con hojas de plástico o aplicando compuestos de curado que formen membranas. El método es especialmente útil en superficies verticales.

Las cimbras, por su parte brindan una protección satisfactoria contra la pérdida de humedad si las superficies expuestas del concreto se conservan húmedas; las cimbras por lo tanto, deben dejarse el mayor tiempo posible en contacto con el concreto.

El curado debe iniciarse tan pronto como sea posible, dependiendo del método y material empleado; como regla práctica cuando el concreto recién colado pierde su brillo superficial, debido al agua propia de la mezcla, debe iniciarse el curado. El tiempo en que se presente este efecto, depende básicamente de las condiciones siguientes: temperatura y humedad ambiente, velocidad del viento y temperatura del concreto recién mezclado; la cuales determinan la rapidez de la evaporación del agua de la mezcla.

Siempre que la temperatura ambiente sea superior a 10 °C se considera que el curado ha sido satisfactorio si se ha conservado el concreto permanentemente húmedo por lo menos 7 días; en caso de que la mezcla sea muy sensible al curado o que las condiciones ambientales sean muy agresivas para la misma se recomienda prolongar el curado por lo menos 14 días.

El curado del concreto es imperativo por tres razones principales:

- Permite que el concreto logre las características del diseño.
- Minimiza la fisuración, agrietamiento y pandeo.
- Aumenta las características de desgaste y extiende la vida útil.

Durante el proceso de hidratación, la pasta de cemento se endurece haciéndose más fuerte y densa; la ganancia de densidad resulta en una superficie más dura, menos porosa, más impermeable al agua y sales y consecuentemente más resistentes a los ciclos de congelación y deshielo. La ganancia en resistencia, produce un aumento en la resistencia a la fisuración y el agrietamiento tanto en el periodo de curado como después de este; con una hidratación adecuada se mejora la resistencia superficial, la durabilidad y la resistencia al desgaste.

El método empleado para el curado de los durmientes de concreto de alta resistencia fue el curado húmedo, por medio del rociado, curado a vapor y la colocación de hojas de polietileno para conservar la temperatura y humedad.

- Rociado a aspersión: Es un buen método de curado pero sólo si el concreto se mantiene constantemente húmedo; el permitir que la superficie del concreto se seque entre rociados puede causar fisuración y agrietamiento del elemento estructural. En el método con frecuencia se aplica una llovizna fina de agua libre de impurezas agresivas para el concreto; el ACI 308R recomienda el uso de boquillas o rociadores, con la desventaja del costo del agua e incluso de que no esté disponible. El rociado se aplica hasta que las operaciones de acabado hayan concluido, una vez que el concreto haya endurecido lo suficiente para prevenir la erosión por el agua, se pueden usar rociadores ordinarios para césped. También si se proporciona una buena cobertura y el escurrimiento del agua es adecuado, las mangueras son útiles para el rociado.
- Hojas de polietileno: Las láminas de plástico pueden ser de gran ayuda en el curado del concreto; suelen tener un peso ligero y con la ventaja de que retiene la humedad de forma muy eficiente y se pueden usar tanto en elementos estructurales de formas sencillas como complejas. Sin embargo, el curado con láminas de polietileno pueden generar decoloración en ciertas áreas, esto es más común cuando la película de polietileno se arruga, pero en proyectos grandes es muy complejo y tardado colocar el polietileno sin arrugas, pero puede evitarse si se inunda la superficie bajo la cubierta y otros métodos de curado cuando el color sea de importancia. El polietileno debe tener un espesor de 0.10 mm y pueden ser de color opaco, blancas, transparentes e incluso negras; las películas blancas suelen ser usadas en climas calurosos para reflejar los rayos del sol, el polietileno de color negro se recomienda en climas fríos en áreas internas.

- Curado a vapor: Se usa cuando es importante el desarrollo de la resistencia temprana o donde sea necesario calor adicional para que se logre la hidratación, como en el caso de los climas fríos, también con el fin de obtener una reutilización económica de la cimbra, espacios de fabricación u otras consideraciones de operación; generalmente es usado en elementos prefabricados. Se puede usar el vapor directo a presión atmosférica y vapor a alta presión. El curado a vapor a presión atmosférica se hace en ambientes cerrados para minimizar la humedad y la pérdida de calor, normalmente se usan lonas para crear un ambiente cerrado; la temperatura del vapor se debe mantener alrededor de 60°C hasta que la resistencia deseada del concreto se haya desarrollado, se deben evitar las temperaturas de curado a vapor mayores de 70°C, ya que no son económicas y causan daños, además que la resistencia no aumentará significativamente en temperaturas más elevadas.

La combinación de los métodos elegidos también depende de la disponibilidad de los materiales de curado, el tamaño, forma y edad de los elementos estructurales; así como de las instalaciones de producción, de la economía y la apariencia estética. Para los durmientes de concreto de alta resistencia, la combinación de estos tres métodos fueron los apropiados, dando resultados favorables en la resistencia requerida y de diseño de los durmientes de concreto.

De la siguiente manera se darán los aspectos generales para los métodos y materiales de curado.

- Encharcamiento e inmersión: En pavimentos y losas se puede curar por encharcamiento, es un método ideal para evitar la pérdida de humedad y es eficiente también para mantener la temperatura del concreto; el agua de curado se recomienda no debe ser 11°C más fría que el concreto para evitar tensiones térmicas que puedan generar fisuras, este método sólo se emplea en obras pequeñas. El método de inmersión es comúnmente usado en el laboratorio para el curado de especímenes de ensayo; el agua debe estar limpia de impurezas o sustancias que decoren o afecten la superficie del concreto.
- Coberturas húmedas: Para retener la humedad se usan cubiertas de telas saturadas de agua, tales como las mantas, esteras de algodón y los yutes; este último refleja la luz y es resistente a la putrefacción y al fuego. Las coberturas de tela saturada, deben colocarse tan pronto el concreto se haya endurecido para evitar daños en la superficie; se debe tener cuidado para que toda la superficie quede cubierta por la tela mojada y mantenerla constantemente húmeda para que el agua se mantenga sobre la superficie del concreto durante el proceso de curado.
- Papel impermeable: Es un método eficiente para superficies horizontales y concreto estructural de formas relativamente sencillas. El papel impermeable consiste en dos hojas de papel kraft o de pulpa sulfútica cementadas entre sí por un adhesivo bituminoso con refuerzos de fibras, su ventaja es que no requiere el riego periódico, ayuda a la hidratación del cemento y previene la pérdida de agua del concreto. Para su colocación se debe mojar y traslapar entre hojas cerca de 150 mm y estar sellados con arena, tablones de madera, cinta adhesiva, mastique o pegamento; se puede reutilizar y las rasgaduras o agujeros se pueden reparar fácilmente con parches del mismo papel.

- Compuestos de curado formadores de película: En países desarrollados, es el método más usado y más práctico para el curado no sólo de concreto recién colados, sino también para prolongar el curado hasta después de la remoción de la cimbra. Existen compuestos transparentes o translúcidos y pigmentados en blanco, los transparentes o translúcidos pueden contener un tinte inestable que facilita la verificación visual del área cubierta, deben ser colocados inmediatamente después del acabado final del concreto, a través de equipos rociadores operados de forma manual o por propulsión mecánica, normalmente sólo se aplica una capa uniforme en una proporción de 3 a 4 m<sup>2</sup> por litro.
- Curado por humedad interna: Este método se refiere a que al concreto se le da humedad desde el interior y no de manera externa. Esta agua no debe afectar la relación agua/material cementante del concreto fresco; los agregados finos ligeros o partículas de polímeros absorbentes, con capacidad de retener cantidad de agua significativa, pueden suministrar humedad adicional a los concretos propensos a la auto-deseccación. El agregado fino y ligero saturado puede suministrar humedad para la continuación de la hidratación, resultando en un aumento de la resistencia y durabilidad.

Como se puede observar, los diferentes métodos de curado tienen sus aplicaciones muy particulares; el encharcamiento o inmersión es un método empleado para curar superficies horizontales, pero no es un método muy usado y requiere una considerable supervisión. Por su parte, el mantener la humedad del concreto por medio del rociado es un excelente método cuando el elemento estructural es sometido a una abundante y adecuada humedad por medio de rociadores o con una simple manguera y puede ser empleado para superficies verticales y horizontales; la aplicación de agua debe ser continua y en caso de que sea intermitente, deberá considerarse que en cada periodo del rociado, los elementos estructurales no deben dejarse secar por completo, deben ser en periodos prolongados cuidando que no queden completamente secos. Las cubiertas de polietileno pueden evitar la evaporación del agua manteniendo y distribuyendo la humedad de los elementos estructurales durante el periodo de curado, que de igual forma, pueden ser superficies verticales y horizontales. El curado a vapor, es utilizado cuando es importante el desarrollo de la resistencia temprana; por lo que el empleo y selección del método de curado debe ser considerado con su debida importancia, dadas las condiciones ambientales, de las características de diseño, del lugar de trabajo, y del aspecto económico.

### 3.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

El concreto de alta resistencia se ha utilizado con frecuencia tanto en países desarrollados como en los países en vías de desarrollo, esto es debido a la gran necesidad que se ha generado en los últimos años y en los múltiples proyectos que se han construido. Poco a poco se ha ido incrementando el estudio de este tipo de concretos, con el objetivo de dar a conocer su capacidad y sus aplicaciones una vez que se ha planteado su uso en un proyecto determinado; estos avances siguen progresando día con día beneficiando las construcciones y ayudando el desarrollo en la infraestructura de cualquier país.

Los avances en los materiales empleados en la construcción, como lo son la madera, el acero o el concreto, evolucionaron paulatinamente; anteriormente el acero se consideraba como una segunda reflexión ya que se consideraba un material bastante caro, en comparación con los costos de los materiales de entonces; era muy poco usado en las construcciones civiles, pero cuando se hablaba de edificios de gran altura, inmediatamente se asociaba con una estructura de acero, actualmente ya no es así; los edificios de gran altura también están hechos de concreto.

Mientras tanto lo mismo pasaba con el concreto; el cual se conoce que es un material, que si bien es poco económico, también se sabe que tiene grandes características de aplicación, por lo tanto el concreto es un material que poco a poco fue encontrando lugar dentro del desarrollo de grandes proyectos en la ingeniería civil, considerándose también ciertas limitaciones que ha presentado como material estructural, es por esto que es conveniente hacer mención de las ventajas y desventajas que presenta el concreto de alta resistencia como material estructural en obras civiles.

### 3.6.1 EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Uno de los beneficios más importantes que se obtiene al usar concreto de alta resistencia es precisamente su alta resistencia a la compresión; por lo tanto en los edificios de gran altura, permite que se reduzca el tamaño de las columnas y el grosor de los muros, lo que genera que el espacio rentable se incremente y obteniendo de esta manera una mayor ganancia por la inversión, estructuralmente; reduce su peso y por consiguiente reduce el peso que va dirigido a la cimentación.

Otro de los beneficios que se puede encontrar con los concretos de alta resistencia es la gran rigidez lateral; las estructuras de concreto especialmente las que son coladas en sitio, tienen secciones masivas en comparación con su equivalente en estructuras de acero; las estructuras de concreto tienen la suficiente rigidez para satisfacer los criterios de desplazamiento lateral de entrepiso, esto es debido en base a que si se incrementa la resistencia a la compresión, mayor será su módulo de elasticidad, originando una mayor rigidez, dado que para los edificios de gran altura el grado de oscilación es la condición dominante de diseño. Incluso las estructuras de concreto brindan una mayor facilidad de conexión entre los elementos estructurales, por mencionar un ejemplo; si se opta primero por colar la estructura e ir avanzando posteriormente con las losas de piso, el tiempo se simplifica notablemente.

La permeabilidad, la resistencia a la corrosión y absorción de agua permiten un mejoramiento en la durabilidad del concreto de alta resistencia, incrementando así la protección al acero de refuerzo contra la corrosión; además el humo de sílice como la ceniza volante tienen esa particularidad porque disminuye la permeabilidad. El concreto de alta resistencia también nos permite alcanzar altas resistencias tempranas, permitiendo un descimbrado más rápido y ayudando a simplificar los métodos constructivos a su vez. La alta plasticidad de la mezcla de concreto durante el colado hace prácticamente innecesaria la compactación, por lo que reduce los costos de mano de obra y equipo, tiempo y energía.

Los concretos de alta resistencia tienen mayor resistencia a la abrasión y desgaste, incluso al desgarramiento; en países que tienen un clima muy frío y se ven afectados por nieve, los vehículos son provistos con clavos de acero que se colocan en las llantas para mejorar la fricción, pero el daño que se hace al asfalto es considerable, es por esto que en esos países sea empleado con mayor frecuencia el concreto hidráulico. Otra ventaja de este tipo de concreto es la alta resistencia a la penetración de productos químicos, tales como cloruros, lo que nos conlleva a concluir también que los concretos de alta resistencia son más durables. A su vez, la contracción por secado y fluencia después de un año varía de 300 a 700 millonésimas en concreto de alta resistencia; como medida de comparación, el concreto no reforzado convencional tiene una variación de contracción por secado de 400 a 800 millonésimas; la fluencia del concreto de alta resistencia es comparable a la del concreto convencional cuando se compara en base a deformación por esfuerzo unitario, pero debido a la resistencia de los concretos que se han estudiado con el tiempo para distintas aplicaciones, es menor si se considera una base absoluta. Con la adición de humo de sílice y altos contenidos de cemento no muestran deterioro en la exposición contra la congelación y el deshielo, así como la expansión térmica.

En regiones con estratos de suelos débiles se recurre generalmente a las cimentaciones piloteadas; el permiso para hincar pilotes cada vez se ha convertido más complicado de obtener en zonas urbanas, sobre todo en zonas de escuelas y oficinas, se han buscado alternativas de métodos más silenciosos, ejemplo de esto y que se han hecho pruebas son pilotes atornillables que se instalen sin ruido ni vibración, en donde el momento de torsión que se aplica durante el atornillamiento es bastante alto, de tal manera que el esfuerzo en el concreto del vástago son los que gobiernan el diseño; una opción sería o pareciera ser un pilote hueco pretensado a base de concreto de alta resistencia, una ventaja adicional es la posibilidad de utilizar los pilotes en suelos contaminados.

Cabe mencionar que para poder aprovechar todas las ventajas de concreto de alta resistencia se debe considerar que los reglamentos convencionales deben ampliarse para tomar en cuenta nuevos tipos de concreto de alta resistencia y aceptar como un hecho el empleo cada más generalizado de este tipo de concretos.

En resumen, mediante la siguiente la tabla se muestra los principales beneficios y aplicaciones que se obtienen con los concretos de alta resistencia.

Ventajas	Usos
<b>En propiedades mecánicas</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistencia a la compresión a largo plazo.</li> <li>• Incremento acelerado de la resistencia a la compresión.</li> <li>• Alto módulo de elasticidad.</li>   <li>• Mayor resistencia a la tensión del concreto.</li> <li>• Mayor incremento en la ductilidad debido al incremento del módulo de elasticidad.</li> <li>• Contracción y deformación diferida controlada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edificios de gran altura y puentes de grandes claros.</li> <li>• Construcciones con necesidad de realizarse en poco tiempo.</li> <li>• Construcciones en zonas de alto riesgo sísmico.</li> <li>• Vigas y losas presforzadas.</li> <li>• Pavimentos.</li> <li>• Vigas y losas de pisos.</li> <li>• Reparaciones estructurales.</li> </ul>

<b>Aplicaciones en la construcción</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curado controlado.</li> <li>• Colocación en condiciones ambientales severas.</li> <li>• Propiedades de colocación controlada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pavimentos, pisos, construcción residencial.</li> <li>• Construcciones en zonas tropicales y en zonas de ártico</li> <li>• Extensión el tiempo de construcción.</li> <li>• Sótanos, concreto residencial.</li> </ul>
<b>Durabilidad</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor protección del acero de refuerzo contra la corrosión.</li> <li>• Mayor ciclo de vida de la estructura a largo plazo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puentes, pavimentos, construcciones marinas.</li> <li>• Contenedores, puentes, construcciones cerca del mar y expuestos a sales.</li> </ul>

Es preciso mencionar que el costo del concreto de alta resistencia es tres veces mayor respecto a un concreto normal, pero a largo plazo es más económico debido a que se evitan los costos de mantenimiento o se reducen considerablemente, dependiendo del tipo de construcción.

Existen limitaciones de este tipo de concreto que deben ser consideradas y se enlistarán de la siguiente manera:

- El diseño de la mezcla es más crítico que el que se requiere para concreto de resistencia normal y debe existir un control de calidad estricto en los ingredientes de la mezcla y de la producción.
- La mezcla es más rígida que en el concreto de resistencia normal y por lo tanto requiere la adición de aditivos para mejorar su trabajabilidad; las cantidades de aditivos requieren de supervisión.
- En estructuras o elementos grandes de concreto se requiere o mínimo debe considerarse equipo de enfriamiento o un tipo de cemento especial para evitar altos gradientes térmicos que pueden provocar agrietamiento.
- Dado que el concreto de alta resistencia es empleado en elementos donde la fuerza a compresión es alta, la extensión y cantidad de anillos laterales necesitan ser mayores que los utilizados en elementos de concreto de resistencia normal.
- Se necesita de una amplia experiencia del diseñador y del constructor para estar conscientes de lo que significa una dosificación que no cumpla con los requisitos de una mezcla de concreto y que no cumpla con los requisitos de resistencia.
- El diseñador debe ser consciente del factor de resistencia que se basa a los 28 días y cumplir con la resistencia requerida, dado que el constructor corre potencialmente un mayor riesgo al momento de estar construyendo que cuando se usa concreto de resistencia normal, particularmente si la construcción está avanzada a un ritmo muy rápido.
- Existe una probabilidad de que se requiera algún tipo de cemento especial que eleve el costo del concreto, así como altos contenidos de cemento.
- También la adición de algún aditivo mineral o químico implica un incremento en el costo final del concreto.
- Puede sufrirse de carencia de algún tipo de agregado específico que no se encuentre cerca del sitio de la obra.

- En algunos países, la importación de microsílíce afecta el aspecto económico del concreto.
- La durabilidad se ve afectada con el exceso del uso de microsílíce junto con el alto contenido de aditivo superfluidificante.
- El concreto de alta resistencia es sumamente sensible al agrietamiento, sobre todo durante las primeras 12 horas después de su colocación.
- Para el diseño estructural existen algunas limitaciones en la normatividad de otros países respecto de la resistencia a compresión.

Como se puede observar, las ventajas del uso del concreto de alta resistencia tiene mayor peso que sus limitaciones en ciertos aspectos de su uso y producción; finalmente podemos resumir lo siguiente:

- Desde el punto de vista estructural y arquitectónico, se pueden reducir las secciones estructurales de las columnas, vigas o muros, obteniendo una reducción en el peso propio de la estructura y la disponibilidad de una mayor área.
- Desde el punto de vista constructivo se tiene un concreto con mayor fluidez en comparación de un concreto de resistencia menor, alta cohesión interna, lo cual contribuye a la no segregación y, por último, un más rápido desarrollo de resistencia que nos permite lograr descimbrados más tempranos con el consecuente aumento en la eficiencia del proceso constructivo.
- Finalmente, desde el aspecto económico, comúnmente se tiene la idea de que el uso del concreto de alta resistencia nos conduce a mayores costos de construcción, más sin embargo; esto por lo regular no es cierto y precisamente ésta es una de las razones por las que ha ganado un lugar importante el uso de este tipo de material estructural extendiéndose cada vez más.



## CAPITULO 4 APLICACIONES E INVESTIGACIONES RECIENTES

### 4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE DURMIENTES DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Existe una de las formas más eficientes y económicas de transporte, el Sistema de Transporte Colectivo Metro, este sistema tiene la necesidad de innumerables obras de concreto y una de ellas corresponde a durmientes o traviesas de concreto, que poco a poco vino sustituyendo en todo el mundo a la noble y eficiente traviesa o durmiente de madera. Un durmiente se define como un elemento estructural que se sitúa en dirección transversal al eje de la vía; este elemento estructural recibe esfuerzos de tensión o flexión que son transmitidas por la vía o riel, transfiriendo esos esfuerzos al balasto, esfuerzos de tensión que deberán ser compatibles con su capacidad de resistencia y deformación. La función en sí de los durmientes, es sujetar firmemente y de manera transversal y longitudinal a las vías o rieles manteniendo su paralelismo y distancia correspondiente de ancho de vía; debe ser capaz de resistir las presiones que provenientes de la base de la vía o riel y ser capaz de transmitir las uniformemente a las capas de balasto por debajo de su cara o base inferior.

En la Ciudad de México se eligió para evitar la importación de madera y a su vez se realizó un programa de investigación riguroso con el fin de analizar, diseñar y obtener un comportamiento satisfactorio en los durmientes tipo “O” y tipo “S”. En un inicio en las primeras etapas de construcción del Metro de la Ciudad de México, el programa de investigación planteó buscar la posibilidad de usar alguna de muchas variedades de maderas tropicales del país que pudieran sustituir a los durmientes de azobé (madera tropical africana); o utilizar durmientes de concreto de fabricación nacional en algunos tramos de las vías de este sistema de transporte colectivo. Se consideraron algunos tipos de madera para la fabricación de durmientes de madera de alta calidad que tuvieran una gran resistencia mecánica y durabilidad natural de 10 años y resistente a los ataques de organismos depredadores de la madera, entre estos tipos similares al tipo africano se encontraban el chicozapote, machiche y pucté; sin embargo no fue posible fabricar una gran cantidad de estos durmientes debido a innumerables problemas de fabricación por falta principalmente de instalaciones y maquinaria, así como de personal técnico; de esta forma el curso de la investigación pasó a estudiar la siguiente alternativa de fabricar durmientes de concreto, para los cuales se estudiaron las dos versiones conocidas a nivel mundial; el durmiente de dos piezas de concreto reforzado unidas entre sí por un elemento metálico y el durmiente de una sola pieza de concreto pretensado. Finalmente el análisis comparativo de sus ventajas y desventajas en cuanto a comportamiento, facilidad de fabricación y colocación en la vía, así como los antecedentes mundiales, determinaron la utilización de durmientes de dos piezas de tecnología francesa.

Por sus características de comportamiento, de exigencias dimensionales, de funcionabilidad y durabilidad; los durmientes de concreto se han convertido en uno de los elementos prefabricados de concreto de más elevada tecnología. Los durmientes son elementos colocados transversalmente al eje de una vía férrea y constituyen mediante las adecuadas piezas de fijación, el elemento de transmisión de cargas entre el riel y el balasto que conforma la base; tienen las siguientes funciones bien definidas:

- Los dos rieles están asegurados transversalmente y mantenidos en su ancho correcto.
- Las cargas de cada eje son transmitidas mediante presiones disminuidas y uniformes al balasto.
- Los durmientes embebidos en el balasto anclan la vía férrea contra movimiento lateral, longitudinal y vertical.

En la tabla 4.1 se resume las funciones y las propiedades relacionadas:

**TABLA 4.1 FUNCIONES DEL DURMIENTE**

FUNCIÓN	PROPIEDAD
Apoyo de rieles asegurando posición y separación. Transmisión de cargas estáticas y dinámicas.	Dimensiones, peso y sistema de fijación. Peso, resistencia estructural y capacidad elástica del conjunto riel, durmiente y balasto.
Aislamiento eléctrico entre los dos rieles. Estabilidad lateral y vertical de la vía férrea.	Aislamiento eléctrico. Dimensiones y peso.

Los trenes con ruedas neumáticas operan sobre dos pistas metálicas; además la vía tiene dos rieles convencionales sobre los que corre el tren sólo en caso de algún desperfecto de las ruedas neumáticas, cuenta con un par de barras guía sobre las que se apoyan ruedas colocadas en forma horizontal también neumáticas, que sirven para alinear los trenes en su recorrido y que a su vez son conductoras de la corriente eléctrica, por otro lado estas barras descansan sobre aisladores que se fijan a los durmientes. Los durmientes formados por dos bloques de concreto reforzado unidos entre sí por el tirante metálico cumplen con los requerimientos del ancho de vía, el alineamiento y el nivel de las mismas, así como de soportar y distribuir uniformemente en el apoyo de las vías las cargas aplicadas por las ruedas de los trenes.

Anteriormente era de uso común los durmientes de madera, pero con el paso de los años el uso de los durmientes de concreto por sus características mencionadas anteriormente de durabilidad, uniformidad y permanencia de características geométricas y de elasticidad, la posibilidad de utilizar rieles continuos soldados, la facilidad del control de calidad, la velocidad de producción y los elevados niveles de seguridad exigidos por las cargas y velocidades, han hecho que paulatinamente los durmientes de madera estén siendo sustituidos por elementos de concreto. Cabe mencionar que el comportamiento de durmientes de concreto en la vía está determinado en muy buena parte por el sistema de fijaciones y por el balasto y que conjuntamente con el riel y los durmientes, conforman partes integrales del sistema estructural de la vía.

El mundo cada día es más cambiante y los avances se presentan en todos los estratos, hoy se puede observar que el sistema de transporte, específicamente hablando de los durmientes, fue exigiendo un nuevo tipo de durmiente dado que los durmientes de madera presentaban algunas desventajas que fueron contrarrestadas con los durmientes hechos de concreto, convirtiéndose en un nuevo material alternativo, desventajas que se mencionan a continuación:

- La madera es poco durable.
- El creosol y otros tratamientos peligrosos han demostrado causar cáncer
- Los problemas naturales de la madera como el agrietamiento, rajaduras, separaciones, pudrición, nudos, y el fisuramiento causan una tasa de rechazo del 20% ó mayor.
- Los durmientes de madera sufren un rápido deterioro en climas severos.
- La madera es un recurso natural limitado, protegido por muchas leyes conservacionistas.
- El costo por tener un durmiente de madera en ese lugar, se incrementará con el tiempo, dado que los deterioros causados por los factores mencionados anteriormente, harán que sean reemplazados en un tiempo determinado, incrementando el costo de la mano de obra y el mismo reemplazo del durmiente.
- Los factores ambientales como la humedad influyen en la durabilidad, los durmientes de madera se reemplazan cada 3 a 5 años.
- Muchos de los durmientes de madera son reemplazados debido a descomposición, agrandamiento en la madera del área del medio de fijación o cortes en la placa de amarre. Todos estos factores se eliminan con el durmiente de concreto.
- La madera, en general es considerado como un dieléctrico o mal conductor de le electricidad.

En este orden de ideas, el problema del durmiente ocupa un lugar de primordial importancia; la conservación de la vía exige, en efecto, el reemplazo anual de muchos millones de durmientes y obliga al personal técnico de las empresas a buscar la solución económica al problema. Es la búsqueda de esta solución la que nos muestra una evolución general por el abandono progresivo del durmiente de madera.

Los motivos de este abandono residen en múltiples factores, regionales o económicos; el aprovisionamiento puede estar condicionado por la falta de divisas, por las variaciones de precio en un mercado a veces especulativo o por la dificultad de proveerse de madera debido a factores ajenos. Pero la causa primordial de esta evolución, de orden técnico y económico, es la marcada tendencia al aumento de los costos de mano de obra en relación a los de la materia prima. Es necesario entonces que las empresas se esfuercen en reducir los primeros, especialmente los que comprenden la conservación de la vía.

Como respuesta simultanea a todos estos interrogantes y para satisfacer la necesidad de que las redes estén equipadas con vías estables, que requieran una mínima conservación, aparece el durmiente de concreto. Esto por esto que, los durmientes de concreto de alta resistencia, presentan varias ventajas que se mencionan a continuación:

- La vida útil: El durmiente de concreto de alta resistencia se estima entre 15 y 20 años o más de buen comportamiento en sus condiciones óptimas de servicio.
- Fabricación: Se puede fabricar de manera más rápida y optimizar el rápido desmoldeo, beneficiando en el tiempo de fabricación.
- Diseño: Como elemento estructural, se puede diseñar en la forma más conveniente para resistir los esfuerzos que habrá de soportar en las condiciones normales de servicio.

- **Durabilidad:** El concreto responde a las calidades que se exigen a un durmiente para el Sistema de Transporte Colectivo Metro; es un material durable y homogéneo, que no se pudre y resiste la acción de los agentes atmosféricos, climáticos y orgánicos. Los durmientes de concreto de alta resistencia duran más que los durmientes de madera, por lo que a pesar de que la inversión inicial es un 10% más alta, el costo real anual es menor. Por su baja permeabilidad los hace inmunes a la aparición de hongos, por ende resisten más la humedad y al ataque de cualquier sustancia química, ayudando de esta manera el acero de refuerzo que se encuentra embebido en el concreto, evitando la oxidación y la pudrición.
- **Mantenimiento:** Los durmientes de concreto de alta resistencia prácticamente no necesitan mantenimiento, por lo cual el ahorro por la mano de obra de conservación, por los equipos, maquinarias y materiales, es trascendente. Además del tiempo muerto por la paralización de los servicios. En cambio, los durmientes de madera para aumentar su vida útil necesitan ser impregnados con una mezcla de creosota y petróleo, y permanentemente deben ser inspeccionados por posibles debilitamientos del durmiente.
- **Seguridad:** Por su concepción, los durmientes de concreto de alta resistencia, otorgan simultáneamente rigidez para asegurar la estabilidad de la vía y flexibilidad para absorber los choques repetidos provocados por el paso de los trenes, conservando la a lo largo de toda la vía, la constancia en sus condiciones físicas.
- **Confort para el Usuario:** Los durmientes de concreto de alta resistencia, poseen una calidad uniforme y homogénea, lo que redundará en un menor nivel de ruido para el usuario y menos oscilación en el interior de los vagones.
- **Economía:** Los durmientes de concreto de alta resistencia, otorgan mayor sustentación a los vagones, lo que se reduce en mayor velocidad, economizando energía y tiempo. También aumentan la vida útil de los vagones y permiten una mayor carga por eje, totalmente necesaria para las actuales necesidades de un mercado cada vez más exigente y competitivo. Su costo es un poco mayor para durmientes de concreto de alta resistencia en la producción, pero a largo plazo, se reducen los costos de mantenimiento y reemplazo.
- **Optimización de recursos naturales:** La madera nativa, en particular la que se destinaba para durmientes de madera tiene alternativas de comercialización que son mejores que usarlos en este tipo de elementos estructurales, por lo que muchos países destinan esta madera a los segmentos más rentables.
- **Impacto ambiental:** Preservar los bosques nativos es fundamental para el ecosistema. La tala de madera nativa utilizada para la fabricación de durmientes de madera, representa un empobrecimiento del medio ambiente innecesario, ya que existe la alternativa mucho más conveniente y duradera que son los durmientes de concreto de alta resistencia.
- **Aislamiento eléctrico:** Para el aislamiento eléctrico de las vías se requiere usar piezas de aislación especiales.
- **Versatilidad:** A pesar de que las propiedades de respuesta del durmiente de madera son aceptables, se hizo cada vez más común el uso de durmientes de concreto dado que sus propiedades de respuesta son mejores en comparación a la durabilidad.
- **Dimensión y peso:** Dado que el durmiente de concreto puede ser fabricado de la forma más conveniente, influye el diseño en la estabilidad lateral y vertical de la vía.

Para el diseño del durmiente de concreto se consideraron las cargas máximas aplicadas por las ruedas de los trenes afectadas por los factores de impacto y de sismo, los cuales dieron como resultado el diseño de un durmiente con 255.3 metros de largo y un peso de 240 kg; en el que en cada bloque de concreto aloja en su interior dos parrillas metálicas de refuerzo para flexión, una espiral metálica para refuerzo por cortante y confinamiento del concreto, un tramo de tirante metálico que une los dos bloques de concreto y las guarniciones helicoidales para recepción de los pernos tirafondo utilizados para la sujeción de la vía.

Las cargas impuestas y consideradas por los trenes son:

**VERTICALES**

Son las cargas máximas por rueda y por eje de los trenes de operación, que actúan sobre la pista y los que se encuentran en mantenimiento y que ejercen esa carga a los rieles, quedando de la siguiente manera:

TREN	PESO MÁXIMO POR EJE (TONELADAS)	FACTOR DE IMPACTO	FUERZA VERTICAL MAXIMA CON IMPACTO POR EJE (TONELADAS)
OPERACIÓN / MANTENIMIENTO	12,220.00	1,301.25	15,8625.00

**HORIZONTALES**

Para un tren en mantenimiento se consideraron diferentes condiciones de carga que conducen a distintos valores los cuales se indican a continuación:

FUERZAS INDUCIDAS POR LOS TRENES SOBRE LAS VÍAS		
	TREN DE MANTENIMIENTO	
	PARADO	OPERANDO
Fuerza centrífuga neta (tren operando) incluyendo impacto.		-1.095
Fuerza centrípeta neta (tren detenido)	2.134	+/- 3.200
Fuerza sísmica	+/- 3.200	
Fuerza restrictiva de fricción $\mu = 0.18$ en un riel	- 1.800	0.0
Fuerzas máximas horizontales (suma)	+/- 3.534*	- 4.295**
Fuerza horizontal por balanceo en tramos rectos (sobre un riel)		1.800
Fuerza máxima en recta		5.000

\* Por rueda

\*\* Por eje

**CARGAS TRANSMITIDAS A LOS DURMIENTES**

Debido a que en la vía actúan conjuntamente los perfiles de vía y la tendencia del balasto a la deformación y con la finalidad de determinar las cargas transmitidas a los durmientes, se efectuó un análisis de la vía sobre cimentación elástica, se tomaron en cuenta las rigideces de las pistas y de los rieles y el hecho de que en líneas al intemperie hay un desplazamiento relativo entre aisladores y barra-guía que pueden hacer ineficiente la participación de este perfil en la rigidez estructural de la vía completa; se llevo un análisis para tres condiciones:

- Vía continua, para tramos entre juntas de dilatación.
- Vía discontinua, con juntas capaces de transmitir fuerza cortante pero no momento flexionante; para juntas de dilatación que tienen capacidad a flexión pero que son muy deformables en comparación con los perfiles que los unen.
- Vía semi-infinita, es decir discontinua en una sección, para tomar en cuenta la posibilidad de ruptura o aflojamiento de una junta de dilatación.

Las fuerzas que se aplican a los durmientes bajo estas condiciones para separaciones de durmientes de 60 y 75cm, que corresponden a curvas y rectas se muestran en la tabla 4.1.1. La carga máxima transmitida a los durmientes tipo “O”, que pueden estar junto a un aparato de dilatación aflojado, es de 7.40 toneladas bajo la pista, y de 10.24 bajo el riel, que corresponden al 93 y 82% del peso de la rueda.

TABLA 4.1.1 CARGAS VERTICALES SOBRE DURMIENTES								
TIPO	“S”				“O”			
	OPERACIÓN		MANTENIMIENTO		OPERACIÓN		MANTENIMIENTO	
Carga de rueda (Ton.)	7.298		12.5		7.298		12.5	
Carga máxima por durmiente	@	@	@	@	@	@	@	@
	60 cm	75cm	60 cm	75 cm	60 cm	75 cm	60 cm	75 cm
Vía semi-infinita (Ton.)	3.434	4.004	4.456	5.571	7.395	7.395	10.235	10.235
Vía con capacidad a cortante (Ton.)	3.303	4.004	4.456	5.571	3.303	4.004	4.456	5.571
Vía continua (Ton.)	3.303	4.004	4.456	5.571	3.303	4.004	4.456	5.571

Por otro lado, las fuerzas verticales que se obtuvieron del análisis de la vía ilustran uniformidad en el balasto; pero una mayor compactación bajo los durmientes tipo “S” por causa de mantenimiento o por efecto de las fuerzas horizontales, provocaría una mayor fuerza vertical sobre los durmientes; así como también lo pueden causar la descomposición de los durmientes tipo “O” adyacentes a los tipos “S”. Por dicha causa se consideró como condición accidental extrema, la acción del peso total de las ruedas de los trenes sobre los durmientes. La reacción a la carga aplicada es generada por el balasto considerando al bloque como un cuerpo rígido, puesto que así resulta al considerarlo como elemento sobre cimentación elástica.

Las figuras 4.1.1 y 4.1.2 muestran los elementos mecánicos en el durmiente bajo la carga de los ejes de los trenes, teniendo en cuenta lo siguiente:

Para el análisis individual del bloque en el diagrama de esfuerzos de la figura 4.1.1 se tiene:

Cálculo de las reacciones sobre el riel del bloque de concreto considerando la carga por rueda de 12,500 kg.

$$\sum_{MB} = 0$$

$$R_A (68.7 \text{ cm}) - [(12,500.00 \text{ kg}) (22.9 \text{ cm})] = 0$$

$$R_A (68.7) - 286,250 = 0$$

Despejando:

$$R_A = (286,500) / (68.7)$$

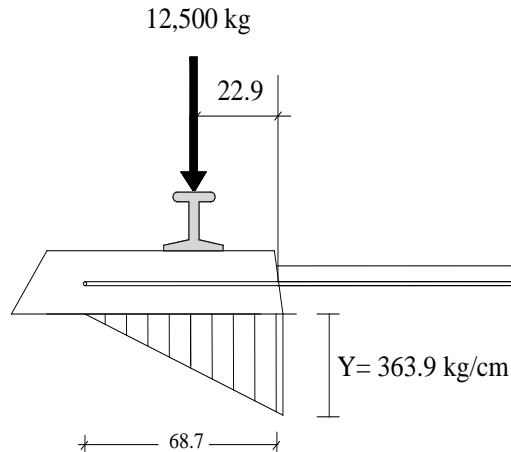
$$R_A = 4,166.66 \text{ kg}$$

$$\sum_{\text{FUERZAS VERTICALES}} = 0$$

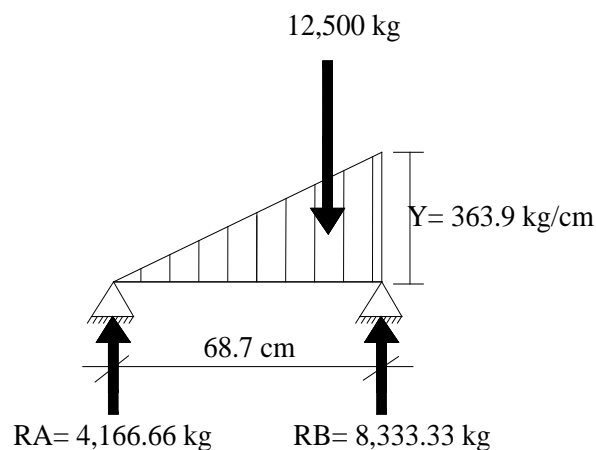
$$4,166.66 \text{ kg} - 12,500 \text{ kg} + R_B = 0$$

$$R_B = 12,500 \text{ kg} - 4,166.66 \text{ kg}$$

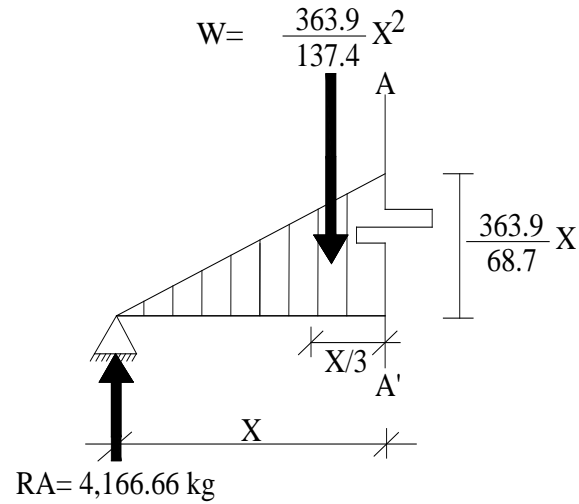
$$\text{Se tiene entonces: } R_B = 8,333.33 \text{ kg}$$



Analizando de la siguiente manera:



Haciendo un corte A-A' a una distancia "x" en la sección se tiene lo siguiente:



Se tiene que:  $A = (b \times h) / 2$

Considerando que la base del triángulo es de 68.7cm y la altura de 363.9 cm kg/cm a una distancia "x"; para resolver de la siguiente forma la base es:

$$\text{base} = \left[ \frac{363.9}{68.7} \right] X$$

$$\text{altura} = X$$

Resolviendo para conocer la carga W que es aplicada al tercio del diagrama:

$$A = \frac{\left[ \frac{363.9}{68.7} X \right] \left[ X \right]}{2}$$



Por lo tanto se tiene que la carga W aplicada es:

$$W = \left[ \frac{363.9}{137.4} X^2 \right]$$

Obteniendo las ecuaciones para conocer la fuerza cortante y de momento sobre el durmiente:

Fuerza Cortante  $V = 0$  en un intervalo donde la distancia "x" se encuentra entre  $0 \leq x \leq 45.8$

$$V = 4,16.66 - \left[ \frac{363.9}{137.4} X^2 \right]$$

Obteniendo la fuerza cortante en el durmiente, sustituyendo el valor de "x" a una distancia de 45.8 cm.

$$V = 4,16.66 - \left[ \frac{363.9}{137.4} (45.8)^2 \right]$$

$$V = 5,555.54 \text{ kg}$$

Ahora bien;

$$V = 5,555.54 \text{ kg} - 12,500 \text{ kg}$$

$$V = - 6944.46 \text{ kg}$$

Se obtiene la ecuación de momento con  $\sum_{MB}=0$

$$M = \left[ 4,16.66 (X) \right] - \left[ \left[ \frac{363.9}{137.4} X^2 \right] \left[ \frac{X}{3} \right] \right]$$

Para el diagrama de esfuerzos de momento; sustituyendo el valor de “x” a una distancia de 45.8 cm.

$$M = \left[ 4,16.66 (45.8) \right] - \left[ \left( \frac{363.9}{137.4} (45.8)^2 \right) \left( \frac{45.8}{3} \right) \right]$$

$$M = 84,814.57 \text{ kg-cm}$$

$$M = 848.145 \text{ kg-m}$$

Quedando los diagramas de esfuerzo cortante y de momento como se ilustra en la figura 4.1.1; alcanzando un esfuerzo cortante máximo de:

- Esfuerzo cortante máximo positivo= 5,555.54 kg (+)
- Esfuerzo cortante máximo negativo= - 6,944.46 kg (-)

El momento queda expresado como:

- Momento máximo positivo= 848.145 kg-m (+)

Para el desarrollo del análisis de diseño, se considera que la base del durmiente de concreto de alta resistencia; al estar en contacto con el suelo, este aplica una carga uniformemente repartida, es por eso que se representa el diagrama de esfuerzo bajo el durmiente de forma triangular y no como una viga simplemente apoyada, por lo que se entiende que la fuerza que se ejerce en la base del durmiente es una carga repartida y es por esto, la forma en que se lleva a cabo su análisis estructural.

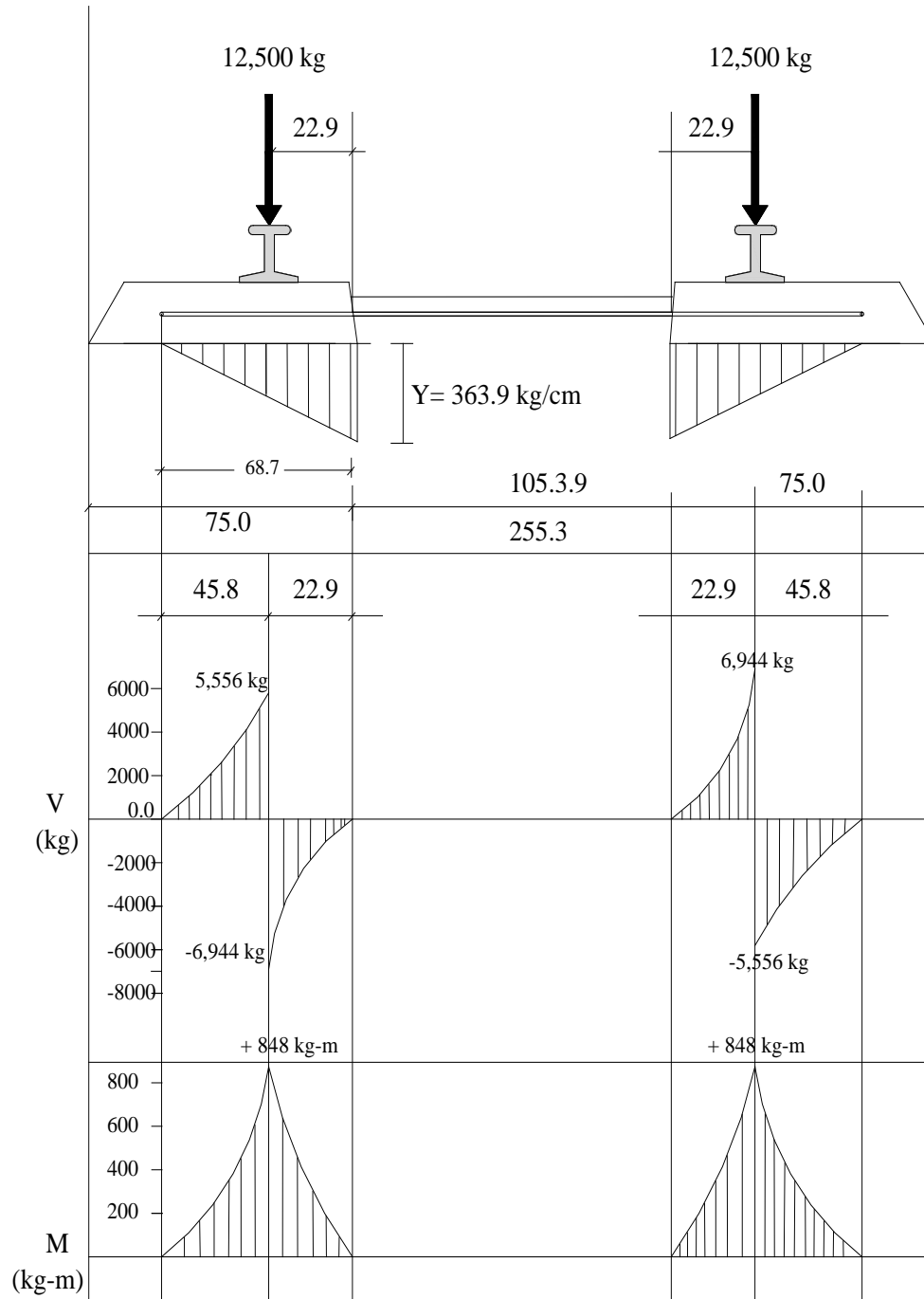


FIGURA 4.1.1 ELEMENTOS MECÁNICOS CON CARGA MÁXIMA EN EL RIEL

Para el análisis individual del bloque en el diagrama de esfuerzos de la figura 4.1.2 se tiene:

Cálculo de las reacciones sobre la pista del bloque de concreto considerando la carga por rueda de 7,930 kg.

$$\sum M_A = 0$$

$$- [(7,930 \text{ kg}) (28 \text{ cm})] + R_B (75 \text{ cm}) = 0$$

Despejando:

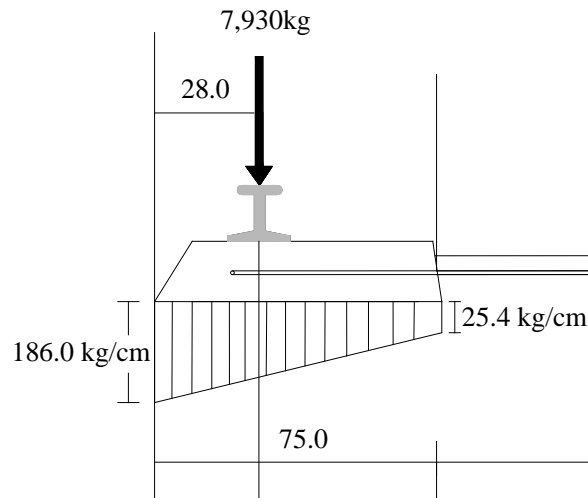
$$R_B = (222,040 \text{ kg}) / (75 \text{ cm})$$

$$R_B = 2,960.5 \text{ kg}$$

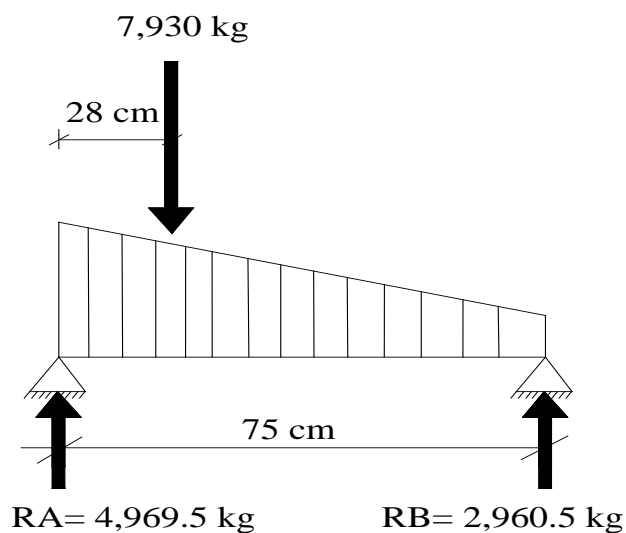
$$\sum \text{FUERZAS VERTICALES} = 0$$

$$R_A - 7,930 \text{ kg} + 2,960.5 \text{ kg} = 0$$

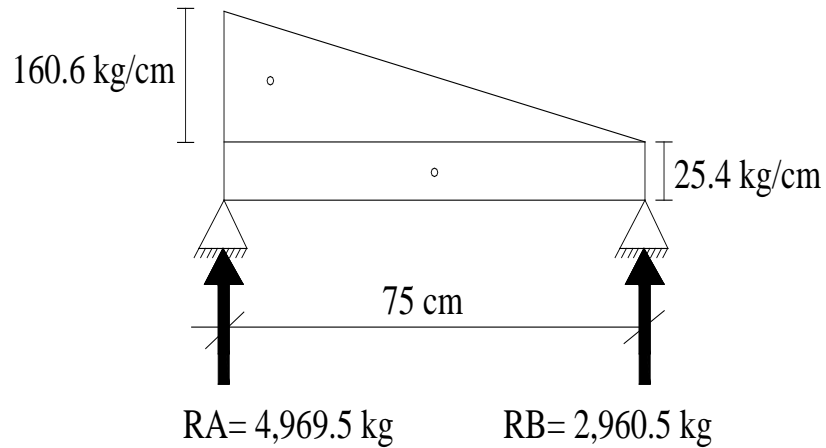
$$R_A = 4,969.5 \text{ kg}$$



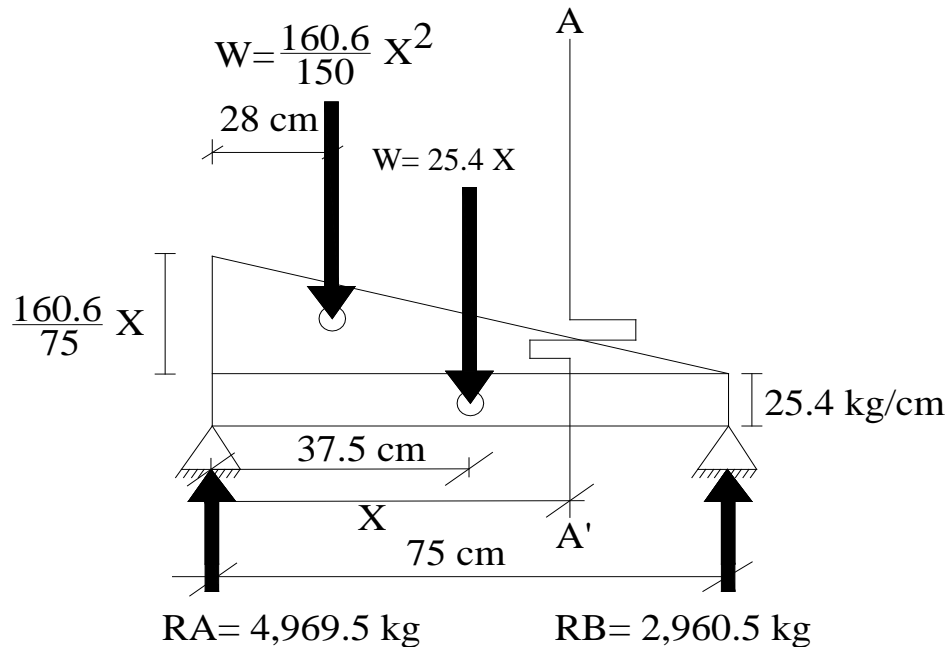
Analizando de la siguiente manera:



Considerando así:



Haciendo un corte A-A' a una distancia "x" en la sección se tiene lo siguiente:



Separando el trapecio original en dos figuras geométricas tales como un rectángulo y un triángulo, se analizan para obtener las cargas que se aplican para cada una de las figuras, por lo que para el rectángulo se considera como una carga uniformemente repartida; de esta manera se tiene una carga en el centro del claro del durmiente para su análisis quedando  $W$  igual a  $25.4x$ .

Para el triángulo se tiene que:  $A = (b \times h) / 2$

Considerando que la base del triángulo es de 75cm y la altura de 160.6 kg/cm a una distancia “x”; para resolver de la siguiente forma la base es:

$$\text{base} = \frac{160.6}{75} X$$

$$\text{altura} = X$$

Resolviendo para conocer la carga W que es aplicada al tercio del diagrama:

$$A = \frac{\left[ \frac{160.6}{75} X \right] \left[ X \right]}{2}$$

Por lo tanto se tiene que la carga W aplicada es:

$$W = \left[ \frac{160.6}{150} X^2 \right]$$

Obteniendo las ecuaciones para conocer la fuerza cortante y de momento sobre el durmiente:

Fuerza Cortante  $V = 0$  en un intervalo donde la distancia “x” se encuentra entre  $0 \leq x \leq 28$

$$V = 4,969.5 - \left[ \frac{160.6}{150} X^2 \right]$$

Sustituyendo el valor de “x” igual a 28 cm se tiene:

$$V = \left[ 4969.5 - 1.070 (28)^2 \right] = 4969.5 - 839.40 = 4,130\text{kg}$$

Así que el cortante a 28 cm del durmiente se tiene:

$$V = 4,130.09 - 7,930 = -3,799.91\text{kg}$$

La ecuación que se obtiene para un intervalo donde la distancia “x” se encuentra entre  $0 \leq x \leq 37.5$

$$V = 4,969.5 - \left[ \frac{160.6}{150} X^2 \right] - 25.4 X$$

Sustituyendo el valor de “x” igual a 37.5 cm se tiene:

$$V = 4,969.5 - \left[ \left( 1.070 (37.5)^2 \right) - \left( 25.4 (37.5) \right) \right] = 4,969.5 - 1,505.63 - 952.5 =$$

$$V = 2,511.37 \text{ kg}$$

$$V = -3,799.91 \text{ kg} + 2,511.37 \text{ kg} = -1,288.54$$

La ecuación que se obtiene para un intervalo donde la distancia “x” se encuentra entre  $0 \leq x \leq 75$

$$V = 4,969.5 - \left[ \frac{160.6}{150} X^2 \right] - 25.4 X$$

Sustituyendo el valor de “x” igual a 75 cm se tiene:

$$V = 4,969.5 - \left[ \left( 1.070 (75)^2 \right) - \left( 25.4 (75) \right) \right] = 4,969.5 - 6,022.5 - 1,905 =$$

$$V = -2,958 \text{ kg}$$

$$V = -2,958 \text{ kg} + 2,960 \text{ kg} = 0$$

Se obtiene la ecuación de momento con  $\sum_{MA}=0$

$$M = \left[ 2,960.5 (X) \right] - \left[ \frac{25.4}{2} X^2 \right] - \left[ \left( \frac{160.6 X^2}{150} \right) \left( \frac{X}{3} \right) \right]$$

Sustituyendo el valor de “x” en el intervalo  $0 \leq X \leq 47$

$$M = \left[ 2,960.5 (47) \right] - \left[ \frac{25.4}{2} (47)^2 \right] - \left[ \left( \frac{160.6 (47)^2}{150} \right) \left( \frac{47}{3} \right) \right]$$

El momento es igual a:

$$M = 139,143.5 - 28,054.3 - 37,053.28 = 74035.92 \text{ kg-cm}$$

$$M = 740.35 \text{ kg-m}$$

Por lo tanto los diagramas de esfuerzo cortante y de momento, quedan expresados de la siguiente forma en la figura 4.1.2

- Esfuerzo cortante máximo positivo= 4,130.09 kg (+)
- Esfuerzo cortante máximo negativo= - 3,799.91 kg (-)

El momento queda expresado como:

- Momento máximo positivo= 740.35 kg-m (+)



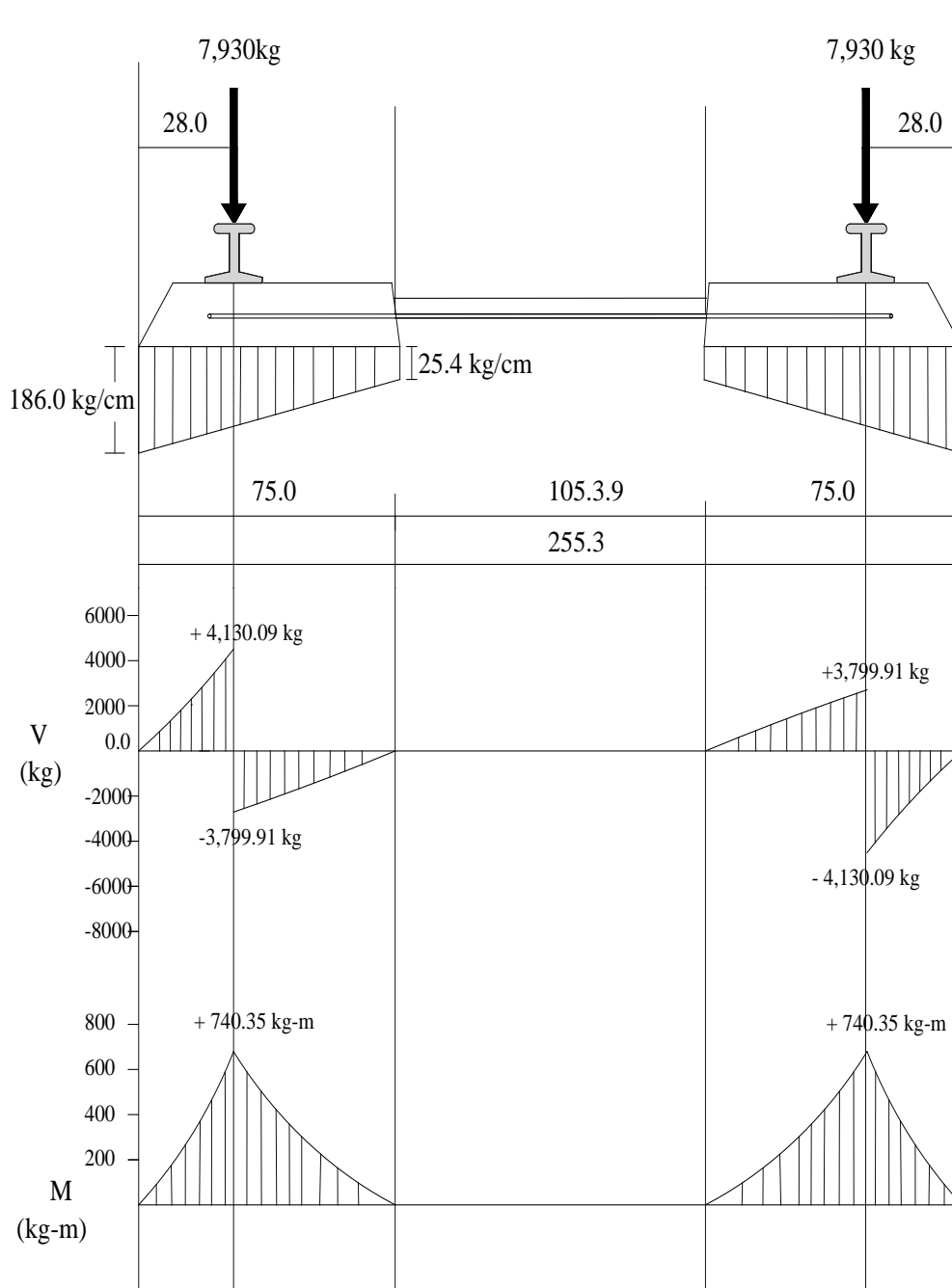


FIGURA 4.1.2 ELEMENTOS MECÁNICOS CON CARGA MÁXIMA EN PISTA



Las características de los materiales utilizados para la elaboración de durmientes se mencionan a continuación:

#### ACERO DE REFUERZO

El acero de refuerzo para este tipo de durmientes debe ser varillas redondas lisas o corrugadas además de contar con propiedades físicas como:

- Límite de elasticidad mínima (parrillas y espirales): 2,400 kg/cm<sup>2</sup>
- Alargamiento mínimo a la falla o ruptura: 8%

#### TIRANTE METÁLICO

Como se ha observado que el acero para el riel no muestra resentir demasiado los efectos del intemperismo, se decidió que los tirantes de unión de los bloques de durmientes de concreto tuvieran las siguientes especificaciones:

- Límite elástico mínimo: 3,000 kg/cm<sup>2</sup>
- Alargamiento mínimo a la ruptura: 14%
- Carbono: 0.29 – 0.52 %
- Manganeso: 0.60 – 1.20 %
- Fósforo: menos de 0.08 %
- Azufre: menos de 0.05 %

#### CEMENTO

El cemento para la fabricación es preferentemente de resistencia rápida, como alternativa se acepta el uso de un cemento de resistencia normal; en la elaboración para este tipo de durmientes se utilizó un tipo de cemento portland ordinario de clase resistente 40 (40Mpa = 408 kg/cm<sup>2</sup>) (CPO 40); los cementos empleados deben cumplir con las resistencias mínimas a compresión establecidas por el fabricante y que cumplan la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999; este tipo de cemento tiene las siguientes características:

Ensayes	Especificaciones NMX-C-414-ONNCCE-1999	Valores obtenidos
Tiempo de fraguado Inicial (minutos) Final (minutos)	Mínimo 45 Máximo 600	104 180
Estabilidad de volumen En autoclave (%)	Expansión Máxima 0.20 Contracción Máxima 0.20	0.02
Expansión por sulfatos RS (%)	Máximo a 6 meses 0.05 Máximo a un año 0.1	0.05* 0.09*
	Resistencia a la compresión (N/mm <sup>2</sup> )	
3 días	Mínimo 20	28
28 días	Mínimo 30, Máximo 50	41.2

Los resultados de resistencia obtenidos corresponden a los promedios en los siguientes periodos:

\* Promedio histórico

Edad	Periodo
3 días	21 al 31 de mayo
28 días	21 al 30 de abril

#### AGUA

El agua como se ha mencionado anteriormente, debe estar limpia y libre de cantidades de ácido, álcalis, sales, materia orgánica y demás sustancias que resulten nocivas y además no deben sobrepasar los límites siguientes:

- Sulfatos (SO), máximo en partes por millón (ppm): 300
- Cloruros (Cl), máximo en partes por millón (ppm): 300
- Magnesio (MgO), máximo en partes por millón (ppm): 150
- Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido), máximo en partes por millón: 10
- Sólidos totales en solución, máximo en partes por millón (ppm): 1,500
- pH no menor de: 7

#### AGREGADOS

La arena debe de estar exenta de materiales térreos, arcillosos y polvos; la grava debe provenir de rocas duras y sanas, inalterables por efecto del agua o el aire; están prohibidas en particular las gravas de rocas feldespáticas o esquistas, las cuales se descomponen por los efectos antes mencionados, agua y aire. Estos agregados fueron analizados para que cumplieran con la Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2004, y se sometieron a las pruebas pertinentes para su análisis y determinación de sus propiedades.

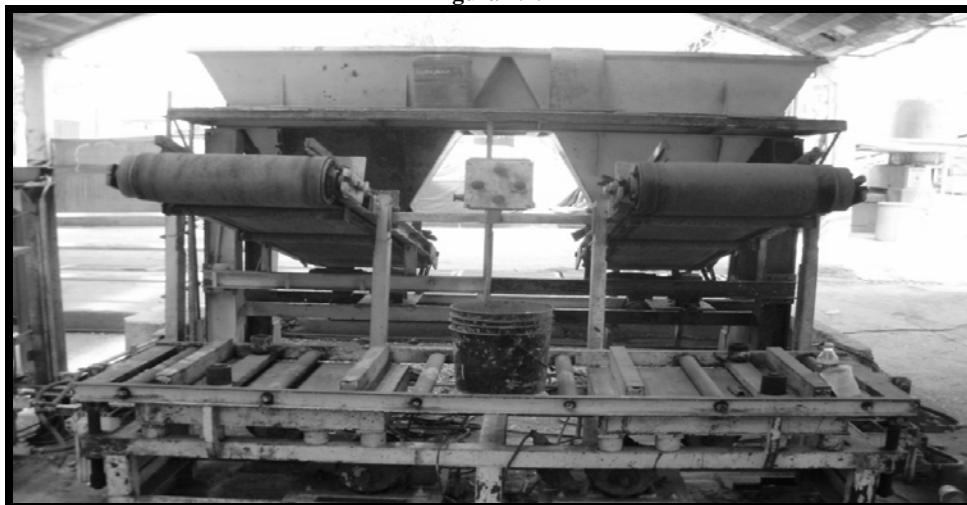
#### 4.2 TECNOLOGÍA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE DURMIENTES DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Todo el proceso de fabricación empieza desde la adecuada selección de agregados, cumpliendo las características mencionadas anteriormente; los agregados son transportados mediante un cargador frontal, los cuales son depositados a una tolva receptora bajo el nivel de piso, se transporta mediante bandas hasta las tolvas de la planta de mezclado. Una vez ahí depositados, se dosifica mediante pesaje individual de los componentes del concreto, en forma automática el agua se mide volumétricamente, se inicia en esta etapa el proceso de mezclado del concreto para ser llevado después a una tolva, la cual de manera horizontal de desplaza hasta otras dos tolvas receptoras que a su vez éstas van distribuyendo mediante bandas a cada uno de los bloques de apoyo del durmiente (figura 4.2.1), cabe mencionar que este proceso de bandas transportadoras están condicionadas por el tiempo de llenado.

El concreto es elaborado en una mezcladora o revolvedora ya que para este proceso no se acepta el mezclado manual; la duración mínima del mezclado contada a partir del momento en que todos los componentes del concreto se encuentran en la mezcladora, es de dos a tres minutos; el revenimiento del concreto es cercano a cero.

Por otro lado; se aceitan los moldes, se equipan las parrillas de acero y el refuerzo en espiral, los cuales son colocados con la debida precisión mediante vástagos de fijación, a su vez se colocan los birlos que forman los huecos donde serán colocados los pernos tirafondo; el molde es deslizado hasta la mesa vibratoria, quedando bajo las bandas mencionadas para que empiecen a ser llenados hasta su enrase; la mesa está equipada con dos vibradores cuyo tiempo y amplitud pueden ser controlados previamente; una vez que el concreto es colado en el molde, debe ser vibrado para compactarse durante un tiempo mínimo de 70 segundos aplicado en dos periodos y se debe conseguir que el mismo rellene perfectamente el molde, sin formar oquedades y de manera que cubra y rodee completamente el acero de refuerzo (figura 4.2.1 y 4.2.2). Una vez terminado el proceso de vibrado, el molde es llevado hasta la siguiente mesa, donde se accionan los pisones neumáticos, cabe mencionar que es necesario que el proceso contenga seis moldes para asegurar de esta forma la continuidad del proceso (Figura 4.2.3).

Figura 4.2.1



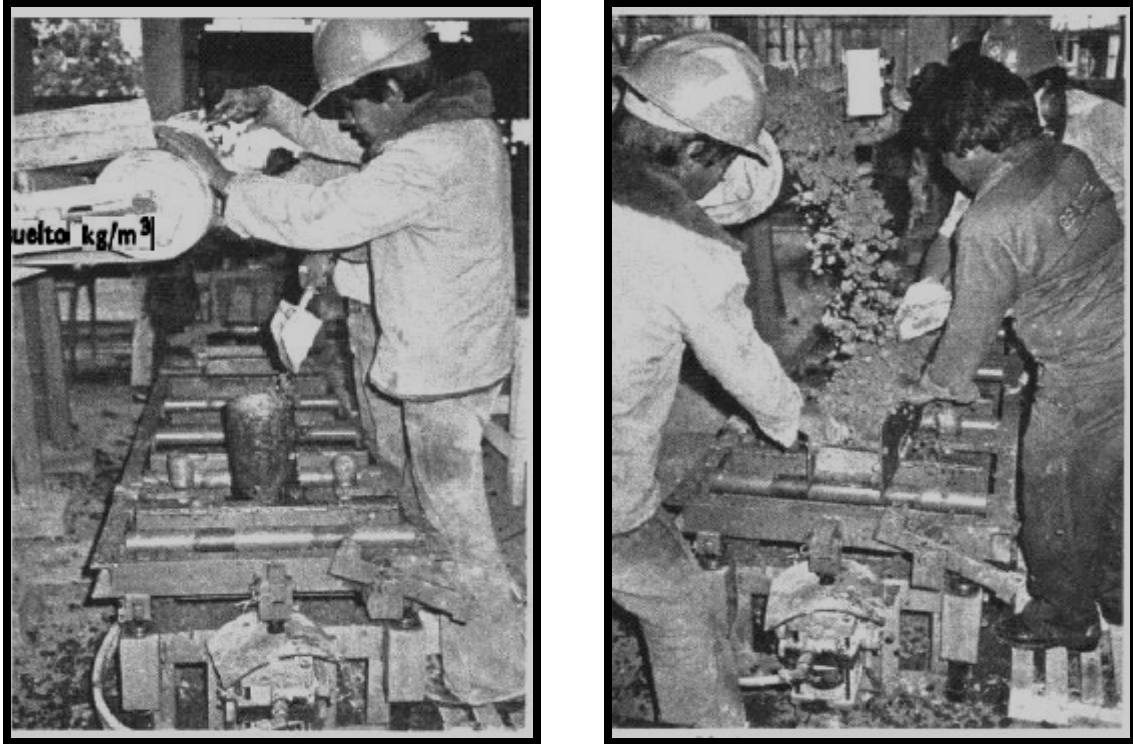


Figura 4.2.2



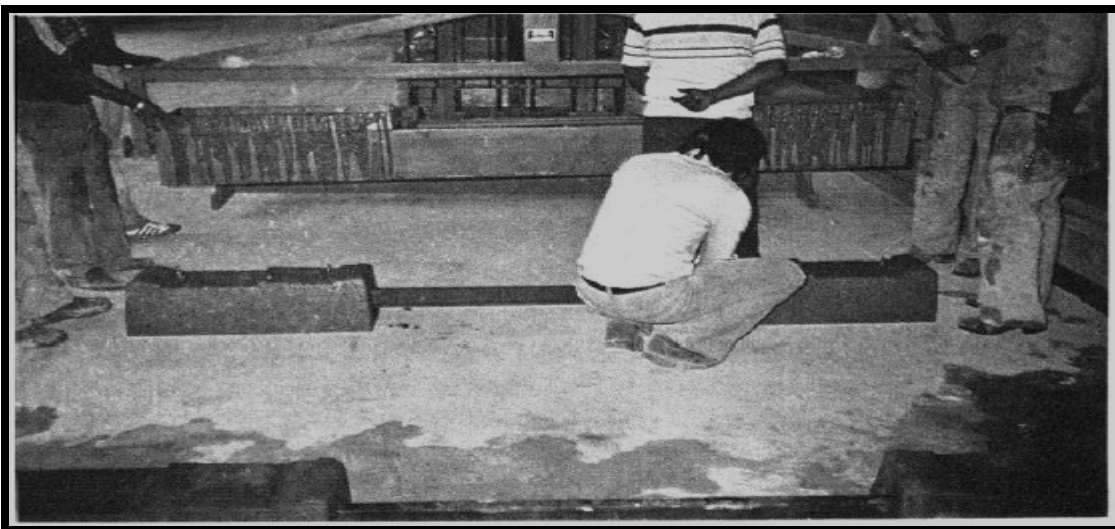
Figura 4.2.3

Posteriormente con el uso de un montacargas provisto de balancín toma el molde por sus extremos y lo transporta a la plataforma de desmoldeo, la cual consiste en un piso lo más plano posible y con un acabado fino; en el extremo más cercano a la zona de producción se encuentra una grúa que se desplaza sobre vía, misma que carga el molde lo gira 180° sobre su eje longitudinal y al retirar los vástagos de fijación, permite de esta manera depositar el durmiente recién colado sobre la plataforma de desmoldeo; así el molde queda libre para ser usado nuevamente, aplicando nuevamente el proceso en la mesa de preparación (figura 4.2.4 y 4.2.5).

Figura 4.2.4



Figura 4.2.5



Una vez llegado hasta el punto de este proceso, los durmientes se cubren de forma inmediata con un lienzo de polietileno para conservar la humedad y de esta forma evitar algún agrietamiento generado por la contracción del cemento; tres horas después de haber quitado el molde se prosigue a desatornillar y retirar los birlos del durmiente, esto se hace para verificar ahora la limpieza adecuada de los huecos que alojarán los pernos tirafondo (figuras 4.2.6 y 4.2.7)

Figura 4.2.6



Figura 4.2.7



Al siguiente día se realiza la verificación geométrica con escantillones fabricados para tal efecto, continuando con el proceso los durmientes son trasladados de dos en dos con un montacargas de horquilla, formando estibas de cuatro durmientes en planta; que puede llegar hasta una altura máxima de quince “camas” por medio de separadores de polines de madera de 4” x 4”, para así evitar el contacto directo de los durmientes (figura4.2.8).

Figura 4.2.8



Para ser trasladados los durmientes, éstos deben tener 24 horas como mínimo de fabricados, además deben llevar las marcas adicionales provenientes de su verificación, cada pieza se identifica con el número de su lote y con el número progresivo de su fabricación. Ahora bien, una vez que se ya están en la zona de almacenamiento se curan mediante riegos frecuentes durante 14 días; se procura almacenarlos en grupos, para de ésta forma identificar de que lote provienen y facilitar su ubicación (figura 4.2.9).

Figura 4.2.9





Después se someten a las pruebas de carga estática y ya aprobados se transportan para ser equipados con los pernos tirafondo y las almohadillas de apoyo del riel y pista, después se realizan las pruebas de torque a los pernos tirafondo y una vez que se aprueba el torque, geometría y carga, los durmientes se encuentran listos para su instalación en las vías de Sistema de Transporte Colectivo Metro (Figuras 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.12).

Figura 4.2.10



Figura 4.2.11



Figura 4.2.12



El proceso de fabricación de los durmientes de concreto tiene una gran importancia para la operación del Sistema de Transporte Colectivo Metro, es por eso que el control de calidad para certificar la buena calidad de los durmientes de acuerdo al diseño, se realiza de una manera muy cuidadosa; este proceso de control de calidad comienza desde antes de la producción, inicia con la certificación de los materiales que se requieren para su posterior elaboración, además el control de calidad verifica también que todo el equipo esté calibrado y que los moldes estén completamente limpios. Dado que la instalación de la vía para el Metro debe cumplir con una geometría determinada y precisa, los durmientes sobre los que descansan los perfiles de las vías deben satisfacer también ciertas características geométricas y como se mencionó anteriormente se emplean escantillones especiales para las mediciones, las tolerancias permisibles son:

- Correspondencia de las superficies de apoyo de pista y el riel entre sí:

$$\text{Tolerancia} = \pm 3 \text{ mm}$$

- Alabeo de las superficies de apoyo de pista y riel entre sí:

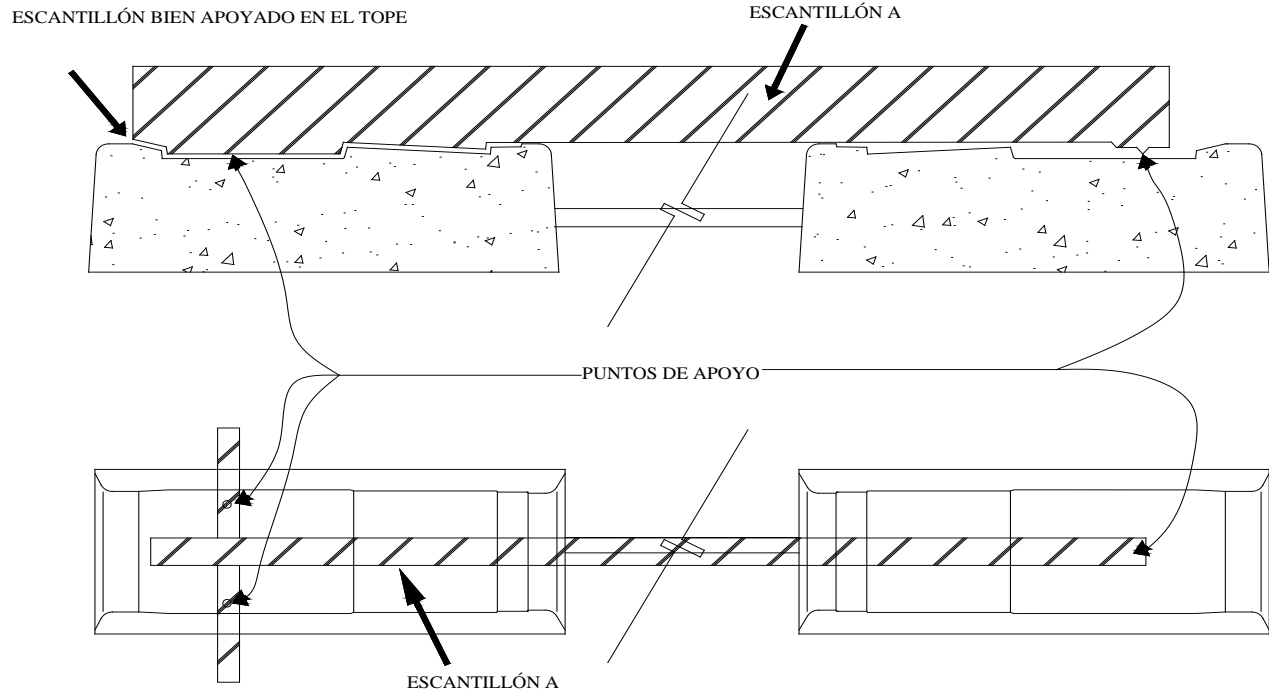
$$\text{Tolerancia} = \pm 3 \text{ mm}$$

- Distancia entre los topos exteriores del durmiente:

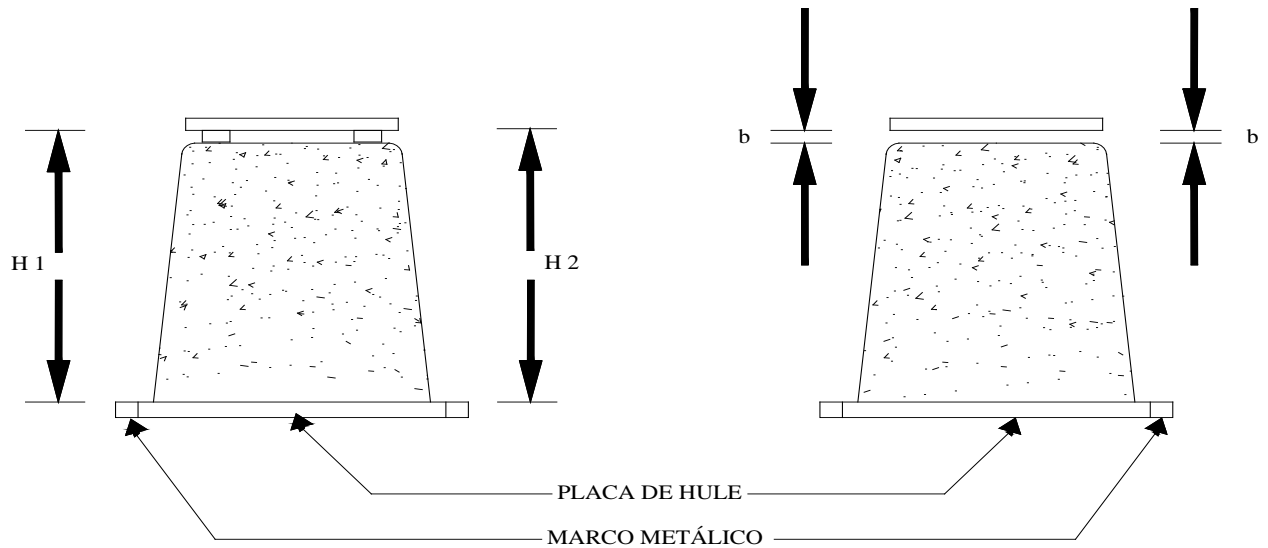
$$\text{Tolerancia} = \pm 4 \text{ mm}$$

- Distancia entre los dos topos de un mismo bloque:

$$\text{Tolerancia} = \pm 3 \text{ mm}$$



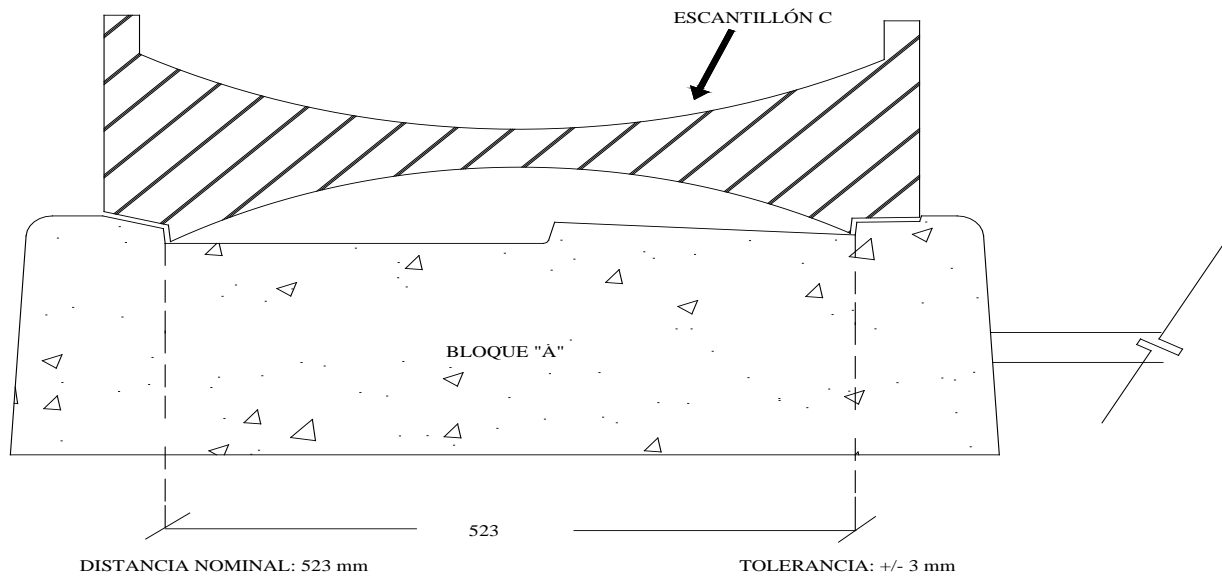
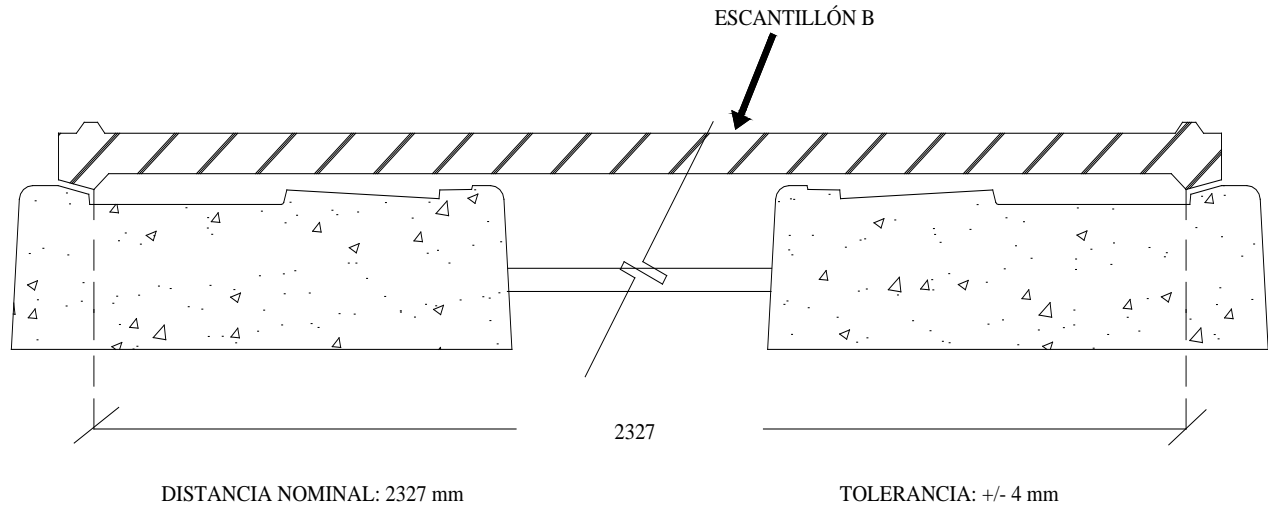
TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS EN LOS DURMIENTES DE CONCRETO



CORRESPONDENCIA DE LAS SUPERFICIES DE APOYO  
 ALABEO DE LAS SUPERFICIES DE APOYO ENTRE SÍ:  
 TOLERANCIA DE LAS ALTURAS H 1 Y H 2: (+8 , -2) mm  
 MEDIDA DE LA COTA b: 5 mm +/- 3  
 DIFERENCIA ENTRE H 1 Y H 2: +/- 5 mm

PLANARIDAD DE LAS SUPERFICIES DE APOYO DEL RIEL Y DE LA PISTA

SE COMPROBARÁ CON UNA REGLETA DE 30.0 cm DE LARGO Y DE UN ANCHO PRECISO, LA DESVIACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE APOYO CON RESPECTO AL FILO DE LA REGLETA NO DEBERÁ EXCEDER DE 1 mm.



DISTANCIA ENTRE LOS DOS TOPES DE UN MISMO BLOQUE

SE COMPROBARÁ CON UN ESCANTILLÓN "C"  
SE INDICARÁ SI ES CORRECTA O INCORRECTA  
SE REALIZARÁ LA MISMA VERIFICACIÓN CON EL BLOQUE "B"



## CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE DURMIENTES PARA EL STC-METRO



En trabajos anteriormente realizados en la planta de concreto, los durmientes de alta resistencia han tenido resultados satisfactorios en las pruebas que han sido establecidas por su especificación ejecutiva y dando buenos resultados en las vías de las líneas del STC-Metro de la Ciudad de México. El procedimiento de producción se ha ido mejorando en cada una de sus etapas, siguiendo las normas de control de calidad. Los durmientes de concreto de alta resistencia, se espera que sigan siendo una estructura vanguardista en las próximas generaciones, dado que existen proyectos de ampliación en las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro; cumpliendo con los requisitos de calidad, de uso y seguridad, alcanzando nuevos y mejores niveles que ayuden a la infraestructura de nuestro país.

Estudios sobre las estructuras de concreto, finalmente siempre tienen como objetivo principal, dar a conocer aspectos importantes que sean el punto de partida para nuevas investigaciones, nuevas y novedosas aportaciones sobre este tema que, a pesar de ser tan amplio, aún existen limitaciones en su conocimiento y en sus nuevas aplicaciones y desarrollos. La finalidad de este trabajo es emprender la iniciativa por conocer nuevos avances sobre el concreto, que serán sin duda; constantes por mucho tiempo más, aportando beneficios tanto a la ingeniería civil como a la sociedad.

## CONCLUSIONES

La elaboración de trabajos de investigación tiene un objetivo principal que sirve para desarrollar habilidades de organizar la información recopilada y habilidades de investigación que ayudan a un reconocimiento amplio sobre el tema, como lo es en este caso; para el concreto de alta resistencia en la producción de durmientes para el STC-Metro.

Se ha podido determinar que el término de *concreto* debe entenderse como un material que puede ser obtenido mediante una mezcla proporcionada de cemento, arena, grava u otro agregado y agua; que al ser cuidadosamente mezclado, puede alcanzar las dimensiones y forma deseadas conformando finalmente una masa sólida. Las características especiales que se buscan encontrar para el desarrollo de un buen concreto o un concreto satisfactorio, depende de las necesidades y requisitos de proyecto o de la estructura, sin importar que tipo de estructura o de proyecto se trate, el concreto debe cumplir con objetivos muy claros, debe tener suficiente resistencia para soportar las cargas que se le apliquen, tiene que ser capaz de perdurar bajo las condiciones de exposición a que pueda estar sometido, debe ser de bajo costo en comparación con otros materiales igualmente resistentes y durables que puedan ser empleados; por lo tanto se concluye que un buen concreto debe cumplir con requisitos tales como: resistencia, durabilidad y economía.

Los avances de las nuevas obras civiles han requerido también un desarrollo e investigación constantes, donde es notable que los principios de desarrollo de un concreto convencional muchas veces ya no satisfacen los requisitos antes mencionados, por lo que es aquí, en donde surge la necesidad de encontrar nuevas alternativas en el mejoramiento de las propiedades del concreto y una de esas alternativas ha sido el concreto de alta resistencia. Para el desarrollo de este trabajo de investigación se pudo definir el concreto de alta resistencia, como aquel; cuya resistencia a la compresión especificada medida a 28 días está entre los 420 kg/cm<sup>2</sup> o más y que tiene las propiedades deseadas y uniformidad que no pueden ser obtenidas rutinariamente usando sólo los constituyentes tradicionales, con el mezclado, colocación y curado comunes.

El concreto por ser un material primordial de construcción, permite la elaboración de estructuras seguras y durables, los principios de fabricación del concreto y las leyes que rigen su comportamiento han sido bien establecidas a través de una amplia experiencia de campo y de pruebas de laboratorio, que han hecho posible el diseño y construcción de estructuras que cumplan las normas reconocidas de uso en ingeniería, más sin embargo, también se concluye que existe la necesidad de continuar investigando, dado que constantemente se presentan nuevos problemas y se desarrollan nuevos métodos y equipos para la construcción, estas nuevas condiciones siempre exigirán ampliar nuevas investigaciones. Por lo tanto, el concreto de alta resistencia como material de construcción ha adquirido varios beneficios en sus propiedades de las cuales se mencionan las siguientes:

- Incremento de la resistencia a compresión
- Elevado módulo de elasticidad a largo plazo
- Contracción y deformación diferida controlada
- Incremento en la protección del acero de refuerzo

- Alta plasticidad
- Mayor resistencia a la abrasión y desgaste
- Mayor ciclo de vida

A partir de los datos de la especificación ejecutiva para la fabricación y suministro de durmientes de concreto de alta resistencia que menciona que debe de alcanzar una resistencia a la compresión promedio de  $490 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia a la flexión en promedio de  $65 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días y que recomienda un agregado grueso de tamaño máximo de 19 mm, un cemento tipo I ó II según la Norma ASTM-C-150 y/o la Norma Mexicana NMX-C-414 para cemento clasificado como tipo CPO o CPC y un revenimiento nulo, se procedió a realizar el proporcionamiento de la mezcla encontrando lo siguiente:

- El procedimiento se basó en resultados obtenidos en laboratorio por trabajos anteriormente realizados, así como por la experiencia del ingeniero de laboratorio.
- Aún cuando existen recomendaciones y ayudas proporcionadas por algunas instituciones que han efectuado estudios sobre el tema, para el procedimiento de diseño de mezclas de concreto de alta resistencia también se requirió experiencia, intuición, conocimiento de los principios básicos, conocimiento de los materiales disponibles, así como el uso de mezclas de pruebas previas para determinar finalmente los materiales a utilizar en la mezcla de concreto de alta resistencia.
- Se observó que las características de los agregados seleccionados influyeron de manera directa en la composición del concreto para alcanzar la trabajabilidad en el concreto fresco; su masa, su forma, su absorción y su densidad fueron puntos clave para alcanzar la resistencia de proyecto.
- Se llevo a cabo una investigación consciente sobre el agregado fino, para satisfacer las necesidades de la mezcla de concreto y finalmente el agregado ideal fino para el desarrollo del presente trabajo, presentó una arena andesítica, cumpliendo con las normas de referencia NMX-C-30, 73, 77, 084, 165 en vigor.
- Para el agregado grueso, la investigación de laboratorio y estudios previos, presentaron que el agregado ideal grueso sería una grava basáltica, presentando una alta densidad, que brindó beneficios para el concreto de alta resistencia, cumpliendo con las normas de referencia NMX-C-30, 73, 77, 084, 164 en vigor.
- La relación grava/arena de 1.82 empleada en el diseño de mezcla, presentó las mejores características tanto en estado fresco como en el estado endurecido.
- El tamaño máximo del agregado cumple con las recomendaciones de la especificación, la cual menciona un tamaño máximo de 19 mm, el cual fue utilizado en el proporcionamiento de la mezcla de concreto de alta resistencia.

- Para alcanzar los requisitos de proyecto se definió que el tipo de cemento utilizado fuera un cemento portland ordinario de clase resistente 40 (resistencia mínima a 28 días  $408 \text{ kg/cm}^2$ ), su selección fue debido a que este tipo de cemento presentó mejores características de desarrollo de resistencia.
- Se observó que a mayor cantidad de cemento, la resistencia a compresión aumenta. La mezcla de concreto con agregado basáltico, manifestó de esta forma, un mayor aumento neto de resistencia para el contenido de cemento utilizado en el concreto. El consumo óptimo de cemento para alcanzar altas resistencia fue del orden de  $465 \text{ kg/m}^3$ .
- Respecto a la relación agua/material cementante, se pudo observar en el propocionamiento, que al ser baja la relación agua/material cementante se obtiene mayor resistencia a la compresión. En la mezcla de concreto de alta resistencia con agregado fino andesítico y agregado grueso basáltico, presentó un mayor incremento neto de resistencia, con la disminución de la relación agua/material cementante establecida en el proporcionamiento de la mezcla.
- Para lograr alcanzar la resistencia a la compresión especificada de proyecto en el laboratorio, los cilindros de concreto fueron sometidos a una temperatura de  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ; llevando un control de la humedad en la atmósfera a tal grado que se asegure que todas superficies expuestas de los cilindros estén húmedas en cualquier momento.
- Los resultados a compresión de los cilindros de concreto a diferentes edades, permiten reflexionar si la selección de la proporción de los materiales en la mezcla de concreto es idónea para alcanzar nuestra resistencia de proyecto, dichos resultados de igual forma, quedan registrados como guías y soporte para próximas mezclas de prueba en el laboratorio.
- Los resultados de resistencia a compresión sobre los cilindros de concreto de alta resistencia, superan la resistencia a compresión especificada de proyecto a 28 días que es requerida y que es del orden de  $490 \text{ kg/cm}^2$ , como se puede observar en la tabla de resultados 3.4.1; para una resistencia a la compresión a 7 días, supera significativamente a esta edad, la resistencia requerida de proyecto.
- El promedio de la resistencia máxima a compresión a 7 días obtenida en los ensayos de laboratorio es de  $622 \text{ kg/cm}^2$ ; mientras que la mínima presentó un resultado de  $546 \text{ kg/cm}^2$ , alcanzando el objetivo inicial de proyecto y cumpliendo las especificaciones pertinentes.
- La resistencia a compresión requerida de proyecto para la edad de 28 días, como se encuentra establecido en la especificación ejecutiva, es de un promedio del orden de  $490 \text{ kg/cm}^2$ ; los resultados de pruebas de laboratorio a 28 días muestra una resistencia a compresión máxima de  $739 \text{ kg/cm}^2$  y una mínima de  $623 \text{ kg/cm}^2$ ; dichos resultados son satisfactorios y cumplen con la especificación ejecutiva y el objetivo de proyecto.



- Respecto a la resistencia a la flexión, en donde la especificación establece que debe encontrarse en un promedio de  $65 \text{ kg/cm}^2$  a 28 días, puede observarse en los resultados de laboratorio que para la resistencia a flexión a 7 días ya se había superado la resistencia del proyecto a excepción de las muestras No. 13, 21, 22 y 23; estando por debajo de la resistencia de proyecto.
- El promedio de la resistencia máxima a flexión sobre las vigas de concreto a 7 días fue de  $91 \text{ kg/cm}^2$ ; por su parte la resistencia mínima para esta misma edad; fue de  $57.7 \text{ kg/cm}^2$ . Estos resultados llevo a esperar la edad de la prueba a 28 días específicamente para las muestras No. 13, 21, 22 y 23 antes mencionadas, para conocer su comportamiento y su resistencia final a 28 días como se manifestaba en la especificación ejecutiva del proyecto.
- A la edad de 28 días, los resultados de las muestras No. 13, 21, 22 y 23; habían superado la resistencia a flexión requerida de proyecto, por lo que finalmente alcanzaron y cumplieron con los requisitos establecidos en la especificación ejecutiva.
- Los resultados del módulo de ruptura de las muestras No. 13, 21, 22 y 23 superaron la resistencia a flexión especificada, más sin embargo quedaron en un promedio bajo en comparación con los resultados de las demás pruebas de laboratorio sometidas a carga a flexión, se concluyó que dos de las causas que afectaron dichos resultados, se debieron a la rapidez de la aplicación de la carga sobre la viga de prueba, otro factor que también influye considerablemente es el tiempo y la temperatura de curado, se consideró que muy probable no fueron sometidos a la temperatura y tiempo de curado.
- Finalmente, el promedio de los resultados de la resistencia máxima a flexión sobre las vigas de prueba, presentó una resistencia a la flexión del orden de  $110.6 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia mínima del orden de  $77.9 \text{ kg/cm}^2$ ; dando así resultados satisfactorios que cumplen el objetivo establecido en la especificación ejecutiva del proyecto.

A pesar de que existen muchas fuentes de información y de control en el desarrollo y producción de estructuras de concreto, existen factores que pueden llegar hasta cierto punto afectar, atrasar y modificar el plan de trabajo, dado que muchas veces la forma costumbrista, provoca que la misma inercia de los trabajos realizados, sigan una misma mecánica y procedimiento de fabricación, ya sea en planta, en la producción de estructuras de concreto; como lo es en el laboratorio e incluso con los ingenieros de proyecto. Debe existir una comunicación estricta y amplia en todas las fases de desarrollo y producción para lograr finalmente; un proyecto de calidad, en donde la estructura en estudio, satisfaga las necesidades y requisitos de seguridad y de uso, a las cuales estará sometida la estructura; de ello depende mucho la experiencia del ingeniero proyectista, el ingeniero de laboratorio, así como de todo el personal involucrado para desarrollar dichos trabajos. Cumpliendo con la ética, profesionalismo, la normatividad a que se está sujeta y principalmente cumpliendo con los objetivos principales del proyecto; con el buen aprovechamiento del conocimiento, de la información, de las nuevas técnicas de trabajo, así como de los avances en la maquinaria y equipos empleados.

## RECOMENDACIONES

- La relación agua/material cementante puede decirse que es el factor más importante que puede llegar afectar la resistencia del concreto; es por esto que la producción de concreto de alta resistencia solicitará del uso de relaciones bajas, que en base a mezclas de prueba se podrá obtener resultados satisfactorios.
- Para este tipo de concretos existe la necesidad de obtener una buena compactación, teniendo en cuenta que si la compactación se hace por vibración, es de importancia que se efectuó con el tiempo y la forma adecuados, para obtener la máxima compactación sin segregación.
- Es importante considerar la selección del tamaño máximo del agregado para lograr una mejor trabajabilidad y resistencia en la mezcla, con una relación agua/material cementante baja y el menor contenido de cemento.
- Las mezclas de concreto de alta resistencia que tienen altos consumo de cemento y un tamaño máximo de agregado grueso del orden de 19 mm brindan un buen comportamiento ya que existe una adecuada adherencia entre el mortero y agregado, lo que permite obtener un incremento considerable en la resistencia del concreto.
- Para el concreto de alta resistencia se recomienda trabajar con revenimientos bajos.
- Es importante contar con un laboratorio competente que tenga el equipo de medición y preparación para las mezclas de prueba, que cumpla con los requisitos de certificación y control de calidad adecuados para diseñar mezclas de concreto de alta resistencia.
- En estructuras de concreto de alta resistencia, existe la necesidad de seguir obteniendo información con la ayuda de las pruebas de laboratorio que sea segura y confiable, específicamente en estructuras en donde se requiera conocer los efectos del concreto a largo plazo, dado que en su gran mayoría los resultados de laboratorio están basados a la edad de 28 días. Se conoce que el concreto sigue ganando un porcentaje mínimo de resistencia con el paso del tiempo; para cuestiones de estudio e investigación sería recomendable especificar resistencias a compresión a 56 ó 90 días.
- Una situación a considerar es que las condiciones reales de obra, las de laboratorio y los requerimientos de proyecto rara vez coinciden entre sí; por esto es recomendable hacer un programa de trabajo y de pruebas, para determinar un procedimiento adecuado de mezclado, así como de los materiales que serán utilizados, en conjunto con las condiciones reales de la obra. Se recomienda realizar un programa de trabajo y de pruebas que beneficie a estas tres partes fundamentales de trabajo como lo son, el proyecto, el laboratorio y la obra.
- Se hace conveniente y necesaria la continuidad de la investigación del concreto de alta resistencia, con diferentes tipos de agregados, diferente tipo de cemento e incluso con la adición de diferentes aditivos; dado que este estudio sólo cubre una pequeña parte de las características y comportamiento del concreto de alta resistencia.

## TABLAS Y GRÁFICAS

TABLA 1

ESPECIFICACION EJECUTIVA PARA LA FABRICACIÓN Y SUMINISTRO DE DURMIENTES DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA PARA EL METRO DE CIUDAD DE MEXICO	
<b>Objetivo</b>	Esta especificación define los requerimientos mínimos que deberá cumplir: El durmiente, los materiales componentes, las dimensiones límites, las pruebas de laboratorio, el control de calidad de los materiales empleados en la fabricación, el almacenamiento, el transporte y la garantía.
<b>Alcance</b>	Fabricación Pruebas de fabricación Suministro del durmiente Garantía
<b>Referencias utilizadas</b>	Los documentos aplicables como referencia para llevar a cabo la calidad de los durmientes, serán las Normas NMX, ASTM vigentes.
<b>Descripción</b>	Los durmientes son elementos de sección trapezoidal uniforme, están compuestos por dos bloques de concreto de alta resistencia, que soportan los rieles y pistas de rodamiento y que son utilizados para equipar las vías del Metro de la Ciudad de México. Estos bloques de concreto quedarán unidos por un tirante metálico cuyos extremos quedan embebidos en los bloques de concreto.
<b>Tolerancias</b>	
<b>Uniformidad de las superficies de apoyo del riel y la pista</b>	Se hará una comprobación con una regla de 300 mm de largo y 38 mm de ancho o más, la desviación de las superficies de apoyo con respecto a la regleta no deberá exceder de 1 mm para el aislador.
<b>Cemento</b>	El cemento portland a utilizar debe ser del tipo I ó II y cumplir con los parámetros establecidos en la Norma ASTM-C-150 y/o la Norma NMX-C-414 para cemento clasificado como tipo CPO o CPC.
<b>Agregados</b>	
<b>Arena</b>	El contenido de partículas deleznable, partículas ligeras, módulo de finura, impurezas orgánicas y la granulometría debe cumplir con los límites establecidos en la Norma NMX-C-111.
<b>Grava</b>	La grava a utilizar deberá ser del tipo basáltico o calizo con una densidad mayor a 2.5 y tamaño máximo de 19 mm, además debe cumplir los límites establecidos en la Norma NMX-C-111.

ESPECIFICACION EJECUTIVA PARA LA FABRICACIÓN Y SUMINISTRO DE DURMIENTES  
DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA PARA EL METRO DE CIUDAD DE MEXICO

**Agua**

El agua que se utilice en la elaboración del concreto no deberá contener cantidades de impurezas superiores a los límites indicados en la siguiente tabla:

TABLA DE LIMITES RECOMENDABLE DE IMPUREZAS EN AGUA PARA CONCRETO	
Sulfatos (SO <sub>4</sub> ), máximo en ppm	300
Cloruros (como Cl), máximo en ppm	300
Magnesio (como Mg), máximo en ppm	150
Materia orgánica (oxígeno consumido En medio ácido), máximo en ppm	10
Sólidos totales en solución, máximo en ppm	1500
PH, no menor de	7

**Composición del Concreto**

Las pruebas para determinar la resistencia del concreto a la compresión se realizarán de acuerdo a la Norma NMX-C-083 y deberá ser en promedio de 490 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de edad del concreto; en adición, se determinará la resistencia a flexión del concreto que se realizará de acuerdo a la Norma NMX-C-303, esta resistencia deberá ser en promedio de 65 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de edad del concreto.

**Fabricación de los durmientes**

**Vaciado del concreto**

El vaciado de la mezcla en los moldes, se realizará después de la colocación de los elementos que dejarán los huecos para alojar las fijaciones, el acero de refuerzo y el tirante metálico. El vaciado se llevará a cabo empleando los medios adecuados para que el concreto conserve su homogeneidad.

**Desmoldeo**

El desmoldeo de los bloques del durmiente debe hacerse de forma simultánea.

**Acabados**

El alisado con llana no será permitido, podrá tolerarse afinaciones en pequeñas áreas donde lo requiera. Ninguna parte metálica deberá quedar visible, con excepción de los herrajes de los huecos del perno tirafondo. Todo durmiente que presente defectos en la estructura después del desmoldeo, será demolido de inmediato, el tirante y los armados podrán volverse a utilizar después de verificar su estado.

**Permanencia en el área de desmoldeo**

Para condiciones normales de curado, los durmientes deberán permanecer como mínimo 15 hrs en el área de desmoldeo.

**Curado**

Los durmientes serán curados manualmente con agua.



CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE  
DURMIENTES PARA EL STC-METRO



ESPECIFICACION EJECUTIVA PARA LA FABRICACIÓN Y SUMINISTRO DE DURMIENTES  
DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA PARA EL METRO DE CIUDAD DE MEXICO

Almacenamiento

Los durmientes serán almacenados por lotes en un lugar de fácil acceso. Cada durmiente deberá llevar el día de colado y su número correspondiente. Los durmientes podrán sobreponerse hasta la altura correspondiente de 19 camas como máximo; entre cada cama deberán colocarse separadores de madera de 76 x 76 mm aproximadamente. Los durmientes de camas adyacentes no deberán tocarse entre si.

Transporte

Los embarques deberán comprender sólo aquellos lotes que hayan pasado satisfactoriamente todas las pruebas de recepción.

Garantía

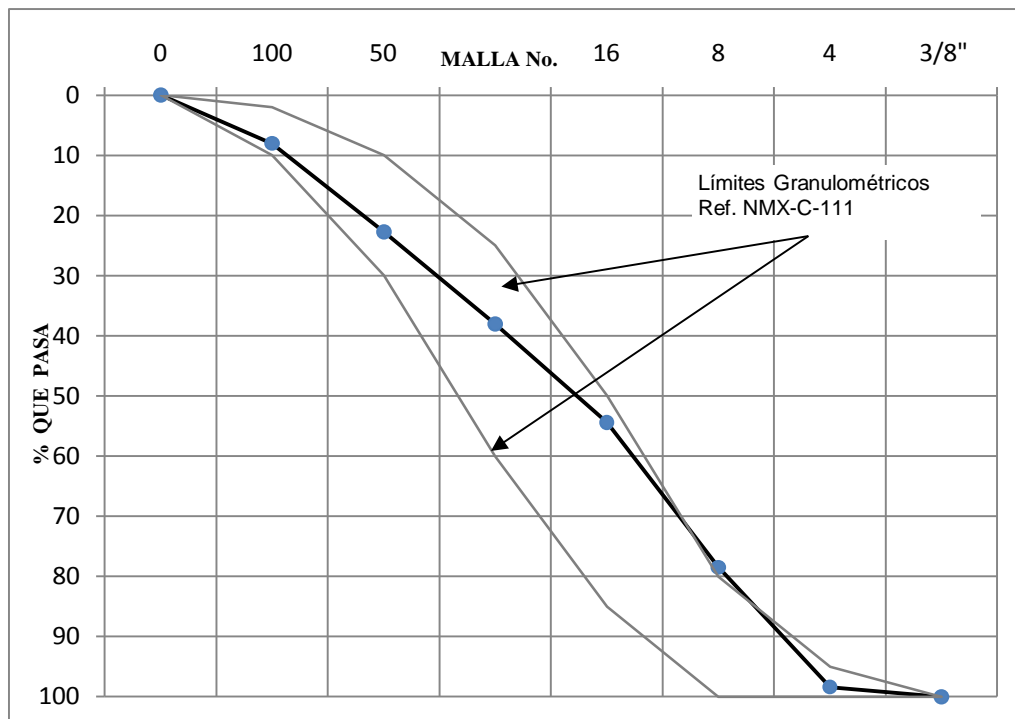
La planta garantiza el buen comportamiento de los durmientes en la vía, durante un año de operación, contra cualquier defecto de fabricación que pudiera manifestarse como consecuencia de los esfuerzos debidos a las cargas rodantes.

**TABLA 2**

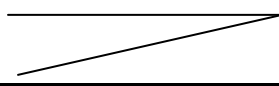
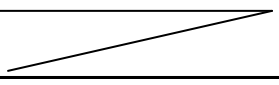
<b>ESTUDIO FÍSICO DE LA ARENA</b>						
Ensaye No.: 05			Fecha de Muestreo: Diciembre 2009			
			Fecha de Reporte: Diciembre 2009			
			Reporte No.: 01			
Obra: Durmientes de concreto de alta resistencia			Cliente: Sistema De Transporte Colectivo Metro			
<b>MASA VOLUMÉTRICA</b>						
Masa Volumétrica Suelta (Kg)			Masa Volumétrica Compacta (kg)			
Recipiente Volumétrico No.: 08			(a) Peso de recipiente (kg)= 3.298			
Peso de material (Kg) + (a)= 11.005			Peso de material (Kg) + (a)= 11.527			
Peso de material (Kg) - (a)= 7.707			Peso de material (Kg) - (a)= 8.229			
Volumen y/o factor de recipiente= 0.20			Volumen y/o factor de recipiente= 0.20			
Masa Volumétrica (Kg/m)= 1.541			Masa Volumétrica (Kg/m)= 1.646			
<b>DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECIFICA (SSS)</b>						
a.- Peso de material sss (g)= 500			b.- Peso de picnómetro lleno de agua (g)= 1492			
c.- Masa de picnómetro con muestra lleno de agua (g)= 1			Messs= (a / ((b + a) - c))= 2.42			
<b>DETERMINACIÓN DE ABSORCIÓN (%)</b>						
a.- Peso de material sss (g)= 500			b.- Peso seco (g)= 480			
c.- Diferencia de a - b= 20			% de absorción (c/b)*100= 12.5			
<b>PÉRDIDA POR LAVADO SOBRE MALLA No. 200</b>						
a.- Peso de material seco sin lavar (g)= 932.7			b.- Peso de material seco lavado (g)= 816.3			
c.- Diferencia de a - b (g)= 116.4			% de pérdida por lavado (c/a)*100= 12.5			
<b>GRANULOMETRÍA</b>						
Malla No.	Abertura de malla (mm)	Peso de suelo retenido (g)	Peso de suelo retenido (%)	Peso de suelo Acumulado (%)	% que pasa	<b>Normas de referencia:</b>  NMX-C-73  NMX-C-77  NMX-C-084  NMX-C-165  <b>En vigor</b>
3/8"	9.52	0	0	0	100	
4	4.76	14.1	1.6	1.6	98.4	
8	2.38	174.4	19.9	21.5	78.5	
16	1.13	211.5	24.1	45.6	54.4	
30	0.59	144	16.4	62.0	38.0	
50	0.297	134	15.3	77.3	22.7	
100	0.149	129.1	14.7	92.0	8.0	
CH	—	70	8.0	100.0	0.0	
	<b>Suma=</b>	<b>877.1</b>				
<b>MF= 3</b>						
<b>Partículas de carbón y lignito (%)</b>			<b>Observaciones:</b>			
_____						
<b>Partículas deleznales (%)</b>			_____			
_____						

GRÁFICA 1 ANÁLISIS GRANULOMETRICO ARENA

N° de Malla	% Real Que pasa	% Esp. que pasa	
		Min.	Máx.
0	0	0	0
100	8.0	2	10
50	22.7	10	30
30	38.0	25	60
16	54.4	50	85
8	78.5	80	100
4	98.4	95	100
3/8"	100	100	100



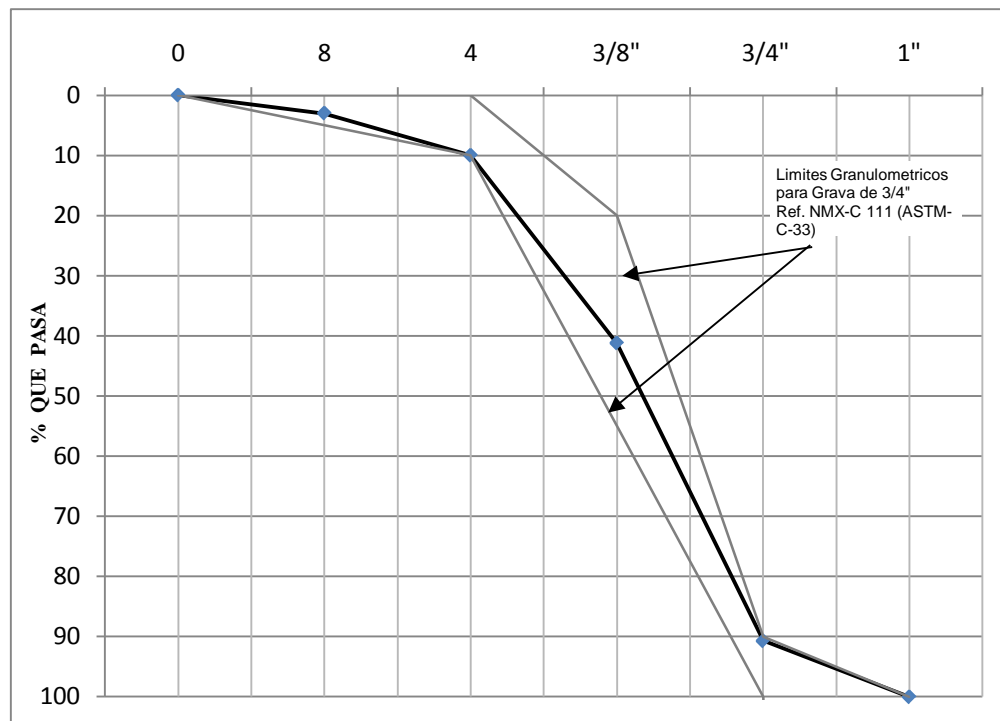
**TABLA 3**

<b>ESTUDIO FÍSICO DE LA GRAVA</b>						
Ensaye No.: 02			Fecha de Muestreo: Diciembre 2009			
			Fecha de Reporte: Diciembre 2009			
			Fecha de Reporte: Diciembre 2009			
Obra: Durmientes de concreto de alta resistencia			Cliente: Sistema De Transporte Colectivo Metro			
<b>MASA VOLUMÉTRICA</b>						
Datos		Suelta		Compacta		
a) Peso de recipiente (g):		3298		3298		
Recipiente Volumétrico No.:		8		8		
b) Pes ode material más recipiente (g):		10706		11249		
c) peso de material neto (b - a) en gramos:		7408		7951		
d) Volumen y/o factor de recipiente:		0.2		0.2		
Masa Volumétrica en kg/m3 (c * d):		1.482		1.590		
<b>DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECIFICA (SSS)</b>						
a.- Peso de material Msss (g)= 1064			t.- Masa de tara sumergido en agua (g)= 2959			
b.- Masa bruta sumergida en agua (g)= 3628			v= Masa de agua desalojada (a - b) + t= 395			
Messs: Masa especifica saturada y superficie seca (kg/dm3 )= a / v= 2.69						
<b>DETERMINACIÓN DE ABSORCIÓN (%)</b>						
a.- Peso de material sss (g)= 1064			b.- Peso seco (g)= 1055.7			
c.- Diferencia de a - b= 8.3			% de absorción (c/b)*100= 0.8			
<b>PÉRDIDA POR LAVADO SOBRE MALLA No. 200</b>						
a.- Peso de material seco sin lavar (g)= 7144			b.- Peso de material seco lavado (g)= 7079			
c.- Diferencia de a - b (g)= 65			% de pérdida por lavado (c/a)*100= 0.9			
<b>GRANULOMETRÍA</b>						
Malla No.	Abertura de malla (mm)	Peso de suelo retenido (g)	Peso de suelo retenido (%)	Peso de suelo Acumulado	% que pasa	<b>Normas de referencia:</b>  NMX-C-73  NMX-C-77  NMX-C-084  NMX-C-165  NMX-C-170  En vigor
1"	25.4	0	0	0	100	
3/4"	19	1337	9.3	9.3	90.7	
3/8"	9.52	7086	49.5	58.8	41.2	
4	4.76	4464	31.2	90.0	10.0	
8	2.38	1002	7.0	97.0	3.0	
CH	-	432	3.0	100.0	0.0	
	<b>Suma=</b>	<b>14321</b>				
<b>Tamaño Máx. de agregado (mm)= 19</b>						
<b>Partículas de carbón y lignito (%)</b>				<b>Observaciones:</b>		
						
<b>Partículas deleznales (%)</b>						
						



GRÁFICA 2 ANÁLISIS GRANULOMETRICO GRAVA

N° de Malla	% Real Que pasa	% Esp. que pasa	
		Min.	Máx.
0	0	0	0
8	3	0	5
4	10	0	10
3/8"	41.2	20	55
3/4"	90.7	90	100
1"	100	100	100



**TABLA 4 REPORTE DE CORRECCIONES POR HUMEDAD Y CONTAMINACIÓN DE AGREGADOS**

DATOS DE PROYECTO									
Fecha: Dic-09					F'c (kg./cm <sup>2</sup> ): 490				
Reporte de corrección por humedad y contaminación de agregados					Rev. (cm.): 0				
Obra: Durmientes de concreto de alta resistencia					T.M.A.: 3/4"				
					Corrección. N°: 01				
DETERMINACION DE HUMEDADES					CORRECCIONES POR CONTAMINACION				
	MATERIALES					MATERIALES			
	Arena Lav.	Arena Sucia		Grava	Unidad	Pesos	Arena	Peso	Grava
a) Peso húmedo	565	543	Gr	3186		Inicial (gr):	N/A	Inicial (gr):	N/A
b) peso seco	532	518	Gr	3157	Gr	Ret. M -4 (gr):	N/A	Que pasa. M -4 (gr):	N/A
c) Dif. de (a - b)	33	25	Gr	29	Gr	Cont. de Grava (%):	N/A	Cont. de Arena (%):	N/A
% de Humedad	6.2	4.8	%	0.9	%				
CORRECIÓN POR CONTAMINACIÓN									
Material	Peso base (kg/m <sup>3</sup> )	ARENA		GRAVA		MATERIALES CORREGIDOS (kg/m <sup>3</sup> )			
		%	kg	%	kg				
Arena		0.0	0			0			
Grava 3/4"				0.0	0	0			
Suma						0			
CORRECCIONES POR HUMEDAD									
Materiales	Cant. Saturada (kg./ m <sup>3</sup> )	Humedad		Absorción		Cantidades Corregidas	Cantidades a utilizar		
		%	Peso (kg.)	%	Peso (kg.)				
Cemento	465					465	465		
Arena lavada	551	6.2	34	4	22	563	563		
Arena Sucia	236	4.8	11	4	9	238	238		
Grava	1005	0.9	9	0.8	8	1006	1006		
Agua	142	—	55	—	40	127	127		
Suma (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2399</b>					<b>2399</b>			

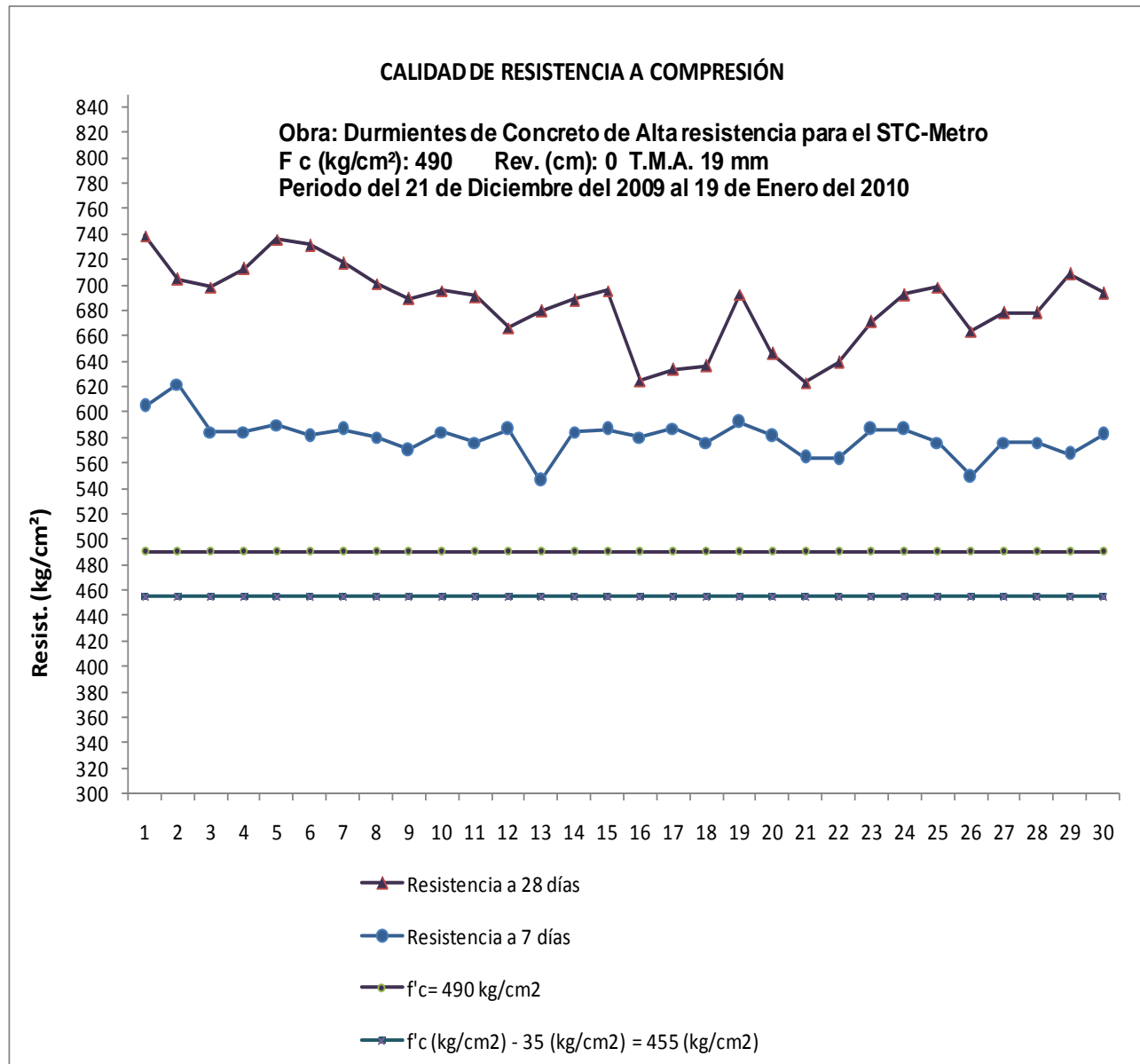
TABLA 5 COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO TEÓRICO Y SU CORRECCIÓN POR HUMEDAD

COMPARACIÓN ENTRE EL PROPORCIONAMIENTO TEÓRICO Y SU CORRECCIÓN POR HUMEDAD								
PROPORCIONAMIENTO Y CONTROL DE HUMEDAD DE LA MEZCLA								
DATOS DE DISEÑO								
Fecha de elaboración: <b>Diciembre, 2009</b>	Obra: <b>Durmientes de concreto de alta resistencia para el STC-Metro</b>	F'c (kg / cm <sup>2</sup> ):	<b>490</b>	Rel A/C (peso):	<b>0.27</b>			
		F'ci (kg / cm <sup>2</sup> ):	--	Rel g/a (peso):	<b>1.79</b>			
Elemento a colar: <b>Durmientes de concreto de alta resistencia</b>		Rev. de proy. (cm):	<b>0</b>	Vol. Lechada (l):	--			
		T.M.A. (mm):	<b>19</b>	Cont. Grava (%):	<b>41.9</b>			
		Aditivo (cc/kg de cem.) N° 1:	--	Cont. Arena (%):	<b>23.5</b>			
		Aditivo (cc/kg de cem.) N° 2:	--					
MATERIALES Y CARACTERISTICAS								
Material	Observaciones	Densidad	Cantidad	Unidad	Vol. (L)			
		kg/dm <sup>3</sup>						
Cemento tipo CPO 40		3.15	465	kg	148			
Agua Potable	Red Municipal	1.00	142	l	142			
Grava 3/4"	Basáltica	2.68	1005	kg	375			
Arena lavada	Se usará el 70 % de arena andesítica	2.42	551	kg	228			
Arena sin lavar	Se usará el 30 % de arena andesítica	2.42	236	kg	98			
					0			
	Total de arena= 100%				0			
				l				
Vacíos			2.0	%	10			
					675			
<b>Vol. Teórico a producir</b>	<b>1000</b>	Litros	Total kg/ m <sup>3</sup> =	2399	L / m <sup>3</sup> =	<b>1000</b>		
CANTIDADES CORREGIDAS POR HUMEDAD								
Material	Material (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad (%)	Contenido de Hum. (kg)	Absorción (%)	Absorción (kg)	Cantidad corr. (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad a utilizar	
Cemento	465					465	465	
Grava	1005	0.9	9	0.8	8	1006	1006	
Arena lavada	551	6.2	34	4	22	563	563	
Arena sin lavar	236	4.8	11	4	9	238	238	
Agua	142	—	55	—	40	127	127	
Suma =	<b>2399</b>					<b>2399</b>		

**TABLA 6 CALIDAD DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

<b>Obra: Durmientes de concreto de alta resistencia para el STC-Metro</b>						
<b>F'c (kg/cm²): 490</b>		<b>TMA: 19 mm</b>			<b>Rev. Proy. (cm): 0</b>	
<b>Reporte: 01</b>		<b>Fc (kg/cm²) - 35 (kg/cm²)= 455 (kg/cm²)</b>				
Fecha de Colado	Muestra N°	Rev. cm	7 días	28 días	F'c (kg/cm²) de diseño	F'c (kg/cm²) - 35
			Prom.	Prom.		
21-Dic-09	1	0	604	739	490	455
22-Dic-09	2	0	622	704	490	455
23-Dic-09	3	0	584	698	490	455
24-Dic-09	4	0	584	713	490	455
25-Dic-09	5	0	590	736	490	455
26-Dic-09	6	0	581	731	490	455
27-Dic-09	7	0	586	717	490	455
28-Dic-09	8	0	580	701	490	455
29-Dic-09	9	0	570	689	490	455
30-Dic-09	10	0	584	696	490	455
31-Dic-09	11	0	576	691	490	455
1-Ene-10	12	0	586	667	490	455
2-Ene-10	13	0	546	680	490	455
3-Ene-10	14	0	584	688	490	455
4-Ene-10	15	0	586	696	490	455
5-Ene-10	16	0	580	624	490	455
6-Ene-10	17	0	587	633	490	455
7-Ene-10	18	0	576	636	490	455
8-Ene-10	19	0	592	693	490	455
9-Ene-10	20	0	581	646	490	455
10-Ene-10	21	0	564	623	490	455
11-Ene-10	22	0	563	639	490	455
12-Ene-10	23	0	586	671	490	455
13-Ene-10	24	0	586	693	490	455
14-Ene-10	25	0	576	699	490	455
15-Ene-10	26	0	549	664	490	455
16-Ene-10	27	0	576	678	490	455
17-Ene-10	28	0	576	678	490	455
18-Ene-10	29	0	567	708	490	455
19-Ene-10	30	0	582	694	490	455

GRÁFICA 3 CALIDAD DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN



**TABLA 7 MÉTODOS Y EQUIPOS PARA EL TRANSPORTE Y MANEJO DEL CONCRETO**

<b>EQUIPO</b>	<b>TIPO DE TRABAJO MÁS ADECUADO PARA EL EQUIPO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>PUNTOS A FFIARSE</b>
Baldes (cubos, cubetas, tolvas)	Usados con las grúas cablevías y helicópteros para la construcción de edificios y presas. Transporta el concreto directamente del punto de descarga en la central hasta la cimbra (encofrado) o hasta un punto secundario de descarga	Permite el aprovechamiento total de la versatilidad de las grúas, cablevías y helicópteros. Descarga limpia. Gran variedad de capacidades.	Escoja la capacidad del cubo de acuerdo con el tamaño de la mezcla y la capacidad del equipo de colocación. Se debe controlar la descarga.
Bombas	Usadas para transportar concreto directamente desde el punto de descarga de la central hasta la cimbra (encofrado) o el punto de descarga secundario	La tubería ocupa poco espacio y se la puede extender fácilmente. La descarga es continua. La bomba puede mover el concreto vertical y horizontalmente. Bombas montadas en camiones pueden entregar concreto tanto en obras pequeñas como en grandes proyectos. Los aguilonos (plumas) estacionarios proveen concreto continuamente para la construcción de edificios altos.	Se hace necesario un suministro de concreto fresco constante con consistencia media y sin la tendencia a segregarse. Se debe tener cuidado al operar la tubería para garantizar un flujo uniforme. Además, se le debe limpiar al concluirse cada operación. El bombeo vertical con curvaturas y a través de mangueras flexibles va a reducir considerablemente la distancia máxima del bombeo.
Camión agitador	Usados para el transporte de concreto para pavimentos, estructuras y edificios. La distancia de transporte debe permitir la descarga del concreto en 1 ½ hora, por este límite se puede ignorar bajo ciertas circunstancias.	Se operan desde una central mezcladora donde se produce concreto de calidad bajo condiciones controladas. La descarga desde los agitadores es controlada. Hay uniformidad y homogeneidad del concreto en la descarga.	El tiempo de descarga debe adecuarse a la organización de la obra. El personal y los equipos deben estar listos en la obra para el manejo del concreto.
Camión mezclador	Usados para el transporte de concreto para pavimentos, estructuras y edificios. La distancia de transporte debe permitir la descarga del concreto en 1 ½ hora, por este límite se puede ignorar bajo ciertas circunstancias.	No se necesita de central mezcladora, sólo una planta de dosificación, pues el concreto se mezcla completamente en el camión. La descarga es la misma que en el camión agitador.	El tiempo de descarga debe adecuarse a la organización de la obra. El personal y los equipos deben estar listos en la obra para el manejo del concreto. El control de calidad del concreto no es tan bueno como en la central mezcladora.
Camiones no agitadores	Usados para transportar concreto en distancias cortas sobre pavimentos lisos.	El costo del capital del equipo no agitador es menor que el de los camiones agitadores y mezcladores.	El revenimiento del concreto se debe limitar. Posibilidad de segregación. Se necesita de una altura libre para levantar el cuerpo del camión en la descarga
Canalones sobre camión mezclador	Para transportar concreto a un nivel inferior, normalmente abajo del nivel del terreno, en todos los tipos de construcción de concreto.	Bajo costo y facilidad de maniobrar. No necesita fuerza, pues la gravedad hace la mayor parte del trabajo.	La inclinación debe variar entre 1 para dos y 1 para 3. Los canalones se deben soportar adecuadamente en todas las posiciones. Son necesarios arreglos en las extremidades para evitar segregación.
Canalones de desnivel	Usados en la colocación del concreto en cimbras verticales de todos los tipos. Algunos canalones son una pieza de tubo producido en lona con goma flexible, mientras que otros son cilindros de metal articulados montados (trompa de elefante)	El canalón de desnivel lleva el concreto directamente para la cimbra y lo conduce hacia el fondo sin segregación. Su empleo evita el derrame de la lechada y del concreto sobre el acero de refuerzo a las laterales de la cimbra, el cual es dañino cuando se especifican superficies aparentes. También van a prevenir la segregación de las partículas del agregado grueso.	Deben ser suficientemente grandes, con aberturas abocinadas en las cuales se puede descargar el concreto sin derramarlo. La sección transversal del canalón de desnivel se debe escoger para permitir su inserción en la cimbra sin interferir en la armadura de acero.

**TABLA 8 MÉTODOS Y EQUIPOS PARA EL TRANSPORTE Y MANEJO DEL CONCRETO**

<b>EQUIPO</b>	<b>TIPO DE TRABAJO MÁS ADECUADO PARA EL EQUIPO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>PUNTOS A FLEJARSE</b>
Carretillas manuales y motorizadas	Para transporte corto y plano en todos los tipos de obra, especialmente donde la accesibilidad al área de trabajo es restringida.	Son muy versátiles y por lo tanto ideales en interiores y en obras donde las condiciones de colocación están cambiando constantemente.	Lentas y de trabajo intensivo.
Esparcidores (extendedores de tornillo)	Usados para esparcir concreto en áreas grandes, tales como en pavimentos y losas de puentes.	Con un esparcidor de tornillo. Una mezcla de concreto descargada de un balde o un camión se puede esparcir rápidamente sobre un área ancha con un espesor constante. El concreto esparcido tiene buena uniformidad de compactación antes de que se emplee la vibración para la compactación final.	Los esparcidores se usan normalmente como parte de tren de pavimentación. Se les debe de usar para esparcir el concreto antes que la vibración sea aplicada.
Esteras (bandas, cintas transportadoras)	Para transportar horizontalmente el concreto o a niveles más abajo o más arriba. Normalmente se posicionan entre los puntos de descarga principal y secundario.	Las esteras transportadoras tienen alcance ajustable, desviador viajero y velocidad variable, sea hacia delante o en reversa. Puede colocar rápidamente grandes volúmenes de concreto, aun cuando el acceso es limitado.	Son necesarios arreglos en las extremidades de descarga para prevenirse la segregación y para no dejar mortero en la estera de regreso. En climas adversos (calurosos y con viento) las esteras largas necesitan de cubiertas.
Esteras transportadoras montadas sobre camión mezclador	Para transportar el concreto a un nivel inferior, al mismo nivel o un nivel más alto.	Los equipos de transporte llegan con el concreto. Tiene alcance ajustable y velocidad variable.	Son necesarios arreglos en las extremidades de descarga para prevenirse la segregación y para no dejar mortero en la estera de regreso.
Grúas y balde	Es el equipo adecuado para el trabajo arriba del nivel de terreno.	Pueden manejar concreto, acero de refuerzo (armadura), cimbra, y artículos secos en puentes y edificios con estructura de concreto.	Tiene un solo gancho. Se hace necesario un planeamiento cuidadoso entre el comercio y la operación para mantener la grúa ocupada.
Mezcladoras de dosificación móviles	Usadas en la producción intermitente de concreto en la obra o donde se necesitan sólo pequeñas cantidades.	En un sistema combinado de transporte, dosificación y mezclado para la dosificación rápida y precisa del concreto especificado. Operado por un solo hombre.	Operación sin problemas que requiere una manutención preventiva del equipo. Los materiales deben ser idénticos aquellos originalmente empleados en el diseño de la mezcla.
Pistolas neumáticas (concreto lanzado)	Usadas donde se va a colocar el concreto en sitios difíciles y en secciones finas con áreas grandes.	Ideal para la colocación del concreto en formas libres de cimbres, en reparaciones de estructuras, en recubrimientos protectores, cubiertas delgadas y paredes de edificios con cimbres en una cara.	La calidad del trabajo depende de la destreza del operador del equipo. Sólo se debe emplear un lanzador de concreto con experiencia.
Tremie (tubo embudo)	Para la colocación del concreto bajo el agua.	Se le puede usar para verter concreto en la cimentación u otra estructura bajo el agua.	Se hacen necesarias precauciones para que se garantice que la extremidad de descarga de la tremie esté siempre enterrada en el concreto fresco, de modo que ya se preserve el sello entre el agua y la masa de concreto. Si diámetro debe ser de 250 a 300 mm (10 a 12 pulg.), a menos que haya presión disponible. Las mezclas de concreto necesitan más cemento, 390 kg/cm <sup>3</sup> (658 lb/yd <sup>3</sup> ) y un revenimiento más elevado de 150 a 230 mm (6 a 9 pulg.) porque el concreto debe fluir y consolidarse sin vibración.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ACI 211.4R-93  
**“Concreto de Alta Resistencia”**  
**Proporcionamiento de mezclas, ACI 211.4R**  
**Control de calidad y ensayos, ACI 363.2R**  
1998, American Concrete Institute  
2005, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
2. Steven H. Kosmatka, Beatrix Herkhoff, William C. Panarese y Jussara Tanesi  
**“Diseño y Control de Mezclas de Concreto”**  
Portland Cement Association  
Año, 2004.
3. ACI 318-89  
**“Reglamento de las Construcciones de Concreto Reforzado” (ACI 318-89)**  
**y Comentarios (ACI 318R-89)**  
1989, American Concrete Institute  
1991, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
4. ACI 363R-92  
**“State of the Art on Hig-Strength Concrete”**  
Año, Reapproved 1997
5. ACI 116R-00  
**“Terminología del Concreto y Cemento”**  
Año, 2002
6. Ortega González Arturo  
**“Evolución Tecnológica del Concreto y la Arquitectura Contemporánea”**  
IMCYC  
Año, 1999
7. F. R. Mcmillan y Lewis H. Tuthill  
**“Cartilla del Concreto”**  
IMCYC  
1987, American Concrete Institute  
2000, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.



8. Arthur H. Nilson y George Winter  
**“Diseño de Estructuras de Concreto”**  
12ª. Edición  
Edit. Mc Graw Hill  
Año, 1999.
9. ASTM  
**“Standard Specification for Chemical Admixtures For Concrete”**  
Designation: C 494/C 494M – 99
10. ASTM  
**“Standard Specification for Ready\_Mixed Concrete”**  
Designation: C 494/C 94M – 00
11. ASTM  
**“Método de Ensaye Estándar para determinar la Densidad en Masa (Peso Unitario) e Índice de Huecos en los Agregados”**  
Designación: C 29/C 29M – 97
12. A. M. Neville y J.J. Brooks  
**“Tecnología del Concreto”**  
Primera edición en español  
Editorial Trillas,  
Enero 1998.
13. A. M. Neville y J.J. Brooks  
**“Tecnología del Concreto”**  
IMCYC  
Año 1999.
14. J. Francis Young y Sidney Mindess  
**“Concrete”**  
By Prentice Hall Inc.  
Año, 1981
15. Concretos Cemex  
**“Guía del Usuario de Concreto Profesional”**  
CEMEX  
5ª. Edición  
Año, 2001
16. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-030-ONNCCE-2004**

17. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-073-ONNCCE-2004**
18. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-077-ONNCCE-2004**
19. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2004**
20. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2004**
21. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-109-ONNCCE-2004**
22. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-148-ONNCCE-2004**
23. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2004**
24. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-162-ONNCCE-2004**
25. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2004**
26. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-165-ONNCCE-2004**
27. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-170-ONNCCE-2004**

28. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-191-ONNCCE-2004**
29. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-303-ONNCCE-2004**
30. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-403-ONNCCE-2004**
31. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. **ONNCCE**  
**Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004**
32. **www.concrete.org (ACI)**
33. **www.cement.org (The Portland Cement Association)**
34. **www.nrmca.org (National Ready Mixed Concrete Association)**
35. **www.astm.org (American Society for Testing and Materials)**
36. **www.imcyc.com (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.)**
37. **www.cemexmexico.com (Cementos Mexicanos)**
38. **www.onncce.org.mx (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación)**
39. **www.ema.org.mx (Entidad Mexicana e Acreditación A.C.)**
40. **www.economia.gob.mx (Catálogo de Normas Mexicanas)**
41. **www.ica.com.mx (Ingenieros Civiles Asociados A.C.)**
42. **www.sika.com.mx (Sika Mexicana S.A. de C.V.)**
43. **www.quiminet.com.mx**
44. **www.basf-cc.com.mx**
45. **www.fester.com.mx**