



26
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO E J

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE INGENIERIA CIVIL
TOPOGRAFICA Y GEODESICA

*“Procedimiento Constructivo de Compactación
del Concreto por medio de Rodillos ”*

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A N :

CARLOS BORRAS CRUZ
ARTURO MEDINA GARCIA
JUAN RODRIGUEZ OSNAYA
JUAN CARLOS GARCIA RANGEL

MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-211-213-214-226/92

Señores:
BORRAS CRUZ CARLOS.
MEDINA GARCIA ARTURO.
RODRIGUEZ OSNAYA JUAN.
GARCIA RANGEL JUAN CARLOS.
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Miguel Morayta Martínez, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

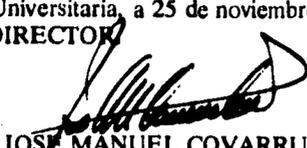
**"PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE COMPACTACION
DEL CONCRETO POR MEDIO DE RODILLOS"**

- I.- INTRODUCCION
- II.- EL CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION
- III.- PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DEL CONCRETO
- IV.- COMPACTACION DEL CONCRETO
- V.- CONCRETO RODILLADO
- VI.- CONCLUSIONES

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberán prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 25 de noviembre 1992.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

nc. JMCS/RCR*nlI

**PROCEDIMIENTO
CONSTRUCTIVO DE
COMPACTACION DEL
CONCRETO
POR MEDIO DE RODILLOS**

CON AMPLIO RECONOCIMIENTO A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO, A LA FACULTAD DE INGENIERIA, POR LOS VALIOSOS CONOCIMIENTOS TRANSMITIDOS EN LAS AULAS Y PRACTICAS DE CAMPO.

AL ING. MIGUEL MORAYTA MARTINEZ, NUESTRO AGRADECIMIENTO POR SU ESFUERZO CONTINUO, DEDICACION Y ORIENTACION.

A TODAS AQUELLAS PERSONAS, QUE NOS BRINDARON SU APOYO PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

AGRADECIMIENTO

A mis padres Vicente Medina H. y Ma. Cristina García B. por darme la vida y con su esfuerzo, aliento, apoyo, dedicación y privaciones personales me brindaron lo necesario para tener una profesión.

A mis hermanos, Jesús V., Gabriel, Dolores y Miguel Angel por darme el ejemplo del estudio.

A mis hijos, Pablo Esli y David Arturo por transmitirme sus alegrías, su amor sincero y puro, por que en cada momento me motivan con sus sonrisas para seguir esforzandome a cada instante de mi vida.

A mi esposa Edith, compañera de mi vida quien me ha dado su amor, sus palabras de aliento, su apoyo incondicional para seguir adelante, quien me ha dado el camino a seguir a la verdad "DIOS NUESTRO SEÑOR".

Al Sr. Rubén Gonzalez M. quien me ha dado su apoyo, consejos y sobre todo su ejemplo de superación.

A todos ustedes, que con sus cualidades y calidad humana he podido llegar a un objetivo más en mi vida personal, mi dedicatoria con mucho respeto y agradecimiento, Ing. Arturo Medina G.

DEDICATORIA

Mi agradecimiento al Ing. Miguel Morayta Martínez por su estímulo.

A mi hermana Sonia Borrás por su apoyo.

A todas aquellas personas que participaron para concluir este trabajo, les doy las gracias, Ing. Carlos Borrás Cruz.

AGRADECIMIENTOS :

A mis padres. Sr. Carlos y Ma. Nieves García, porque con su esfuerzo y dedicación pudieron darme esta carrera, lo cual es su mejor herencia.

A mis hermanos. Héctor Raúl, José Antonio, Sonia Margarita y Yolanda Esther, porque en todo momento he podido contar con ellos y recibir su apoyo.

A mi esposa. Sra. Patricia García, porque con sus palabras de aliento pude seguir hasta la finalización de este trabajo.

A mis hijos. Carlos Aarón, Myriam Betsabé, porque con su presencia me motivan para seguir esforzándome y ser cada día mejor.

A mis pastores. Rvdos. Eduardo y Michcell Huerta, porque con su ejemplo y sus consejos pude terminar esta labor.

A mi Señor Jesucristo. " El Rey de Reyes y Señor de Señores". Porque el me ha dado la fé y la fortaleza para ir librando todos los obstáculos y venciendo todos los retos que en esta vida se me presentan y superarme en todos los aspectos. Jn 15:5 (b) " Porque separados de mi nada podeis hacer ".

A todos ustedes mi reiterado agradecimiento, Ing. Juan Carlos García Rangel.

DEDICATORIA

A mis hijas Edith, Mónica y Arianna, a mi esposa Ma. Teresa que me han apoyado con paciencia así como a mis padres Rosa y Vicente, a mis hermanos Cándido, Irma, Vicente, Lucila y Mario que confiaron y apoyaron mis estudios, al Ing. Miguel Morayta Martínez por comprender nuestra situación y por impulsarnos para lograr nuestro objetivo, les dedico este trabajo como prueba de agradecimiento.

Para ustedes con todo respeto Ing. Juan Rodríguez Osnaya.

INDICE

I N D I C E

Página

CAPITULO I

INTRODUCCION.....1

CAPITULO II

EL CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION.

II.1 EL CEMENTO.....	5
II.1.1 Composición del cemento portland artificial.....	6
II.1.2 Tipos de cemento portland.....	7
II.1.3 Propiedades de los cementos portland.....	10
II.1.4 Fabricación del cemento.....	16
II.1.5 Hidratación del cemento.....	21
II.2 AGUA.....	23
II.3 ADITIVOS.....	24
II.3.1 Materiales pulverizados.....	46
II.4 CONCRETO.....	48
II.4.1 Proporciones de mezclas.....	48
II.4.2 Consecuencias prácticas.....	51
II.4.3 Cálculo por volumen absoluto.....	53

CAPITULO III

PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DEL CONCRETO.

III.1 DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO.....	59
III.1.1 Relación agua-cemento.....	59
III.1.2 Resistencia.....	60
III.1.3 Agregados.....	60
III.1.4 Contenido de agua.....	77
III.1.5 Contenido de cemento.....	77
III.2 PROPORCIONAMIENTO.....	79
III.2.1 Apartir de datos de campo.....	79
III.2.2 Por mezclas de prueba.....	81
III.2.3 Mediciones y cálculos.....	82
III.3 DOSIFICACION.....	84
III.4 MEZCLADO DEL CONCRETO.....	84
III.4.1 Mezclado estacionario.....	85
III.4.2 Concreto premezclado.....	86
III.4.3 Concreto mezclado en dosificadora móvil.....	86
III.4.4 Mezcladoras de alta energía.....	86

III.4.5 Remezclado del concreto.....	86
III.5 TRANSPORTE Y MANEJO DEL CONCRETO.....	87
III.5.1 Equipo para manejo y transporte del concreto..	88
III.6 CURADO DEL CONCRETO.....	91
III.6.1 Métodos y materiales del curado.....	91
III.7 COLOCACION DEL CONCRETO.....	98
III.7.1 Equipo de colocación.....	98

CAPITULO IV

COMPACTACION DEL CONCRETO.

IV.1 METODOS DE COMPACTACION.....	103
IV.2 COMPACTACION MEDIANTE VIBRADO.....	105
IV.3 COMPACTACION MEDIANTE RODILLOS.....	112
IV.3.1 Presas.....	112
IV.3.2 Pavimentos.....	115

CAPITULO V

CONCRETO RODILLADO.

V.1 COMPACTACION DEL CONCRETO POR MEDIO DE RODILLOS.....	121
V.2 DISEÑO DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.....	121
V.2.1 Presas.....	121
V.2.2 Pavimentos.....	133

CAPITULO VI

CONCLUSIONES.....	141
BIBLIOGRAFIA.....	145

CAPITULO I

INTRODUCCION

INTRODUCCION

El concreto compactado con rodillos (CCR) como procedimiento optativo para la construcción de concretos masivos, a llamado la atención por las ventajas que representa en costo y tiempo para su elaboración, sobre el concreto convencional. Sin embargo por no ser de uso común la técnica del CCR no es muy conocida a pesar de llevar varios años aplicándose en países como EUA, Canadá, Australia, etc.

En este trabajo expondremos los criterios que se han aplicado para la elaboración de mezclas y construcción de estructuras de concreto masivo con CCR, basándose en información recopilada de diversas instituciones y centros de investigación. Se comentarán en forma general los procedimientos seguidos en su elaboración para cumplir con nuestro objetivo que es el de mostrar la técnica del CCR.

Se exponen además aspectos relacionados con la elaboración del concreto convencional lo que permite apreciar los dos procedimientos sin necesidad de recurrir a otra fuente de información. De esta manera se describen desde los componentes básicos del concreto como son: el cemento, la grava y la arena, hasta la elaboración del concreto compactado con rodillos.

En el capítulo II se describe la elaboración y composición del cemento clasificándolo de acuerdo a sus características que los hace aplicables para determinadas condiciones de trabajo, del medio ambiente y tiempo de ejecución de la construcción. Cabe mencionar que la investigación científica del cemento, se ubica en los laboratorios de la industria de fabricación del cemento, así como en los laboratorios de institutos y universidades, ya que los mecanismos de las distintas reacciones químicas y físicas que se generan en el cemento con otros elementos, pueden ser controladas en algunas de sus variables, lo que hace que se diseñen aparatos especiales para entender mejor su comportamiento.

La tecnología moderna ha auxiliado en una mayor profundización del conocimiento del cemento y su comportamiento. El uso de computadoras en Estados Unidos, Inglaterra, Alemania, Francia y Japón, los hace países de vanguardia en la industria del cemento, lo que ha generado la construcción dinámica, moderna más actualizada en la tecnología del concreto, razón por la cual exige una capacitación constante al ingeniero constructor en el desempeño de su profesión y su responsabilidad ante la sociedad.

En este capítulo se exponen también las características y composición que debe tener el agua que se utilizará en la elaboración del concreto así como los aditivos que se emplean para darle al concreto determinadas cualidades.

En el capítulo III se analizan los procedimientos para la elaboración del concreto, describiendo el proporcionamiento de la mezcla, la relación agua-cemento, las características y tipos de agregados como son la arena y la grava, transporte, manejo, colocación y curado del concreto.

Es importante mencionar que los materiales a utilizar tanto para la producción del concreto compactado con rodillos como para el convencional deben cumplir con las normas y requisitos de proyecto, es necesario que en la selección de los bancos de grava y arena se consideren los volúmenes de explotación, la granulometría y la posible contaminación de estos por lo que podría afectar el tiempo de construcción de la obra. El agua a utilizar en el mezclado debe ser limpia, libre de impurezas y materia orgánica, el cemento para producir CCR será de bajo calor de hidratación. Dependiendo del tipo de obra a construir : autopistas, carreteras o presas, duración de la obra y volumen de concreto a producir, se seleccionará el tipo de plantas a utilizar.

El control de calidad de los agregados que van a formar parte de una mezcla homogénea tienen que cumplir ciertos requisitos que indican las normas de calidad, pues la durabilidad de la estructura que forma parte dependerá en gran medida de las características mecánicas de estos materiales.

Algunos ensayos que se efectúan a los agregados son : granulometrías, coeficiente de forma o coeficiente volumétrico, pesos volumétricos, absorción, densidad, materia orgánica, etc.

El cemento portland que se vaya a utilizar también tiene sus ensayos físicos, químicos y mecánicos, como : finura, consistencia, tiempo de fraguado inicial y final, resistencia a la compresión etc.

El agua de mezclado se estudiará para conocer su p.h., cloruros, sulfatos, dureza, etc. y en algunos casos se estudiarán las propiedades de los aditivos que se vayan a emplear.

Una vez estudiados los ensayos de todos los ingredientes, se obtendrá una dosificación óptima con el fin de producir una mezcla homogénea y consistente.

Después de la colocación de la mezcla en el sitio es necesario consolidarlo mediante la compactación por lo que en el capítulo IV se describen las formas para lograrlo, a manera de introducción diremos que la compactación del concreto es el procedimiento mediante el cual se elimina casi en su totalidad el aire atrapado en el concreto recién colocado en la cimbra.

Existen varios métodos de compactación y para seleccionar el más adecuado es necesario tomar en cuenta la trabajabilidad de la mezcla, el grado deseado de desaireación y la importancia del acabado.

Como se dijo anteriormente, en este trabajo se describen algunas técnicas usuales, así como el equipo necesario para efectuar la compactación del concreto.

En el capítulo V se expone la técnica de compactar el concreto mediante rodillos, es un procedimiento relativamente nuevo, su aparición y estudios sobre su aplicación responde a la necesidad de abatir costos y tiempos en la construcción de concretos masivos como los empleados en las cortinas de presas y pavimentos, en estas obras el problema principal es la colocación de grandes volúmenes de concreto que satisfagan los requisitos de seguridad y servicio de diseño. Es importante mencionar que esta técnica se aplica a concretos en los que el acero de refuerzo es mínimo o nulo, debido a que para la colocación y compactación del concreto se emplea maquinaria pesada que hace imposible mantener el refuerzo en una posición fija; los problemas de agrietamiento producidos por los esfuerzos de tensión debido a la hidratación del cemento se minimizan al usar proporciones de agua - cemento muy bajas, esto hace que se requiera de personal especializado en la elaboración de la mezcla ya que en circunstancias especiales del medio ambiente o materiales suministrados, es necesario modificar el proporcionamiento empleado de una batchada a otra.

Paralelamente al desarrollo de la tecnología de diseño y construcción se preparan procedimientos específicos para el control de calidad del concreto, pues es necesario que la obra se construya conforme a lo proyectado.

En países como Australia, Canadá, Estados Unidos, España y otros, se ha aplicado con éxito la tecnología del concreto compactado con rodillos. En México podemos citar obras como la presa La Manzanilla en Guanajuato, la presa Trigomil en Guadalajara, y un tramo de pavimento de la autopista México-Cuernavaca.

CAPITULO II

EL CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION

Antes de hablar del concreto, nos referiremos al elemento básico del mismo que es el cemento.

II.1 EL CEMENTO.

Se designa como cemento a todas las sustancias con propiedades aglutinantes o cementantes. El empleo de materiales cementantes data de más de 5 mil años, con el empleo de tierras arcillosas como material de construcción en el Valle de Egipto y Mesopotamia, para hacer casas estables.

La mayor preocupación en la construcción fue hacer un mortero estable a la acción del agua. Los romanos usaron mortero compuesto por cal y arena, al que después le adicionaron la cal, puzolana (material de origen volcánico procedente de Pozzuoli, pueblo en las faldas del Vesubio de la provincia de Nápoles, puerto en el mar Tirreno).

Se da el nombre de Puzolana a todo material natural o artificial amorfo de silicatos aluminicos alcalinos hidratados que no poseen un valor cementante, pero que finamente pulverizado a temperatura ordinaria y en un medio húmedo reacciona con el hidroxido de calcio y alcalis, formando compuestos con propiedades cementantes. Los romanos los emplearon en la construcción de acueductos, la Via Apia, El Coliseo, etc. Después de la caída de Roma que marca el inicio de la edad media y gran parte de la edad moderna, no se hicieron estudios sobre el cemento y el poco uso del mismo bajo su calidad. Fue en Inglaterra con John Smeaton en 1750 cuando se empezó a ensayar con calizas arcillosas que molidas eran calcinadas entre temperaturas de 900° C a 1200 ° C. Obtuvo una cal hidráulica descubriendo que se obtenía un mejor cementante al mezclar puzolana, caliza con un gran contenido de arcilla; en 1756 empleó esta mezcla para la reconstrucción del faro de Eddystone.

En 1796 el inglés James Parker patentó su Cemento Romano, llamado después cemento natural, producto de la calcinación de arcilla en Hornos de Cal que a los 1350° C empieza la clinkerización del material, que es normal, y a los 1480° C, punto de fusión se forma el clinker.

En 1818 el francés Vicat estableció las normas de fraguado, endurecimiento, resistencia a la compresión y tracción, índice de hidraulicidad y propiedades químicas.

En 1824 el albañil inglés Joseph Aspdin, fabricó por primera vez el cemento. El procedimiento seguido por éste fue la trituración y calcinación de piedras calcáreas y arcillas hasta la formación del clinker y por el parecido al color de las piedras de las canteras de Dorset en la isla de Portland, lo llamó cemento Portland.

Es hasta 1845, cuando Isaac Johnson usando un método de molienda que pulverizaba los pequeños trozos de clinker que el proceso anterior dejaba íntegros, obtuvo el cemento.

II.1.1 Composición del cemento portland artificial.

El cemento Portland artificial, es el producto obtenido por molienda fina del clinker obtenido por una calcinación hasta la temperatura de fusión incipiente de una mezcla íntima, rigurosa y homogénea de materiales arcillosos y calcáreos sin adición de otro material. Lo único que se puede agregar al polvo clinker es una pequeña cantidad de yeso al 3% para retardar el tiempo de fraguado, que de lo contrario fraguaría rápidamente, dejando de ser práctico.

Los principales componentes del cemento Portland artificial son: Caliza, sílice, alumina y pequeñas cantidades de óxido de hierro, magnesia, trióxido de sulfuro, alcalis y bióxido de carbono.

Los cementos de buena calidad tienen como composición porcentual media de sus constituyentes el siguiente promedio:

Componente	Promedio
Cal (CaO)	63.5%
Sílice (SiO ₂)	20.5%
Alumina (Al ₂ O ₃)	5.5%
Oxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	3.0%
Magnesia (MgO)	2.5%
Trióxido de Sulfuro (SO ₃)	1.75%
Alcalis (K ₂ O + Na ₂ O)	0.65%
Agua y bióxido de carbono (H ₂ O + CO ₂)	2.00%

De las investigaciones de Le Chatelier, Newberry, Rankin, Wright, Rott, Bogue, se ha llegado a la conclusión que el cemento Portland está compuesto por cuatro ingredientes principales: cal, sílice, alumina y óxido de hierro que se combinan para formar;

Nombre	Composición Oxido	Abreviatura
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico 2 o C0	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferro Aluminato Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Los avances en las técnicas de análisis químicos con la ayuda de aparatos electrónicos nos proporciona un conocimiento mejor del comportamiento de los alcalis, procesos de fundición o cristalización, composición real del clinker.

La variación de los compuestos hacen que se obtengan distintos tipos de cementos.

II.1.2 Tipos de cementos portland.

Los cementos Portland se fabrican en 5 clases o tipos del I al V, cemento Portland de escoria de altos hornos y cemento Portland Puzolana.

- a) *Tipo I.* Es un cemento Portland de uso general, empleado en cualquier construcción en las que no se requieren propiedades especiales de otro tipo de cemento. Se usa en estructuras, pavimentos, bloques, tubos, etc.
- b) *Tipo II.* Es un cemento modificado y es adecuado en construcciones en donde el concreto está expuesto a la acción moderada de sulfatos en obras hidráulicas, por su acción retardante que genera calor con mayor lentitud y demora al fraguado.
- c) *Tipo III.* Rápida resistencia alta. Es un cemento con un poco más de carbonato de calcio; su característica principal es la de alcanzar, a los 5 o 6 días, resistencias superiores a las que adquiere el cemento tipo I. Aunque su resistencia final es igual, el endurecimiento se hace más rápido, con mayor desprendimiento de calor. Su ventaja reside en la rapidez para ejecución de obra, su empleo permite el descimbramiento a los 5 días, lo que hace usarlos un mayor número de veces. Otra forma de cumplir con el requisito de rápida resistencia alta, es agregar un saco extra de cemento tipo I o II por cada 3/4 de metro cúbico de concreto mezclado a gran velocidad en caso de ser difícil obtener el tipo III.

- d) *Tipo IV.* De bajo calor de hidratación; empleado en las construcciones de grandes espesores, tales como las presas para evitar los agrietamientos, es decir que se disipa una proporción mayor de calor con un bajo cambio de temperatura y da como un menor desarrollo de resistencia en el cemento, pero la resistencia última no se afecta.
- e) *Tipo V.* De alta resistencia a los sulfatos. Es un cemento con bajo contenido de aluminato tricálcico. Ser resistente a los sulfatos significa que tiene un alto contenido de silicatos que le proporcionan una alta resistencia, pero dicha resistencia es baja a edad temprana. También es de bajo calor de hidratación. Usado en obras marinas, su desventaja es su costo.

Se fabrican otras clases diferentes de cementos para diversos fines.

- f) *Cemento Portland de escorias de altos hornos.* Este tipo de cemento se elabora moliendo escoria granulada de altos hornos con el clinker de cemento. La escoria de alto horno, es una mezcla de cal, sílice y alumina en proporciones diferentes a los que el cemento portland. La escoria es baja en cal, esta debe enfriarse hasta que se solidifique como vidrio para evitar la cristalización, la adición de yeso controla el fraguado. El enfriamiento rápido por agua causa una fragmentación granular a la escoria.

La escoria es materia prima para el cemento Portland, es un cemento más pobre en cal, que los otros cementos Portland, por ello es más resistente a las aguas agresivas. Despide menos calor al hidratarse, sufre menos contracciones, lo que lo hace muy apto para gruesos volúmenes de obra por ejemplo, construcciones marinas.

Su desventaja es que desprende muy poco calor durante su hidratación, es muy sensible a las bajas temperaturas, retardando su fraguado y disminuyendo su resistencia, esta es menor a los 28 días que la de los cementos Portland normales, por lo que reviste importancia un curado adecuado.

- g) *Cementos Puzolánicos.* Este tipo de cemento es una mezcla combinada de cemento Portland con puzolanas. Puzolana es un material natural o artificial. Generalmente son materiales silico-aluminoso que no tienen propiedades cementantes, pero que por su finura y pulverización y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de cal, para formar compuestos que sí tienen propiedades cementantes.

Las puzolanas naturales son en su mayor parte de origen volcánico. Son tobas procedentes de la acumulación de polvos, cenizas barros cruptivos que han adquirido características de una roca deleznable. El vapor de agua, el bióxido de carbono y el brusco enfriamiento al ser arrojadas al exterior, les da propiedades puzolánicas. Es un material de silicatos aluminicos alcalinos hidratados que por si solo tiene poco valor cementante. La puzolana debe estar finamente dividida a fin de que el silice se combine con la cal, liberada por la hidratación del cemento Portland en presencia de agua para formar silicatos de calcio estables con propiedades cementantes.

Las tierras de infusorios cuya constitución se debe a los esqueletos silíceos de las diatomáceas, depositadas tanto en el fondo de las aguas dulces como de los de mar, o bien de lugares que por acciones geológicas hoy son tierras firmes. En muchos casos, los yacimientos o depósitos se hallan mezclados con arena

En su estado natural, la mayor parte de las tierras de infusorios tienen poco valor como puzolanas, aunque se combinan muy activamente con la cal, su estado fisico posee forma porosa y angular por lo que se necesita una gran cantidad de agua para que resulten plásticas las argamasas que se obtienen al amasarlas con cal o cemento, por lo cual, su valor cementante resulta escaso. Sin embargo mediante un tratamiento de calcinación a temperaturas que varían de 550°C a 1100°C se logra un producto de propiedades puzolánicas y de empleos diversos como sustancia para impermeabilizar morteros y hormigones dándoles mayor plasticidad a las mezclas a costa de menos agua y de mayor resistencia.

Las puzolanas artificiales son productos resultantes de la calcinación y pulverización de arcillas y pizarras. Las propiedades puzolánicas ya eran conocidas por los griegos, romanos e hindúes, quienes usaban ladrillos y tejas pulverizadas de arcilla cocida como sustitutos de las puzolanas volcánicas naturales para la formación de morteros hidráulicos.

La preparación de las puzolanas artificiales se reduce a la calcinación de las arcillas y pizarras de 550°C a 1100°C, dependiendo del contenido de calizas y a una pulverización análoga a la del cemento Portland.

Los cementos puzolánicos se preparan moliendo juntos, mezclas de clinker de cemento Portland con una puzolana. Estos cementos tienen gran estabilidad química y resistencias mecánicas comparadas con el cemento Portland normal, también tienen resistencias a la acción del agua de

mar y se debe a que la puzolana se combina con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) puesto en libertad durante el fraguado del cemento para formar un aglomerado bien definido de manera que cuanto menos es la cantidad de hidróxido de calcio muy poco contribuye a la resistencia de los cementos fraguados, por lo que adquieren resistencia con mucha lentitud y necesitan un periodo mayor de curado y a los cinco meses alcanzan la misma resistencia del cemento Portland normal.

Las puzolanas son a menudo más baratas que el cemento Portland que reemplaza. su ventaja principal es la hidratación lenta y por lo tanto bajo calor de hidratación, lo que reviste importancia en construcciones de concreto masivo, considerando que cualquier tipo de cemento se tiene que ajustar a normas como la ASTM para los diversos fines a que se destine el cemento.

11.1.3 Propiedades de los cementos portland.

A continuación indicaremos algunas de las propiedades de los cementos Portland:

Cemento portland de fraguado rápido.

El cemento tipo III, desarrolla alta resistencia más rápidamente. Es un cemento de alta resistencia a edad temprana, la diferencia entre el cemento normal, es la resistencia, aunque tengan tiempo de fraguado muy parecido. El endurecimiento puede ser igual al cemento Portland normal. La rapidez en el fraguado se consigue disminuyendo la adición de yeso o bien agregando sales aceleradoras, como el cloruro de calcio y el cloruro sódico, ya que sirven además para proteger al concreto de la acción de las heladas. Adicionando al 1% de cloruro de calcio retardan el fraguado y si se agrega más del 3% se acelera. Existen en el mercado diversos preparados que sirven para acelerar el fraguado, en general son soluciones acuosas de diferentes sales. Carbonatos alcalinos, aluminatos y silicatos o mezclas diversas cloruras.

Cemento portland de endurecimiento rápido.

Es el resultado de la calcinación fina de una mezcla de cemento Portland con un 15% de carbonato de calcio. La característica principal es la de alcanzar a los 5 o 6 días, resistencias superiores a la que adquiere el cemento Portland

normal. Su endurecimiento se hace mucho más rápido, con mayor desprendimiento de calor, debido a que contiene mayor proporción de silicato tricálcico, su ventaja, reside en la rapidez para la ejecución de obra, ya que se puede decimbrar en 4 días.

Fraguado en el cemento portland normal.

El cemento al amasarse con el agua, forma una masa o pasta suave y plástica que posteriormente se consolida. Debido a las reacciones químicas que se verifican entre los componentes del cemento y el agua, las reacciones dan origen a dos periodos denominados de fraguado y endurecimiento, ver fig. II.1; el primero termina en pocas horas y el segundo es indefinido. Aunque en la práctica se estime en 28 días, ver fig. II.2 pasado este tiempo, el incremento de la resistencia que adquiere la pasta es muy lenta.

El tiempo de fraguado se establece entre el amasado y el instante en que la masa adquiere suficiente consistencia para resistir una determinada presión. Dentro del tiempo de fraguado se consideran dos etapas. La primera de fraguado inicial y la segunda de fraguado final, elegidos arbitrariamente.

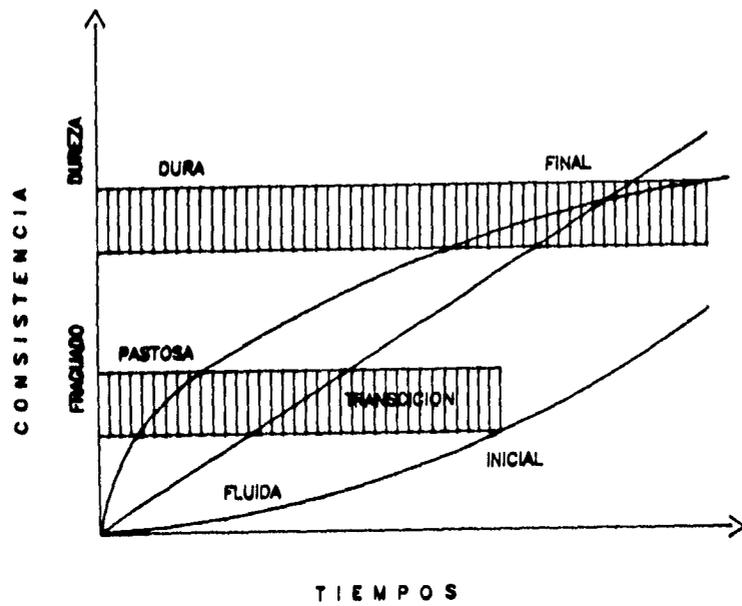


Figura II.1 Gráfica que muestra las diferentes consistencias de la pasta en relación al tiempo transcurrido desde el momento en que se agrega agua al cemento.

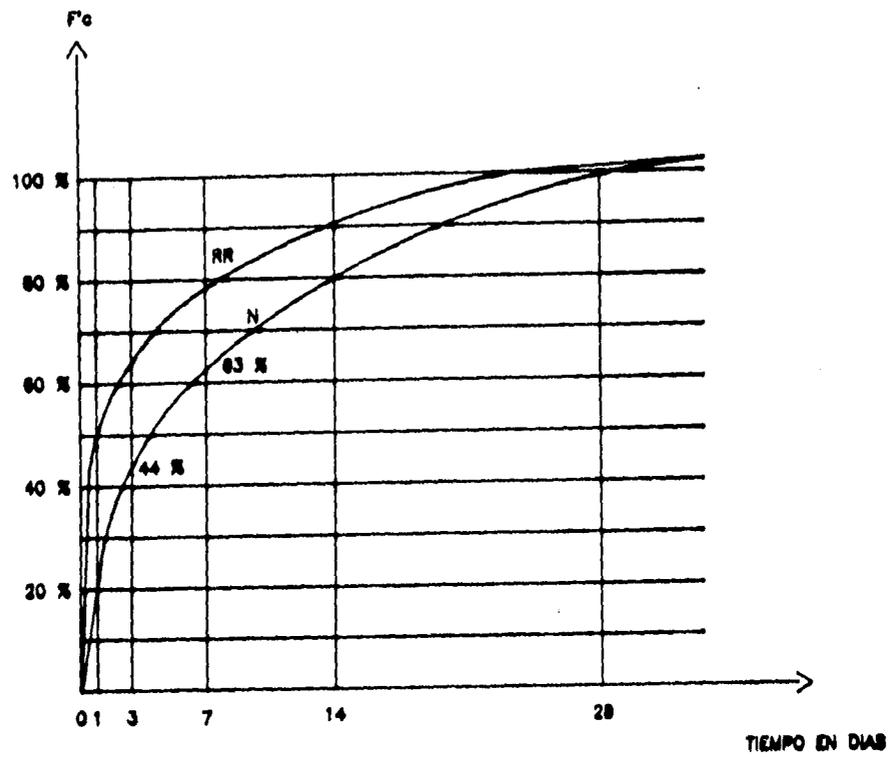


Figura II.2 Gráfica de diversos grados de endurecimiento de concreto a diferentes edades, en condiciones medias de temperatura y agregados comunes.

Fraguado inicial Se mide por el lapso entre el amasado y una pérdida parcial de la plasticidad de la pasta mediante la aplicación del aparato de Vicat (fig. II.3) con sus agujas de penetración, la que se utiliza, es de un diámetro de 1.13 ± 0.05 mm. Con la muestra en molde, la aguja penetra alrededor de 5 ± 1 mm. Se establece que se ha producido el fraguado inicial. Este se indica por el tiempo transcurrido desde el momento que se agrega el agua al cemento hasta la pérdida parcial de la plasticidad. El tiempo mínimo es de 45 minutos según el tipo de cemento que se emplee. El tiempo de fraguado puede ser mínimo de 60 minutos hasta de 6 horas.

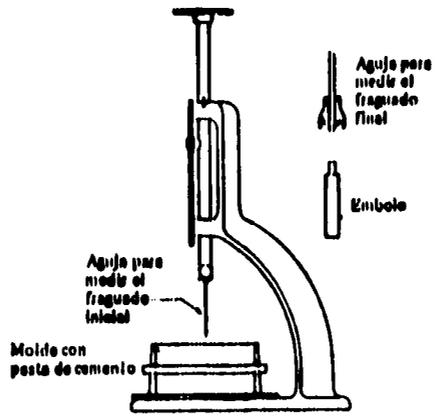
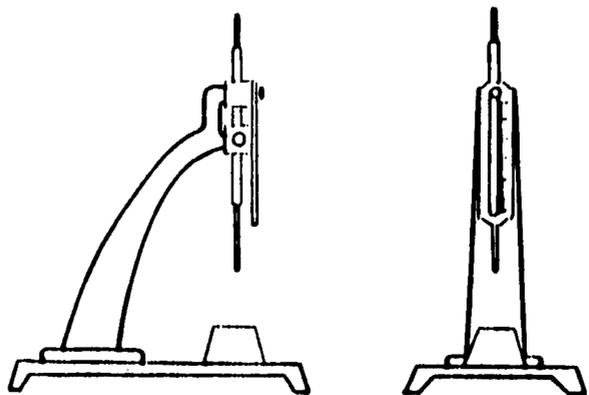


Figura 11.3 Agujas de Vicat para determinar tiempos de fraguado.

Fraguado final Su tiempo se determina desde el momento en que se agrega agua al cemento hasta que la masa resista una determinada presión estimada aproximadamente de 10 horas. A la aguja de Vicat se le adapta un aditamento metálico ahuecado, de forma que deje un borde circular de 5 mm de diámetro, colocado 5 mm atrás de la punta de la aguja, se establece el fraguado final cuando la aguja penetra lentamente a la muestra, pero no así el aditamento ahuecado.

Aunque el fraguado y el endurecimiento son procesos difíciles de precisar, parece que el fraguado es provocado por la violenta hidratación del aluminato tricálcico pero debido a la adición del yeso retrasa la formación del hidrato de aluminio de calcio, lo que forma agujas cristalinas de sulfo-aluminato de calcio, cuya acción es retardar la cristalización de los aluminatos. El fraguado inicial todavía débil se debe a los aluminatos cuya acción se presenta en las primeras 24 horas, el yeso permite que la reacción sea lenta con el agua del silicato tricálcico por ser estable forma productos gelatinosos como el hidrato cálcico y el sílice, los que protegen a los granos de cemento que no han sido atacados, por lo cual la hidratación se hace más lenta, aumentando la consolidación, impermeabilidad y dureza de la pasta, las reacciones exotérmicas con el fraguado inicial corresponden a un rápido aumento de temperatura, en el fraguado final la temperatura máxima, lo que provoca también un aumento en la resistencia eléctrica, motivo por el cual se trata de medir el fraguado por medios eléctricos.

Fraguado Falso Así se llama a la rigidez prematura y anormal del cemento que se presenta dentro de los primeros minutos después de haberse mezclado con el agua. El desprendimiento de calor no es muy apreciable y para evitarlo se vuelve a mezclar la pasta sin añadirle agua, con lo que se restablece su plasticidad y fragua normalmente sin pérdida de resistencia.

Otra causa del fraguado falso se debe a los alcalis que al carbonatarse reaccionan con el hidróxido de calcio dejando libre por hidrólisis del silicato tricálcico para formar el carbonato de calcio que induce a una rigidización de la pasta. También puede ser que la humedad ambiental active al silicato tricálcico por hidratación mayor que provoca el fraguado en falso.

II.1.4 Fabricación del cemento.

Sin pretender detallar los pasos de la fabricación del cemento, éste se puede obtener por dos procedimientos que son: Proceso de vía seca y Proceso de vía húmeda. Tal como se indica en las figuras II.4 y II.5, la elección de la vía depende de las

diversas materias primas, como de su humedad. Si a la arcilla se le adiciona agua, el proceso es de vía húmeda, si no se le adiciona agua a la arcilla, el proceso es de vía seca.

En el proceso de vía seca para materias primas duras, exige instalaciones de secado, con mayor costo para dosificación, aunque con menor consumo de combustible.

Se tiene un proceso mixto que es el semiseco, aunque realmente los procedimientos son dependientes del combustible que se esté usando; petróleo, gas, carbón o electricidad. Si es que el país cuenta con esos recursos naturales o un sistema hidrológico aprovechable.

Cualesquiera que sea el proceso industrial elegido, la mezcla dosificada se lleva a los hornos giratorios. Son cilindros de acero de gran tamaño, recubierto de un material refractario, con diámetro interior hasta de 7.5 m y longitudes de hasta 230 m, los cuales giran lentamente alrededor de su eje con una inclinación del 4% con respecto a la horizontal.

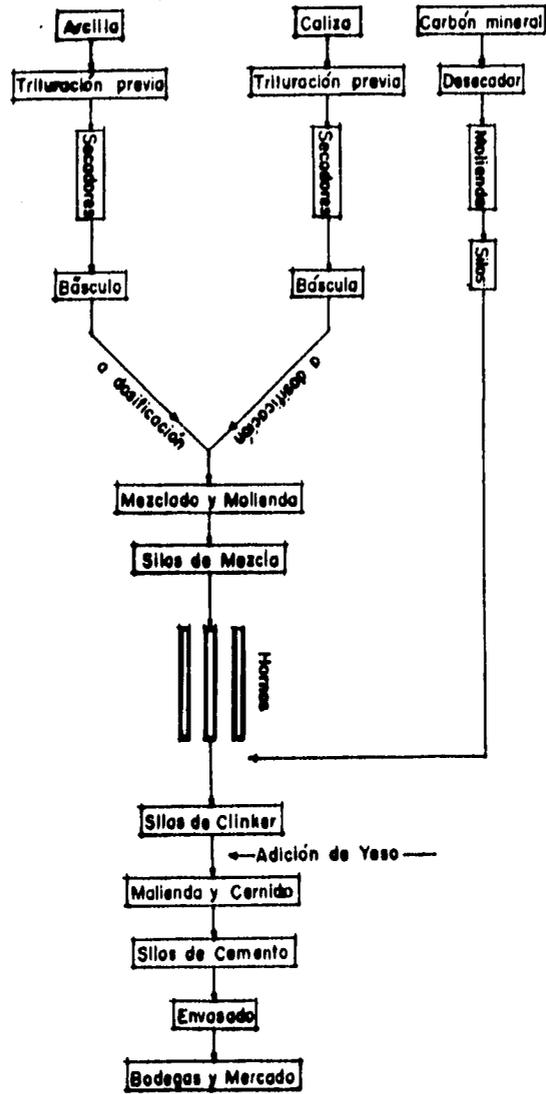


Figura II.4 Esquema del proceso de vía seca

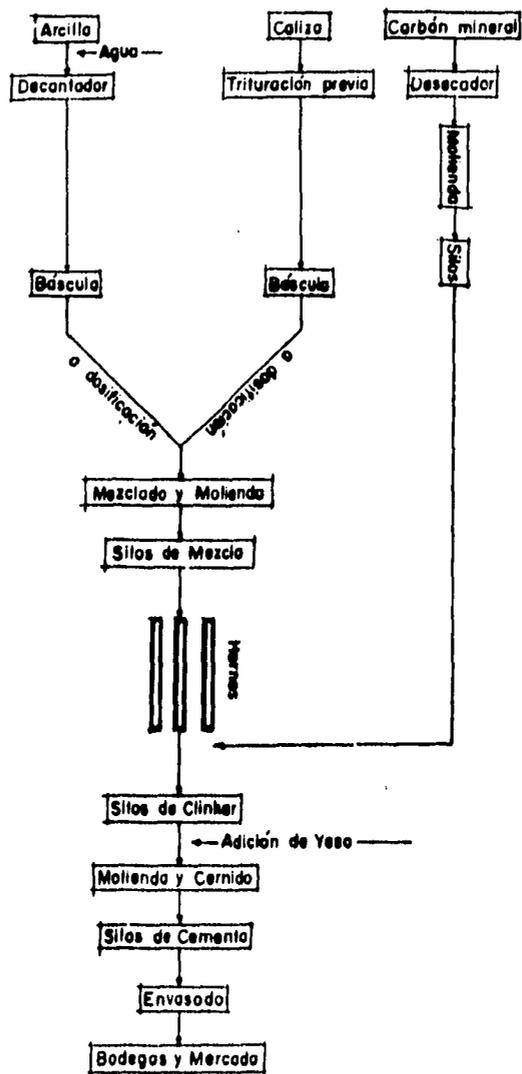


Figura II.5 Esquema del proceso de vía húmeda.

Tolva para introducir el material crudo. El extremo superior del cilindro, que está en comunicación con el tiro de la chimenea, sirve para dar entrada al polvo o pasta que previamente pasa por un regulador automático.

Tobera para carbón pulverizado, localizada en la parte inferior del cilindro, inyecta a presión dicho carbón, la materia prima se desliza de una manera regular y continua con trayectoria helicoidal, desde la parte más fría hasta la zona de máxima temperatura que oscila de 1400°C a 1500°C.

Debajo del horno giratorio hay un enfriador cilíndrico de 2.5 m de diámetro y longitud de 25 m con movimiento giratorio y pendiente contraria al del horno, que recibe el clinker incandescente, lo agita y lo pone en contacto con la temperatura ambiente, dicho aire se usa para combustión de carbón pulverizado.

Indicaremos los otros dispositivos sin indicar la función que desempeñan, los cuales son:

Recipiente de combustible, extractor de combustible, ventilador de cámaras de recolección de polvos arrastrados por gas caliente hacia la chimenea, chimenea, registro regulador del tiro, comunicadores de horno a enfriador, dispositivos rotatorios del horno, etc.

Enumeraremos tan solo las reacciones que se llevan a cabo en el proceso de obtención del clinker y son:

- a) Evaporación del agua de la mezcla
- b) Eliminación del agua combinada de la arcilla
- c) Disociación del carbonato de magnesio
- d) Disociación del carbonato de calcio
- e) Combinación de la cal y la arcilla
- f) Serie de procesos químicos a diferentes temperaturas desde los 800 hasta los 1480°C.

El enfriamiento del clinker en los silos permite también la extinción de la cal libre, el clinker molido tiende a fraguar, para ello se le adiciona el 3% del yeso y se hace en la molienda final del clinker que se efectúa en molinos de bolas de acero con diversos compartimientos con separadores de aire, con circuito cerrado hasta obtener 1.1×10^{12} partículas por kilogramo, y las máquinas envasadoras lo distribuyen en sacos de papel de doble forro de 50Kg. En México se vende en sacos de 50 Kg pero hay otros países que lo envasan en diferentes pesos.

11.1.5 Hidratación del cemento.

Así se llama a la serie de reacciones químicas que se generan cuando el agua se pone en contacto con el cemento. Los principales componentes del cemento como son los silicatos y aluminatos, son los que forman el producto de hidratación y con el tiempo se forma una masa firme y dura llamada pasta de cemento. Siendo los silicatos de calcio los cementantes del cemento de baja solubilidad en agua por la estabilidad que posee la pasta en contacto con el agua. De cualquier forma que se establezca la precipitación resultante de la hidratación, la rapidez de hidratación disminuye continuamente, y en las pruebas a los 28 días, se determinan granos de cemento que aún no habían reaccionado con el agua. Se supone que la hidratación avanza por la reducción gradual del tamaño de la partícula de cemento. Se han encontrado granos gruesos de cemento con silicato tricálcico y granos pequeños de cemento con silicato dicálcico. Se hidratan antes que los granos mayores, lo que indica que hay en las primeras 24 horas una hidratación selectiva. No establecemos los procesos de diferentes reacciones químicas de hidratación del cemento y sólo mencionaremos los métodos empleados como la termogravimetría y la exploración continua por difracción de rayos X. Para determinar la cantidad de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la pasta. El calor cedido por la hidratación, la densidad específica de la pasta, la cantidad de agua químicamente combinada, cantidad de cemento deshidratado; y en forma indirecta, la resistencia de la pasta hidratada, también las pequeñas impurezas tienen efecto determinante en las propiedades de los hidratos de silicato de calcio así como la temperatura.

El tipo de reacción de hidratación fue observada por Le Chatelier en 1881 indicando que los silicatos anhidros probablemente pasan primero a una solución y después reaccionan para formar silicatos hidratados que son menos solubles y se separan de la solución sobresaturada confirmado por los rastreadores de calcio 45.

En igual forma los mecanismos de hidratación de aluminato de calcio están también en proceso de investigación sin tener una ecuación química balanceada.

El agua empleada para la mezcla debe ser potable, sólo en el caso de pruebas de laboratorio los cubos deben tener una resistencia a los 7 y 28 días igual a, por lo menos el 90% cuando se emplea agua no completamente potable en base a las normas ASTM.

Calor generado por la hidratación del cemento.

Es la cantidad de calor en calorías por gramo del cemento deshidratado, dispersado por una hidratación completa a una temperatura dada. El calor generado es hasta 120 cal/gr.

Equivalencias

1 B.T.U = 252 cal
1 cal = 4.186 Joules
1 J = 0.239 cal.

Es calor en una forma de energía interna. No es energía mecánica, la temperatura es una propiedad física.

El equilibrio termodinámico entre dos sistemas, significa que tienen la misma temperatura. Distinguiremos entonces, estados de equilibrio termodinámico por medio de la temperatura. El método usado para medir el calor de hidratación consiste en determinar el calor de solución de cemento no hidratado con el calor de solución del cemento hidratado que se genera en una mezcla de Acido Nítrico y Acido Fluorhídrico. En base a normas de la ASTM, se supone que es el mismo tipo de cemento ya que cualquier variación en porcentaje de los elementos constitutivos del cemento dan resultados diferentes. La temperatura en la cual se produce la hidratación, afecta mucho a la velocidad de desarrollo de calor.

Rigurosamente el calor de hidratación es la combinación del calor generado por la reacción química de hidratación propia y el calor de absorción del agua sobre la superficie del gel. La absorción es la unión de una sustancia sólida por fuerzas moleculares superficiales, la fuerza de absorción disminuye el calentamiento, siendo el gel un colide de silicato, posee gran poder de absorción. Este calor de absorción causa aproximadamente la cuarta parte del calor total de hidratación.

La velocidad de desarrollo del calor, puede medirse fácilmente en un calorímetro adiabático, es decir que las paredes del calorímetro, permiten que haya interacción térmica del interior al exterior, a lo que se le llama pared adiabática según muestra el Dr. A. M. Neville en donde se representan curvas típicas tiempo-temperatura obtenidas en condiciones adiabáticas.

Con los cementos usuales Portland, Bogue observó que alrededor de una mitad del calor total de hidratación se libera entre el 1er y 3er día y de 3/4 partes a los 2 días y a los 6 meses la liberación es del 83 al 91%.

Se ha observado que también el calor de hidratación puede calcularse como la suma de los calores de hidratación de los 4 componentes básicos del cemento con bastante exactitud y gráficas de la acción rápida Hidratación del C_3H y CS .

Hasta aquí hemos analizado el cementante principal del concreto. A continuación enunciamos los otros elementos que forman parte del concreto como son el agua, los agregados gruesos y finos que son los que se reparten por toda la pasta de cemento,

llamados también pétreos o inertes, aunque actualmente se sabe que no son realmente inertes y los aditivos.

II.2 AGUA

Las 3/4 partes de la superficie terrestre están cubiertas por el agua; en el aire hay grandes cantidades de agua en forma de vapor. Hay agua también en muchas rocas y minerales que se hallan combinadas químicamente con otros componentes. El agua más pura que se encuentra en la naturaleza es la de la lluvia. El sabor insípido se debe a la ausencia de impurezas y ciertos gases.

Agua potable

Es la que debe estar libre de toda clase de gérmenes patógenos y baja en sales minerales. El agua que se emplea en la pasta de cemento es la que básicamente debe ser agua potable, pero en caso de tener otro tipo de agua, puede no actuar favorablemente con algunos tipos de cemento o con los aditivos.

En general el agua debe estar limpia y exenta de limo, sales, yeso, alcalis, materias orgánicas, sulfatos, ácidos, cloruros, etc. El agua destilada contiene una débil proporción de cal y sales disueltas que no conviene al cemento ya que el agua destilada disuelve la cal, lo que provoca la destrucción del concreto. No se deben usar las siguientes aguas:

- Aguas destiladas o puras
- Aguas estancadas
- Aguas procedentes de pozos contaminados por impurezas orgánicas.
- Aguas fangosas con limo en suspensión
- Aguas residuales procedentes de industrias con contenido de ácidos. Este último tipo de agua, si se emplea, destruye el concreto por su alto contenido de sulfatos.

Se aceptan si tienen el 1% de sulfato SO pero reducen la resistencia del concreto en un 10%.

Las aguas con contenido de sal (NaCl) en una proporción del 5% reducen la resistencia del concreto en un 30%.

Las aguas carbonatadas con pequeñas cantidades de sulfatos y cloruros provocan una pérdida de resistencia hasta del 80%.

En lo que se refiere al agua de mar no se han unificado los criterios de los especialistas en concreto armado. El problema que presenta el agua de mar, es que ejerce al mismo tiempo ataques de destrucción y protección. La composición química del agua de mar, varía de un lugar a otro. Anstett da como tipo medio la siguiente composición:

Cloruro de sodio	30	grs.	por	litro
Sulfato Magnésico	5	"	"	"
Cloruro Magnésico	6	"	"	"
Sulfato Cálcico	1.5	"	"	"
Bicarbonato Potásico	0.2	"	"	"

La acción destructiva del agua de mar se realiza por la cristalización y disolución sucesiva de las sales que contiene el agua y que va paralelamente a la disolución de algunos del cemento que en forma elemental son:

El CaO (cal) del cemento, disuelto y difundido en la superficie se combina con el H₂SO₄ (Acido Sulfúrico) del sulfato magnésico del agua, precipitando la magnesia que forma en combinación con otra sustancia, una costra superficial que se destruye y vuelve aparecer con cierta periodicidad.

Aparte del ataque químico de la cal difundida, también se presenta el ataque físico, ya que aumenta la porosidad del concreto, y el ataque de las sales marinas por los poros hacia las armaduras o acero de refuerzo. La acción del agua de mar es una fuerte oxidación del hierro que en poco tiempo inutiliza la estructura. Las pruebas de cilindros seguirán las normas del ASTM C-10.

11.3 ADITIVOS

Ya hemos mencionado los elementos del concreto, agregados y agua, ahora hablaremos de los aditivos.

Según la A.S.T.M. y el A.C.I. es una sustancia química distinta de los agregados, del cemento y del agua, que interviene en forma diferente en la manufactura del concreto y sirven para modificar sus propiedades y cualidades particulares.

En lugar de emplear un cemento especial, se usa un aditivo adecuado, lo cual es más económico, pero no se piense que es un polvo mágico con el que se obtienen todas las cualidades del concreto ideal.

De las características principales que debe tener un buen concreto, unas son necesarias al fabricarlo y colocarlo en los moldes, otros, son propios del concreto endurecido.

Los aditivos se clasifican de acuerdo al fin con que se van a usar en el concreto, pueden ser químicos y minerales de acuerdo a las normas ACI-212.2R

Aparte de conocer las propiedades de un aditivo hay que tener la experiencia en el proceso para dosificarlo, adicionarlo y controlarlo, para así poder obtener buenos resultados.

Se debe tener en cuenta que no es posible hacer un concreto que sea adecuado a todas las condiciones climáticas, de latitud del lugar, características especiales de la región, empleando sólo los materiales disponibles de la región, ciertas restricciones de manufactura, colocado y curado y querer obtener resultados óptimos. Para ello se aprovechan las propiedades de los aditivos, para modificar muchas circunstancias diversas que se presentan durante el proceso de manufactura y endurecimiento del concreto.

Los aditivos a usar dependen del tipo de obra y cemento a emplear, ya sea para concreto hidráulico, concreto asfáltico o en diferentes materiales de construcción.

El uso del aditivo queda a juicio del ingeniero proyectista y de los residentes quienes deben tener un conocimiento claro de estos productos así como de su empleo para lograr los mejores resultados.

De los innumerables productos conocidos como aditivos y de sus diversas propiedades, se han clasificado en diferentes tipos en base a normas del A.C.I. Según las diversas propiedades del aditivo se le clasifica de acuerdo al efecto más importante en el concreto.

Por supuesto que la clasificación que se sigue en México es en base a las normas estadounidenses, por la información técnico-científica que nos pueden proporcionar, su cercanía y nuestra dependencia técnica ya que las normas europeas tienen otros métodos de clasificación.

Antes de emplear un aditivo, se tienen que ensayar mezclas de pruebas con el objeto de evaluar el efecto que el aditivo produce en el concreto sobre la propiedad que queremos hacer resaltar.

Tipos de aditivos y grupos

Aditivos químicos y aditivos minerales.

Aditivos químicos y grupo

- I. Mejoradores de la manejabilidad del concreto
 - a) Incluidores de aire.
 - b) Reductores de agua o fluidizantes.
 - c) Densificadores
 - d) Plastificantes

II. Modificadores de tiempo de fraguado y de endurecimiento

- e) Retardantes
- f) Acelerantes de endurecimiento

III. Impermeabilizantes

- g) Reductores de la permeabilidad

IV. Agentes de expansibilidad

- h) Generadores de gas
- i) Estabilizadores de volumen

Descripción de los aditivos

a) Incluidores de aire

Cualquier concreto contiene aire atrapado y se le incluye aire. Sus burbujas no se pueden distinguir, por lo que se toma un valor promedio para todas las cavidades que contengan una pasta determinada. La inclusión de aire se descubrió accidentalmente por la década de los 20 a los 30's. Se empleó en el concreto para incrementar la resistencia a los ciclos de congelación y deshielo.

El primer producto aceptado fue la resina jabonosa Vinsol en 1943, que es una solución acuosa, otro producto es el Durex.

La inclusión de aire altera materialmente las propiedades, tanto del concreto fresco como cuando ha endurecido. Las propiedades benéficas son:

- 1.- Mayor resistencia a los productos químicos deshelantes.
- 2.- Mejor trabajabilidad
- 3.- Menor demanda de agua para determinado revenimiento
- 4.- Reducción permisible en el contenido de arena
- 5.- Menor segregación y sangrado
- 6.- Mayor durabilidad
- 7.- Mejor bombeabilidad

El concreto con el inclusor de aire en estado fresco es mucho más plástico y más trabajable que el que no contiene aire, baja segregación y con un reducido sangrado. La durabilidad del concreto endurecido se mejora por la uniformidad de la masa, menor permeabilidad y absorción capilar.

El inclusor de aire produce miles de millones de diminutas burbujas del orden de 0.05 mm mientras que las del aire atrapado son mayores. Incluidas en la mezcla con los otros componentes, las burbujas no están conectadas entre si, de lo contrario formarían canales con circulación de agua. Las burbujas o huecos se llenan con los productos de la hidratación del cemento, las burbujas constituyen una reserva que alivia las presiones debidas a los cambios de volumen inherente al concreto. La resistencia a la congelación se descubrió casualmente al triturar cemento con sebo de res, que son ésteres conocidos como glicéridos y por el tipo de ácido contienen el 75% de palmitina y estearina con el 25% de oleina. Por la acción de la estearina con el NaOH (Hidróxido de sodio) es soluble al agua formando las burbujas. Según la naturaleza del aditivo, la del cemento, relación agua-cemento del proporcionamiento, tiempo de mezclado, tipo de agregado, pueden alterar el contenido del aire. El volumen total de burbujas de un determinado volumen de concreto afecta la resistencia del mismo. El 5% de cavidades puede disminuir la resistencia hasta en un 30%, por lo cual hay que reducir el contenido del agua en base al contenido de cemento Kg/m³, lo que también aumenta la trabajabilidad pudiendo nivelarse la posible baja de resistencia.

Los aditivos inclusores de aire deben satisfacer las normas ASTM C260-77 los principales requisitos son que produzca rápidamente un sistema de espuma fina y estable, cuyas burbujas individuales resistan la coalescencia. La espuma no deberá ejercer efectos perjudiciales sobre el concreto como su resistencia y cambio de volumen.

La dosificación líquida de los agentes inclusores de aire, complica un poco la operación de proporcionamiento. El inclusor representa el 0.65% del peso del cemento, es decir 32.6 ml por cada 50 Kg de cemento (seco). Estas recomendaciones sólo son guías ya que la dosificación puede variar dependiendo de la granulometría de los agregados, de la riqueza de la mezcla, de la temperatura del concreto, sólo la experiencia en el manejo de aditivos en pruebas de mezcla, nos da el criterio para la mejor dosificación.

Factores que afectan el contenido de aire.

La inclusión inadecuada de aire, da como resultado una disminución del contenido del aire. Los siguientes factores pueden ser las causas:

- 1.- Incremento excesivo de la temperatura del concreto (arriba de 24°)
- 2.- Mezclado prolongado
- 3.- Mezclado insuficiente
- 4.- Aditivos incompatibles (hay casos en que los aditivos se neutralizan)
- 5.- Incremento de revenimiento superior a 15 cm
- 6.- Concreto de bajo revenimiento
- 7.- Fallas en el dosificador del aditivo
- 8.- Fallas de los aparatos medidores de aire

Alto contenido de aire.

El excesivo porcentaje de aire también ocasiona problemas diferentes a las de bajo contenido, el alto contenido incrementa la fluencia, reduce la resistencia, genera burbujas en la superficie así como viscosidad. Las causas pueden ser:

- 1.- El dosificador de aditivo no funciona bien
- 2.- Cambio de agente incluser
- 3.- Cambio en la granulometría
- 4.- Algas en el agua de hidratación
- 5.- Forma de los granos de los finos donde más actúa el incluser

b) Reductores de agua o fluidizantes

Cuando la cantidad de agua para la mezcla es mucho mayor que la requerida para la hidratación del cemento Portland, más del 50% del agua agregada no sirve más que para lubricar la mezcla. Esta agua adicional afecta la contracción, la durabilidad y la resistencia del concreto. La norma ASTM C494-79 clasifica varios tipos de aditivos reductores de agua, siendo los principales:

- a) ácido lignosulfónico y sus sales
- b) ácido carboxílico y sus sales

son sustancias que se concentran en la superficie de contacto entre dos caras, alterando las fuerzas físico-químicas que actúan en ellas. Las sustancias se integran a las partículas del cemento dándoles una carga negativa, lo que produce una repulsión entre ellas que estabiliza su dispersión, dando lugar a la formación de una película de moléculas de agua, orientadas alrededor de cada partícula, lo que les da más movilidad. El agua liberada de la floculación lubrica la mezcla aumentando su trabajabilidad.

El efecto de dispersión consiste en exponer más área superficial del cemento a la hidratación, lo que incrementa la resistencia y reduce la demanda total de agua para un determinado revenimiento.

Los aditivos reductores de agua ofrecen los siguientes beneficios:

- 1.- Reducción del costo
- 2.- Reducción del sangrado, la segregación y el alveolado
- 3.- Mejoramiento de la trabajabilidad en mezclas ásperas mojadas
- 4.- Reducción del área superficial arenosa en concreto de alto revenimiento
- 5.- Incremento de la resistencia
- 6.- Reducción del agrietamiento y la permeabilidad
- 7.- Reducción de la contracción
- 8.- Incremento de la adherencia del concreto con el acero de refuerzo.

Los aditivos reductores de agua se agregan al concreto para disminuir la relación agua-cemento o para mejorar la trabajabilidad de un concreto sin cambiar la relación agua-cemento. Los aditivos reductores de agua, reducirán usualmente los contenidos de agua en un 5% a un 10% y muchos de ellos también aumentarán los contenidos de aire de 0.5 a 1 punto porcentual. Los aditivos retardantes también pueden aumentar el contenido del aire.

Los aditivos reductores de agua de alto rango, reducen los contenidos de agua entre 12% y 30% y algunos pueden aumentar simultáneamente el contenido de aire hasta un punto porcentual, otros pueden disminuir o no afectar el contenido de aire.

Cuando se use más de un aditivo en un concreto, el fabricante del aditivo deberá asegurar la compatibilidad en el entremezclado de los aditivos o se deberá aprobar la combinación de los aditivos mediante mezclas de prueba. El agua contenida en muchos aditivos deberá considerarse parte del agua de mezclado si el contenido de agua del aditivo es suficiente para efectuar la relación agua-cemento en 0.01 o más.

Los fabricantes de aditivos se deben apegar a la norma ASTM C494.

Acción química del dispersante.

La acción del lignosulfonato de calcio sobre el cemento Portland se explica así: cuando las macromoléculas de lignosulfonato se introducen en el sistema agua-cemento, ésta se absorbe, orientando sus radicales menos polares, sobre los gránulos del cemento y sus radicales salinos hacia moléculas de agua.

La absorción del lignosulfonato de calcio depende, por otra parte, de la naturaleza del cemento mismo. El aditivo manifiesta una acción más favorable con los cementos ricos en C₃A bloquean al aditivo, lo que hace necesario una mayor cantidad de este para tener el mismo resultado.

Por la absorción de las macromoléculas hidrófila del lignosulfonato de calcio se impide la aglomeración del cemento en forma de pasta rígida por el contacto directo o inmediato de los granos activos. Además de este primer efecto, se produce un retardo de fraguado y una lubricación entre los granos, de tal forma que se puede disminuir el agua necesaria para la manejabilidad del concreto sin reducir la plasticidad de la pasta ya que los granos recubiertos por una película coloidal se deslizan perfectamente unos sobre otros.

Se demuestra que es necesario atribuir el efecto lubricante de las partículas absorbidas a la hidrofilia y a la solubilidad de la superficie de los granos y no precisamente al fenómeno que caracteriza a los aceites lubricantes, aunque el resultado es el mismo.

Las películas coloidales alrededor de los granos, aíslan del contacto directo a los elementos activos del cemento (siempre dispuestos a soldarse) y constituyen una barrera a la floculación al mismo tiempo que causan un retardo en el fraguado, que no es otra cosa que la propensión de los granos coloidales a formar geles reticulares por la acción mecánica del mezclado, de donde obtiene su gran plasticidad. Este estado es reversible en geles coloidales después de un tiempo de reposo, dando así a los concretos y al mortero tratados con lignosulfonato de calcio, no solamente una gran manejabilidad, sino también una gran aptitud para conservar su forma durante el tiempo que transcurre entre el colado y el fraguado y no deformarse y escurrir sobre superficies inclinadas como sucedería con los productos fluidizantes simplemente con agua.

Aumento de la trabajabilidad del concreto.

Obviamente, se obtiene un concreto trabajable con el mínimo contenido de agua y en consecuencia alcanzará mayor resistencia al endurecer, por haberse reducido la relación agua-cemento. Por esta razón a este tipo de aditivos también se les llama, con mucha propiedad, "agentes reductores de agua". No obstante se obtienen tres efectos distintos con un dispersante, según se conserve o se modifique las proporciones de agua y de cemento en el conjunto total del concreto.

- 1.- La adición del dispersante respetando el proporcionamiento original, produce un aumento en el revenimiento y en la fluidez y por ende la manejabilidad del concreto.

2.- La adición del dispersante, reduciendo la cantidad de agua y conservando la de cemento, no aumenta el revenimiento ni la fluidez pero si la resistencia final porque se reduce la relación agua-cemento.

3.- La adición del dispersante, reduciendo la cantidad de lechada para conservar el mismo revenimiento, no mejora la fluidez, ni aumenta o disminuye la resistencia final, por que se conserva la misma relación agua-cemento, pero se consume menos cemento por metro cubico de concreto.

Dosificación.

La dosificación de los lignosulfonatos de calcio, de sodio o de amonio, está comprendido entre 0.26% y 0.36% del peso del cemento, en ocasiones especiales se puede incrementar la dosificación entre 0.40% y 0.50% respectivamente.

Agregando en proporciones mayores que las indicadas o el uso exagerado de aditivo puede llegar a evitar completamente la instalación de los geles del cemento.

Elección del dispersante.

La práctica establece que es recomendable:

- Evitar reacciones químicas entre el dispersante y el inductor cuando se usan en el mismo concreto.
- El dispersante debe ser neutro con relación al cemento y no dar lugar a productos extraños aún en largo tiempo.
- El uso de los dispersantes no debe complicar la preparación del concreto
- El producto deberá tener suficiente estabilidad para poder ser almacenado por largo tiempo y no contener impurezas.

Los dispersantes también son compatibles con los impermeabilizantes integrales, con los expansores y con las puzolanas. En general los dispersantes son los aditivos que pueden usarse con más confianza, en la mayor variedad de condiciones y su empleo casi nunca tiene contradicciones o prohibiciones expresas.

c) Densificadores

Su acción tiene lugar sobre el cemento, regulando la formación de geles. Estos aditivos son sales orgánicas, su efecto principal es dar mayor capacidad a la pasta de cemento y retardar

el tiempo de fraguado conservando a la masa en estado plástico hasta que empieza el endurecimiento.

El componente químicamente activo de los densificadores detiene la formación de los geles en proporción directa a la cantidad de aditivo dosificada. Estos geles, aún muy pequeños durante el manejo y colocación del concreto fresco en su sitio, retiene menos agua y por lo tanto se cuenta con un mayor volumen de ésta en beneficio de la trabajabilidad.

Puesto que la formación de los geles se retarda, hay menor posibilidad a la floculación de los granos de cemento en el medio acuoso. Las colonias de partículas de cemento en un concreto común, sin aditivo, dificultan la manejabilidad y tienen un efecto cementante deficiente. Con la adición de un agente densificador se obtiene una mejor distribución de los granos y un contacto más uniforme entre el cemento, los agregados, y el fierro de refuerzo.

El empleo de este tipo de aditivo parece ser más controlable que el de otros plastificantes y se pueden obtener lapsos más largos de fraguado, a la vez que más fáciles de preveer. En cambio, la cantidad de agua que se puede reducir en un concreto, para una misma fluidez y un mismo revenimiento no alcanza la proporción que se logra con el uso de los agentes dispersantes.

Dosificación

Los aditivos densificadores se obtienen generalmente en forma líquida. Se pueden usar en concretos hechos con cualquier tipo de cemento Portland independientemente de la cantidad, forma y calidad de los agregados.

Se añaden al agua de colado en proporción que varía entre 60 y 120 cm³ por saco de cemento de 50 kg, cuando la temperatura ambiente y la del agua están comprendidas entre los 18°C y 30°C.

A temperaturas entre 20°C y 25°C y para una relación agua-cemento de 0.5 se puede esperar con la adición de un densificador, una reducción de un litro de agua por saco de cemento, manteniendo la misma manejabilidad de la mezcla.

Reducción de los cambios de volumen.

Como los aditivos densificadores hacen más lenta la formación de los geles y permiten una reducción en la relación agua/cemento, los geles que son todavía más pequeños durante la colocación del concreto en su sitio, adquieren un tamaño final también un poco menos grande durante el endurecimiento, aunque su número es muchas veces mayor que los geles normales. De ahí que se aminore la retracción del concreto al secar.

Por otra parte, el calor de hidratación comienza cuando el concreto está muy fresco y puede deformarse, pero como los agentes densificadores retardan la formación de los geles y su "crecimiento", así como su hidratación, la generación de calor es menos intensa y más lenta, lo que permite, a su vez, que una buena parte de calor se desprenda de la masa del concreto antes de que endurezca.

Como consecuencia de la reducción de la relación agua/cemento y la mejor distribución de los geles, el concreto resulta más espeso o denso, y el volumen de vacíos, alvéolos y conductores capilares es menor, al final del endurecimiento y secado. Así los cambios alternativos de volumen por absorción y secado se reduce al mínimo.

d) Plastificantes

No todos los plastificantes son agentes reductores de agua. Entre los plastificantes tradicionales uno de los más antiguos es la cal, que se ha venido usando para dar propiedades plásticas a los morteros de cemento y arena y aun a ciertos concretos, pero que requieren un aumento de agua. Otro de estos aditivos es la tierra diatomácea conocida como sílice fósil, que también necesita mayor cantidad de agua para un mismo revenimiento.

Recientemente las arenas de sílice, las puzolanas y las bentonitas, como estos materiales le dan simultáneamente diversas propiedades especiales al concreto hidráulico de cemento Portland, han sido consideradas como grupo independiente, ya que, generalmente, modifican las relaciones agua/cemento y arena/grava en forma substancial.

Compatibilidad entre los diversos aditivos mejoradores de la manejabilidad del cemento.

La acción de los agentes por absorción (dispersantes y densificadores) cuando se usan simultáneamente, no se acumulan, por que todos ellos actúan sobre el cemento y solamente alguna vez sobre los granos muy finos de arena o materias muy pulverizadas, formando películas que impiden la acción fisicoquímica de otros productos, pero si son compatibles con los inclusores de aire, que ejercen su efecto plastificante sobre la arena, por lo que su acción conjunta es frecuentemente recomendable.

e) Retardantes

Retardar el fraguado de un cemento, es prolongar el periodo que transcurre desde que se le pone el agua hasta el principio de las reacciones químicas de hidratación.

No se debe confundir el efecto de retardar el fraguado con el de hacer más lento el proceso de endurecimiento. Durante el fraguado se puede vibrar y revibrar el concreto, pero a partir de un momento muy próximo al de comienzo de endurecimiento ya no debe tocarse el concreto, que tendrá que permanecer en absoluto reposo hasta que la hidratación del cemento llegue a un grado tal que permita al concreto presentar suficiente resistencia para soportar las cargas y esfuerzos previstos.

Como los retardadores del fraguado son especialmente útiles en la revibración del concreto, es conveniente insistir en que esta práctica aumenta la compacidad sin riesgo de fisuración cuando se lleva a cabo, a veces hasta algunas horas después de haber sido colado el concreto y de haberse vibrado por primera vez.

Entre las sustancias capaces de producir un retardo en el tiempo de fraguado del concreto se puede hacer mención de las siguientes: Azúcar, glicerina, ácido fosfórico, acetato de calcio, bicarbonato de sodio, diversos nitratos, el sulfato de sodio, el sulfato de aluminio, sulfato de zinc, sulfato de cobre, sulfato de hierro; los óxidos de zinc y de plomo. Sin embargo ninguna de estas sustancias pueden usarse como aditivos retardadores.

Para precisar las condiciones que debe satisfacer un buen agente retardador hay que definir a éste como un producto que para un tipo dado de cemento y para una relación agua/cemento determinada, alarga el tiempo de fraguado y el del comienzo del endurecimiento pero sin influenciar desfavorablemente el proceso ulterior del endurecimiento. Al cabo de algunos días no debe haber traza del retardo inicial y el ritmo de endurecimiento debe llevarse a cabo normalmente, sin que las resistencias finales sufran ninguna posible disminución, sino, por el contrario, alcancen valores más altos. Por estas razones no debe emplearse ninguna de las sustancias primeramente enumeradas ya que todas ellas tienen influencia negativa en el endurecimiento durante su hidratación.

Por ejemplo, el azúcar común es de tal manera perjudicial para el cemento que una cantidad tan pequeña como la contenida en una cuchara de mesa es capaz de impedir definitivamente el endurecimiento de todo un metro cúbico de concreto si llega a dispersarse en esa masa.

La glucosa y otras sustancias de las mencionadas se usan, sin embargo, aplicadas directamente en los moldes en soluciones relativamente débiles para evitar la adherencia de éstos al concreto; pero hay que manejarlos con mucho cuidado para no excederse en su aplicación y provocar efectos indeseables.

Retardantes aceptados.

Los aditivos retardantes, generalmente son los mismos productos que causan la dispersión del cemento, es decir, los fluidizantes y reductores de agua como los lignosulfonatos, también ciertos carbohidratos o almidones, materiales celulósicos, ácidos orgánicos, son efectivos como retardantes.

El efecto retardante es solamente en la etapa de fraguado. Generalmente, retardan tanto el momento inicial como el final, este último a veces hasta veinticuatro horas; pero otras con ciertos productos se nota un ligero adelanto en el tiempo inicial.

Son muy necesarios cuando se tienen problemas de fraguados rápidos por altas temperaturas, no solo en los climas cálidos sino en las minas y pozos petroleros. También son indispensables en el inyectado de mortero o en concreto bombeado y donde debe contarse con una manejabilidad prolongada para tener una buena colocación o lograr un concreto monolítico.

En los últimos años ha habido una demanda creciente de retardantes que ha evolucionado la técnica de las estructuras monolíticas, como paredes de tanques, albercas o cisternas, y muros de cimentaciones que se cuelan por franjas o zonas eliminando las juntas frías. También se usan donde se necesita revibrar el concreto. Generalmente se tiene una mejor hidratación y se obtienen mejores resistencias.

La acción retardante de los dispersantes y los densificadores, en el tiempo de fraguado, se debe a la formación de películas sobre los granulos de cemento no hidratados y a la absorción del aditivo sobre los productos de hidratación del cemento mismo.

Esta absorción se hace igualmente sobre las nuevas formaciones en forma de gel que resultan de la hidratación y de la hidrólisis de los compuestos minerales del clinker.

El efecto de retardamiento en el fraguado que causan los aditivos apropiados pueden valorizarse y estudiarse en las pastas de cemento, por medio de las agujas de Vicat o de Gilmore y en el campo las agujas Proctor.

Relación entre plastificantes-retardantes e inclusores de aire.

Los plastificantes-retardantes pueden usarse en el concreto independientemente de los inclusores de aire o en combinación con ellos, generalmente con la resina de Vinsol. También hay en el mercado dispersantes-retardantes ya combinados con el agente inductor de aire lo que facilita en determinadas circunstancias dar las características necesarias al concreto.

El plastificante retardante no tiene influencia sobre la cantidad de aire incluido, lo que permite un efecto de igual eficacia con cualquier tipo de cemento Portland y agregados con la granulometría que se desee; y para cualquier revenimiento, sin importar la temperatura ambiente.

f) Acelerantes de endurecimiento

En este grupo se cuentan los acelerantes de endurecimiento que se combinan químicamente con el cemento durante la hidratación del mismo, y los estabilizadores que solamente con su presencia facilitan y apresuran la hidratación.

Un acelerante es un aditivo, con el que se logra que el concreto alcance altas resistencias a edades tempranas, es decir, mucho antes de las que alcanzaría normalmente sin el uso del acelerante, el cual toma parte en la reacción química entre el cemento y el agua y por lo tanto se consume. También se obtienen resultados semejantes con productos que actúan solamente como catalizadores, o sea que promueven la reacción química sin alterarse o consumirse ellos mismos.

Los productos químicos que reaccionan adelantando la resistencia de las pastas de cemento Portland y agua, comprenden a ciertos cloruros solubles como el de calcio, el de sodio, además algunos carbonatos, silicatos, fluosilicatos e hidroxidos. Entre los catalizadores el más conocido es la Trietanol-amina en combinación con otras sustancias.

Por lo que toca a los aditivos acelerantes el más usado, en los Estados Unidos, América Latina y Europa, es el cloruro de calcio. La ASTM en sus especificaciones relativas para cloruro de calcio ASTM-D98, establece principios muy importantes que deben ser tomados en cuenta, tanto por el fabricante de aditivos como por el consumidor.

Al usar este acelerante se puede disminuir la cantidad de agua en un 10% a 15% sin reducir el revenimiento de la mezcla y obtener un aumento del 50% en la resistencia a los tres días, de 15% a 20% a los 28 días y aun mejores resistencias a los 6 meses y hasta un año.

La curva de crecimiento del incremento de resistencia alcanza su máximo a los tres días y luego disminuye, aunque al cabo de un año aun se nota algún ligero incremento, ver figura 11.6.

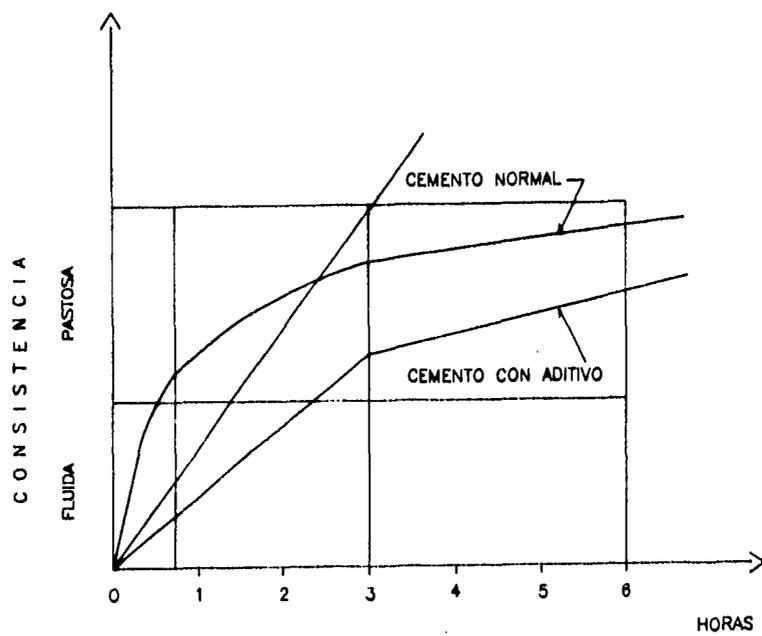


Figura 11.6 Gráfica comparativa entre pastas de cemento normal vs. pasta de cemento con aditivo. Obsérvese el retardo considerable al principio del endurecimiento.

El cloruro de calcio en sal anhidra, reacciona con los aluminatos del cemento y da lugar al cloro-aluminato de calcio que se precipita en forma microcristalina. Por ciertos procesos bastante complejos favorece las difusiones y acelera en esa forma el endurecimiento con muy poco efecto en el fraguado propiamente dicho.

Los efectos acelerantes del cloruro de calcio son más notables conforme aumenta la temperatura y como su reacción es francamente exotérmica, se utiliza con mucha eficacia en la manufactura en las bajas temperaturas invernales. El uso de cloruro de calcio en concreto preesforzado esta limitado al 2% según la ASTM. En la práctica en México las dependencias oficiales como SARH, SEDESOL y los principales proyectistas del medio, prohíben el uso del cloruro de calcio en dicho concreto por lo cual las empresas que fabrican aditivos se han visto en la necesidad de desarrollar acelerantes especiales totalmente libres de cloruro de calcio para concreto preesforzado.

Acelerantes de fraguado.

Estos aditivos llamados también, "acelerantes ultra-rápidos" o "selladores" se emplean para provocar un fraguado rapidísimo de la pasta de cemento y agua o del mortero de cemento, con el fin de tapar fugas de agua, algunas grietas, orificios y parches pequeños. Son, generalmente, líquidos preparados para adicionarse directamente al polvo de cemento o al mortero seco de cemento y arena, y el cual se endurece en unos quince a treinta segundos, desde el momento en que entra en contacto con el sellador. Diluido en agua y variando las proporciones, puede graduarse la velocidad del fraguado según se desee.

También hay acelerantes instantáneos en polvo con los cuales se puede preparar mezclas en seco, con cementos y arena que son prácticos para ciertos trabajos en pequeña escala, pero difíciles de conservar por mucho tiempo.

Compatibilidad de los acelerantes con los diversos aditivos plastificantes.

Con los acelerantes se pueden hacer algunas combinaciones con otros tipos de aditivos para obtener distintos efectos en el concreto, ya que generalmente son compatibles con la mayor parte de ellos. Por ejemplo, con los dispersantes se logra una combinación muy satisfactoria porque al reducir la relación agua/cemento se obtienen altas resistencias, no sólo a los tres y siete días, sino también a los catorce y veintiocho días, las cuales se mantienen superiores a las del concreto no tratado. ver figura 11.7, aun por más de un año y además se compensa la refracción, por el hecho de emplear menos agua para el mismo revenimiento.

También se combina con los inclusores de aire y con algunos otros productos, pero generalmente no se deben mezclar antes de añadirse al concreto, sino que deben adicionarse separadamente. No obstante, existen ya en el mercado aditivos de determinadas marcas, en las cuales interviene el cloruro de calcio. Actualmente se pueden usar con toda confianza, siempre que procedan de una fábrica de reconocida seriedad.

Los acelerantes del tipo de cloruro de calcio duplican su eficacia cuando se les emplea en combinación con el lignosulfonato de calcio o de sodio, lo que permite usar menores proporciones del primero para obtener el mismo efecto acelerante y por lo tanto tiene menos probabilidad de producir efectos colaterales nocivos.

Es aconsejable que los acelerantes se usen con cementos normales tipo I, pero no hay inconveniente para que se usen en concretos manufacturados con cemento de resistencia rápida tipo III. En este caso se logra una aceleración mucho mayor y resistencias finales más altas, pero, como es de suponerse, las reacciones generan una fuerte cantidad de calor, lo que como es sabido, a su vez ocasiona una gran disminución de volumen al bajar el concreto a la temperatura ambiente.

El uso de los acelerantes es muy útil en la fabricación de productos de concreto precolado como bloques, pilotes y tubos, porque permite manejarlos y transportarlos poco tiempo después de fabricados. El empleo de acelerantes no interfiere sino que ayuda a obtener ventajas substanciales, simultáneamente a los procesos de curado con vapor o agua caliente.

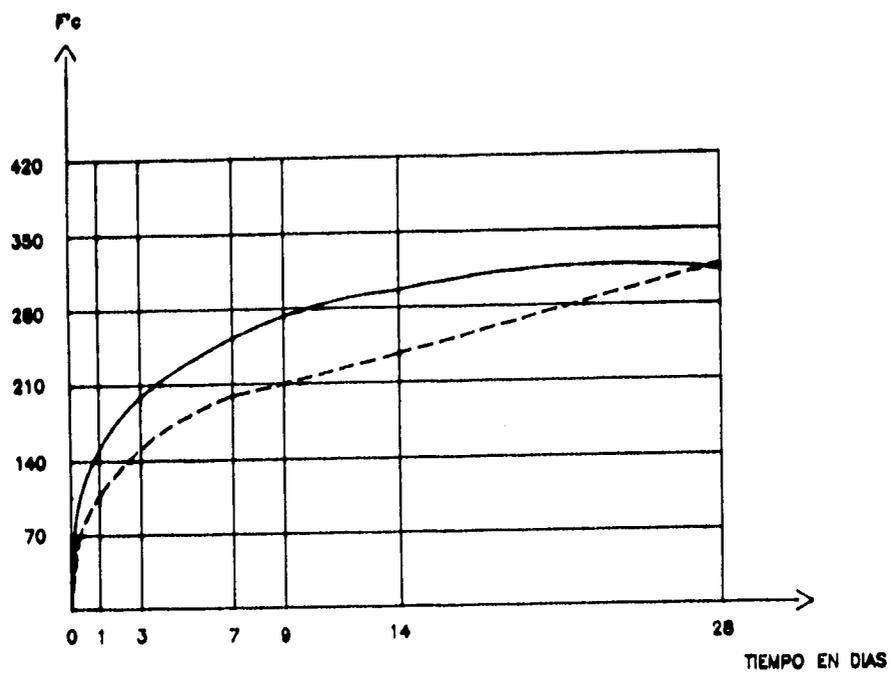


Figura II.7 Curva de resistencia con acelerante línea llena, curva de resistencia normal línea interrumpida.

q) Reductores de permeabilidad

Debido a los cambios de volumen que sufre el concreto por sangrado y contracción quedan poros y conductos capilares de distintas formas y diámetros, en toda la masa, con un volumen casi igual a un 50% del volumen del cemento. Este espacio poroso se mantiene lleno de agua durante todo el tiempo que el concreto está bajo un curado efectivo, pero queda vacío en cuanto se deja secar, encogiéndose un poco, disminuyendo las dimensiones de los poros y conductos capilares, dando lugar a la reducción total de volumen, denominada "retracción". A su vez este espacio es susceptible de volverse a llenar de agua si se pone en contacto con ella y hasta puede recobrar un poco del volumen perdido gracias a un proceso inverso, que podría llamarse "hinchado".

Características de la porosidad de la pasta.

De acuerdo con algunos investigadores se considera que la pasta de cemento endurecida tiene un grado de permeabilidad al agua del mismo orden que las piedras naturales compactas como el mármol y el granito, pero siempre y cuando la pasta de cemento y agua haya sido hecha con una relación agua/cemento inferior a 0.5.

La finura del cemento y su composición química no tiene nada que ver con la porosidad, ésta sólo depende de la relación agua/cemento. A partir del 0.5 la permeabilidad al agua de la pasta se hace notablemente mayor.

El cemento aunque haya sido sometido a un proceso de hidratación avanzado, al secarse completamente llega a tener una permeabilidad 70 veces mayor, cuando la relación agua/cemento es igual a 0.7

Permeabilidad del concreto.

En las obras de concreto, no se llega a tener un buen grado de permeabilidad similar al medido en la pasta pura en el laboratorio, lo cual es debido a las deficiencias en el contacto entre pasta y agregados.

Por medio de colorantes líquidos se han podido observar al microscopio, en secciones delgadas de concreto obtenidas de probetas de laboratorio, los huecos capilares variables que se encuentran entre el cemento y los agregados. Por ejemplo: la caliza tiene mayor adherencia que los agregados que contienen

cuarzo o mica. Además, las fisuras capilares en la pasta de cemento causadas por la retracción al secarse, junto con los tubos capilares dejados por el agua expulsada durante el sangrado, dejan poros muy finos que favorecen la permeabilidad del concreto.

La manera de lograr un concreto menos permeable es, desde luego, usar baja relación agua/cemento, una buena granulometría, una colocación adecuada y evitar lo más posible el sangrado, pero queda por contrarrestar la absorción capilar, que se presenta en el concreto endurecido y ya seco. Por lo tanto se pueden considerar dos tipos de impermeabilizantes integrales, ya sea para uno u otro objeto.

Con la denominación de impermeabilizantes integrales, se consideran los productos o las sustancias químicas que ya tienen efectos en las propiedades del cemento endurecido, aparte de cualquier otro efecto que puedan tener en el concreto fresco. El término "impermeabilizantes" ya sea en la masa integral de concreto o simplemente superficial, es la protección del concreto contra la penetración del agua o la detención de ésta en un flujo a través de concreto no saturado. Los aditivos clasificados con este nombre, consiguen reducir la proporción de agua que puede penetrar al concreto seco o a la transmisión de agua a través del concreto no saturado, desde el lado mojado hasta el lado seco.

Esto quiere decir que los impermeabilizantes integrales pueden ser aditivos eficaces para lograr concretos prácticamente impermeables, con la condición de que el concreto se manufacture con los procedimientos y materiales adecuados para obtener la menor porosidad posible, pero no podrán suplir las deficiencias de un concreto excesivamente poroso o que presente huecos o grietas por defectos de colocación y otros motivos.

La permeabilidad del concreto endurecido se debe tanto a la capilaridad como a las bolsas de aire y a las vías de agua. Sin embargo, hay que diferenciar los procesos según los cuales el agua puede pasar a través de él: En uno, el agua a presión en contacto con una superficie de la estructura es forzada a pasar por canales grandes o pequeños hasta el otro lado. A este flujo se le llama "permeabilidad".

En el otro proceso, el paso del agua a través del concreto puede tener lugar sin ninguna presión externa apreciable sino simplemente por la acción de las fuerzas capilares que succionan el agua hacia adentro y a través de la masa. La evaporación en las superficies expuestas al aire seco y la reposición constante de la humedad desde el lado en contacto con el agua, a la ascensión de ésta por la capilaridad, dan como resultado una corriente a través del concreto que se denomina "absorción".

Es básico el conocimiento de propiedades físicas, como la adherencia, capilaridad, porosidad y permeabilidad, para hacer aditivos que pueden limitar o aumentar algunas de estas propiedades.

h) Generadores de Gas

La disminución del volumen del concreto fresco, por asentamiento de los agregados y la pérdida de agua por sangrado, puede ser excesiva o cuando menos indeseable en el concreto endurecido; por eso es conveniente en muchas obras de rellenos cavidades, huecos o grietas, echar mano de un agente expansor.

Reacción química y dosificación.

El polvo de aluminio, agregado al mortero o al concreto, reacciona con el hidróxido de cal libre del cemento durante el fraguado y genera hidrógeno en forma de burbujas diminutas que son distribuidas en toda la masa. También reaccionan con el cemento en forma semejante, el magnesio y el zinc, pero son menos eficaces que el aluminio. La rapidez e intensidad de la reacción depende del tipo y de la cantidad de polvo de aluminio que se agregue a la mezcla, así como de la finura del cemento, temperatura, proporción de los componentes y algunos otros factores. El porcentaje de aluminio para tener una compensación de todas las disminuciones de volumen que sufre un concreto desde que se coloca en los moldes hasta que ya está endurecido y seco, es del orden de 0.005 a 0.02% del peso del cemento.

Composición del aditivo y su efecto físico.

Los aditivos generadores de gas, a base de polvo de aluminio, son productos combinados de dispersantes, repelentes, retardantes o puzolanas, que facilitan la dispersión de la masa de concreto y evitan la absorción capilar. La generación de hidrógeno, cuando se controla debidamente, produce no solamente una ligera expansión de la masa del concreto fresco, sino que reduce el asentamiento de los agregados en forma parecida a la inclusión de aire. Sin embargo, como las burbujas de hidrógeno tienden a subir, no producen efecto favorable en la disminución del sangrado.

Expansión, adherencia y resistencia del concreto.

Cuando se restringe o limita la expansión causada por el aditivo se aumenta la adherencia al fierro de refuerzo y se obtiene un buen empaque. Puede emplearse también, en el empaque de elementos post-tensados en obras de concreto preesforzado. El efecto del aditivo en la resistencia a la compresión del concreto, depende en gran parte del grado de restricción a que esté sujeta la masa del concreto en su expansión. Sin ninguna limitación, la pérdida en resistencia puede ser considerable, cuando se usa un alto porcentaje de aditivo; pero cuando la expansión se restringe suficientemente, entonces la pérdida no sólo llega a ser inapreciable, sino que con frecuencia la resistencia se aumenta, independientemente de las formas o moldes que confinen o encierren completamente la masa de concreto fresco tratado con un agente expansor y puedan resistir las presiones que causa el hidrógeno producido.

Recomendaciones para el uso de agentes de expansión.

El uso de agentes de gas no impide el encogimiento del concreto en el proceso de secado que sigue a la suspensión total del curado. Por esta razón los empaques o rellenos deben protegerse convenientemente para que no pierda su humedad. Esto que parece una dificultad es, sin embargo, un caso frecuente en túneles cárcamos, y muchos otros conductos o recipientes de agua.

En un ambiente caluroso, la reacción del aditivo puede ocurrir demasiado pronto y perder su efecto benéfico. En cambio a bajas temperaturas, la reacción es mucho más lenta y posiblemente llegue a producir el efecto deseado antes de que el concreto o el mortero se endurezcan. Por lo tanto el constructor deberá tomar las medidas necesarias para controlar la temperatura del agua del mezclado.

La rapidez de la generación de gas aumenta con la adición de algunos materiales alcalinos. Por lo general, la reacción del aluminio empieza exactamente en el momento de adicionarlo al concreto en la revolvedora y se prolonga hasta una hora y media como mínimo y cuatro horas como máximo. A una temperatura de 30°C o poco más, la reacción se reduce en sólo treinta minutos. Ahora bien una misma cantidad de aluminio produce generalmente una expansión doble a 20°C que a 5°C.

Diferentes preparaciones.

Teniendo en cuenta que, generalmente se usa una cantidad muy pequeña de aluminio en polvo (como una cucharada) por metro cubico de concreto y dada su tendencia a flotar en el agua, por su consistencia grasosa y su poco peso, conviene usarlo con algún vehículo que lo fije y disperse en la masa de concreto durante el

mezclado. Hay productos ya preparados para usar en cantidades más manejables / asegurar una buena dispersión. Comúnmente se presentan en forma de polvo, que debe mezclarse con el cemento y arena en seco, en la revoladora. antes de agregar el agua, para evitar la segregación del aluminio, pero también se preparan aditivos de consistencia viscosa o cremosa conteniendo proporciones convenientes de aluminio en polvo que pueden agregarse al agua poco antes de hacer el concreto y se mantienen en suspensión durante un largo tiempo. Estos garantizan una mejor suspensión en la masa y por lo tanto una generación de hidrógeno más uniforme.

Entre los aditivos y generadores de gas no todos producen hidrógeno; el hipoclorito de calcio y el peróxido de hidrógeno, cuando se combinan con algunos componentes del cemento, genera oxígeno en pequeñas burbujas. su uso, no obstante, no está tan generalizado como el polvo de aluminio.

Los generadores de gas, principalmente hidrógeno, no son compatibles con inclusores de aire, porque ocupado por las burbujas diminutas de aire, que pueden llegar a ser hasta de un 6% del peso del cemento en un concreto sin perjuicio de la resistencia final, se verá notablemente aumentado por el espacio que ocupen las burbujas microscópicas de hidrógeno al irse generando, con la natural reducción de resistencia del concreto en que se usara simultáneamente; pero, además aumenta también el tamaño de cada una de las burbujas, lo que reduce el efecto de cohesión entre los granos de arena.

i) Estabilizadores de volumen

A este grupo pertenecen ciertos productos que durante la hidratación del concreto se expanden ellos mismos, por determinadas reacciones químicas. A diferencia de los generadores de gas, aumenta su volumen solamente en una proporción definida en estado sólido, por lo que no es necesario confinar completamente al concreto al cual se añaden, pero en cambio es necesario que su acción expansiva no comience antes de que el concreto tenga suficiente resistencia para que éste pueda soportar los esfuerzos de tensión que se provocan.

Con una dosis adecuada se consigue estabilizar el volumen evitando reducciones debidas no solo a la pérdida de agua por sangrado, sino también a las de contracción y aún al encogimiento o retracción por secamiento del concreto endurecido. Entre estos aditivos se cuentan: la limadura de hierro, el cemento aluminoso y las combinaciones o variantes de este último.

No se deben emplear nunca en el mismo concreto agentes generadores de gas y aditivos acelerantes, debido a que estos últimos modifican la temperatura de la mezcla y la consistencia

fluida de la misma, lo que a su vez altera la rapidez de generación de hidrogeno, el tamaño de las burbujas / su distribución en la masa.

El caso con los estabilizadores de volumen es totalmente diferente, principalmente los aditivos a base de limadura o polvo de hierro dulce. Como la expansión en este caso es debido únicamente a la oxidación del hierro, lo importante es que las partículas de este material se encuentren dispersas en todo el concreto, lo que se logra en forma bastante eficaz, tanto durante la revoltura en seco del aditivo con el cemento puro, como de toda la mezcla ya húmeda.

11.3.1 Materiales pulverizados.

En los grupos anteriores, hay productos químicos, generalmente orgánicos, hay también tierras y materiales petreos o minerales divididos en partículas muy finas. Hay materiales químicamente inertes como los cementantes, las puzolanas y los agentes de cristalización. Su condición requiere una pulverización en un grado de finura como la del cemento Portland. El efecto en la pasta de cemento, es mejorar la manejabilidad y corregir deficiencias de finos.

De acuerdo a la definición presentada al inicio del tema de aditivos, los materiales pulverizados se consideran como aditivos. Los pulverizados tienen influencia en la manejabilidad, en el tiempo de endurecimiento, en la impermeabilidad y en otras características del proceso de fabricación del concreto, por lo que son propiamente aditivos.

Tipos de materiales pulverizados.

Los materiales inertes son de varias clases como: el cuarzo, la piedra caliza, la bentonita y el talco. Los materiales cementantes incluyen todos los cementos naturales, las cales hidráulicas, los cementos pobres y los cementos de escoria de alto horno.

Dentro de los materiales inertes se incluyen las puzolanas de las que se habló al inicio de capítulo. Aquí haremos mención de ellas desde el punto de vista de sus propiedades como aditivos ya que pueden usarse para mejorar la trabajabilidad, reducir el costo y proteger contra la expansión, reducen la generación de calor de hidratación del cemento, los cambios térmicos de volumen, el sangrado y la permeabilidad del concreto.

Las características negativas de las puzolanas como aditivos son: se necesita mucho más agua, en comparación con los cementos Portland, para hidratarse. Esta condición exige a su vez, cierta

cantidad adicional de cemento para conservar la relación agua/cemento / garantizar la resistencia prevista. El mayor consumo de cemento aumenta el costo del concreto y la cantidad excedente de agua favorece la retracción y el agrietamiento.

Con el uso de las puzolanas en condiciones favorables se obtienen en el concreto mejores resistencias a la compresión en edades avanzadas, es decir, mayores de un año, comparativamente al concreto que contiene sólo cemento Portland. Además, el proceso de curado debe siempre prolongarse durante mucho tiempo, algo más de veintiocho días.

La proporción que se emplea de puzolana es alta con respecto al peso del cemento sin reducir la cantidad de éste y es de 20 a 25%. Algunas veces se combina con acelerantes (Cloruro de calcio) y dispersantes, para compensar los efectos de retardamiento en el endurecimiento del concreto.

Los materiales finamente pulverizados que se han mencionado son plastificantes del concreto por lo tanto quedan comprendidos en el primer grupo de aditivos junto con los inclusores de aire, dispersantes y densificadores, con los cuales son perfectamente compatibles y aun de efectos que se complementan o acumulan. Sin embargo de la selección de otros aditivos mejoradores de la manejabilidad del concreto, que a su vez son reductores de agua, es preferible a la de aditivos que pueden necesitar mucha más agua para hidratarse como las puzolanas, y por ese motivo las combinaciones que se pretenden hacer de ambos tipos de plastificantes deberán estudiarse cuidadosamente tanto en los laboratorios centrales como en el campo, a pie de obra.

Tómese en cuenta en principio, que las puzolanas no son para uso estructural sino para grandes masas de concreto y en ese caso si es conveniente emplearlas como aditivos simultáneamente con dispersantes, retardantes o acelerantes y con un agente de expansividad en caso necesario. Otros materiales cementantes o inertes finamente molidos pueden usarse con los demás tipos de aditivos, según las características que se deseen dar al concreto, sin que por regla general haya reacciones indeseables entre unos y otros. No obstante, siempre hay que someter a los concretos que se proyecten para distintos objetos a las pruebas aconsejables en cada caso.

En cuanto al cemento hidratado y endurecido en un estado de polvo impalpable, puede considerarse como material inerte, en cuanto a sus reacciones químicas, ya que no tiene propiedades cementantes ni puzolánicas pero hasta ahora solamente se encuentra compatible con el cloruro de calcio u otros acelerantes salinos.

11.4 CONCRETO

Es un conglomerado petreo artificial que se prepara mezclando cemento, agregados generalmente grava y arena natural o triturada y agua. La sustancia quimicamente activa de la mezcla es el cemento, que al fraguar adquiere su dureza y resistencia en forma de masa sólida, semejante a las mejores piedras naturales.

La propiedad particular del concreto es que puede dársele cualquier forma ya que en su estado plástico se le puede colocar en moldes o encofrados de materiales diferentes que al endurecer toma la forma según proyectos arquitectónicos y necesidades al cual está destinado.

El concreto bien proporcionado es resistente y durable, su función principal es la de trabajar a esfuerzos de compresión, ya que es frágil e inútil a esfuerzos de tensión. Sin embargo si se le ayuda con refuerzos de acero, soporta los esfuerzos de tensión y corte. En estructuras donde los esfuerzos son casi totalmente de compresión, se utiliza concreto sin refuerzo y se le conoce como concreto simple o masivo. Cuando se colocan piedras no mayores de 450 New (masas de 45 kg) que reducen la cantidad de grava, arena y cemento, se denomina concreto ciclópeo.

11.4.1 Proporciones de mezclas.

El método racional que se emplea actualmente y que puede garantizar concretos de resistencia y trabajabilidad determinada se basan en la teoría del Dr. Duff A. Abrams y en la compacidad de los agregados. La teoría del Dr. Duff, establece:

" Para materiales dados y condiciones de manipulación semejantes, la resistencia del concreto queda fijada por la relación agua/cemento, siempre que se obtengan mezclas plásticas manejables la relación agua/cemento es precisamente la relación entre las cantidades de agua y cemento en el concreto físico. Se calcula dividiendo el peso del agua entre el peso del cemento contenido en un volumen determinado de concreto".

La relación agua/cemento aumenta cuando el contenido de agua aumenta y disminuye cuando se incrementa la dosificación del cemento. En cualquier caso, mientras más pequeña sea la relación agua/cemento, mejores son las propiedades de la pasta endurecida.

La investigación data de 1919, época en que el Dr. Duff A. Abrams determina la gran importancia de la influencia de la relación agua/cemento. Después de estudiar un gran número de concretos de diferentes composiciones estableció la ley según la cual, con un determinado agregado la resistencia depende solamente de la relación agua/cemento y que la trabajabilidad es función del modulo de finura de los agregados, es decir la

granulometria de los agregados, representado por el número resultante de sumar los tantos por cientos referidos en una serie de tamices y dividido entre 100, ver **figura II.8.**

Posteriormente los estudios realizados por T.C. Powers han permitido comprender más los mecanismos de acción de la relación agua/cemento con el endurecimiento del cemento Portland, debido a la absorción química del agua por los componentes del cemento como el $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ y el $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ la pasta de cemento se endurece formando el gel cada vez más firme, siempre que las cantidades de los elementos que participan en esta reacción se den en proporciones fijas.

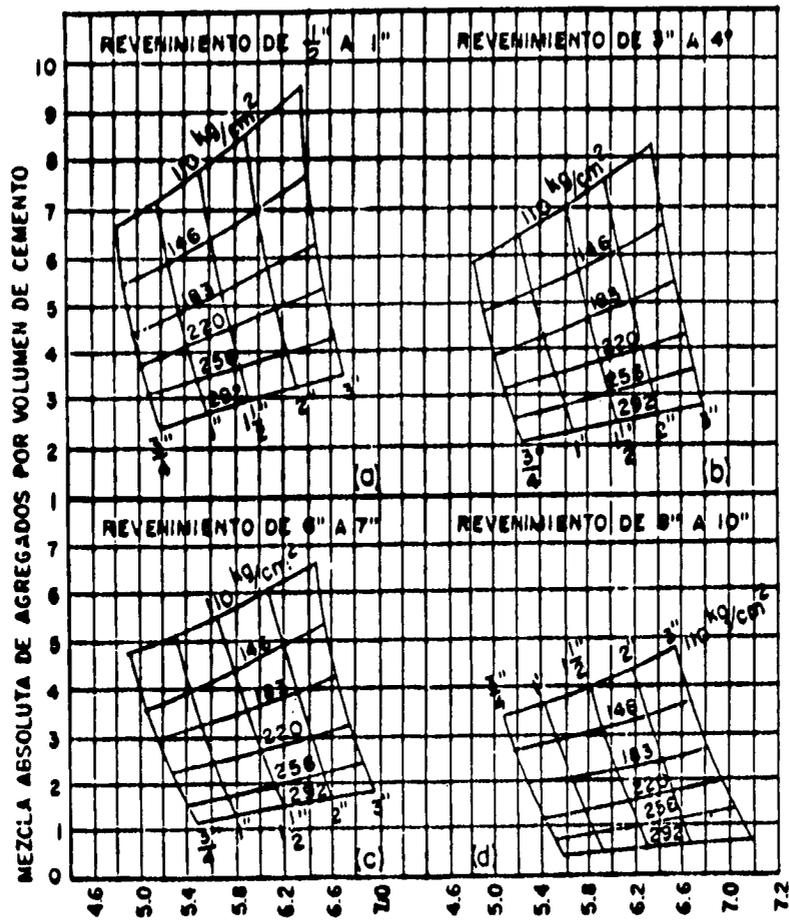


Figura II.8 Módulo de finura de los agregados

11.4.2 Consecuencias prácticas.

Puede modificarse la relación agua/cemento de un concreto, cambiando, ya sea el contenido de agua o bien, la dosificación de cemento. En ambas formas de proceder tienen el mismo efecto sobre la calidad de la pasta endurecida de cemento, pero no sobre las propiedades del concreto fresco, por lo tanto, es posible modificar una mezcla de concreto, para adaptarla a exigencias particulares.

Por cuanto que no se tiene un método exacto en la selección de proporciones de mezclas, aún no es posible realizar un diseño exacto ya que los materiales empleados son variables y muchas de sus propiedades no pueden valuarse de manera cuantitativa, por lo tanto para poder obtener una mezcla satisfactoria, no sólo se tiene que estimar o calcular las proporciones de los materiales, sino que también hay que realizar pruebas de mezclas para realizar ajustes en las proporciones hasta lograr la más satisfactoria.

El Dr. Abrams formuló las expresiones que sirven para fijar la resistencia a los 28 días del concreto, en función de la relación agua/cemento, y como método opcional las curvas que se muestran en la figura 11.9.

Para condiciones comunes de trabajo y relación agua/cemento en volumen donde 980 y 9 son constantes empíricas

$$f'c = \frac{980}{9^{A/33}} \frac{Kg}{cm^2}$$

A = litros de agua por saco de cemento 50 Kg

Para condiciones rígidas de trabajo y relación a/c en volumen

$$f'c = \frac{980}{7^{A/33}} \frac{Kg}{cm^2}$$

aplicando las propiedades de los logaritmos se tiene:

$$\log(f'c \times 9^{A/33}) = \log 980 ; \log f'c + \frac{A}{33} \log 9 = \log 980$$

33 log f'c + A log 9 = 33 log 980 despejando el valor de A

$$A = \frac{33 \log 980 - 33 \log f'c}{\log 9}, \text{ siendo 33 factor comun se tiene}$$

finalmente $A = \frac{33 (\log 980 - \log f'c)}{\log 9}$ para condiciones comunes de trabajo.

$$A = \frac{33 (\log 980 - \log f'c)}{\log 7} \text{ para condiciones rígidas de trabajo}$$

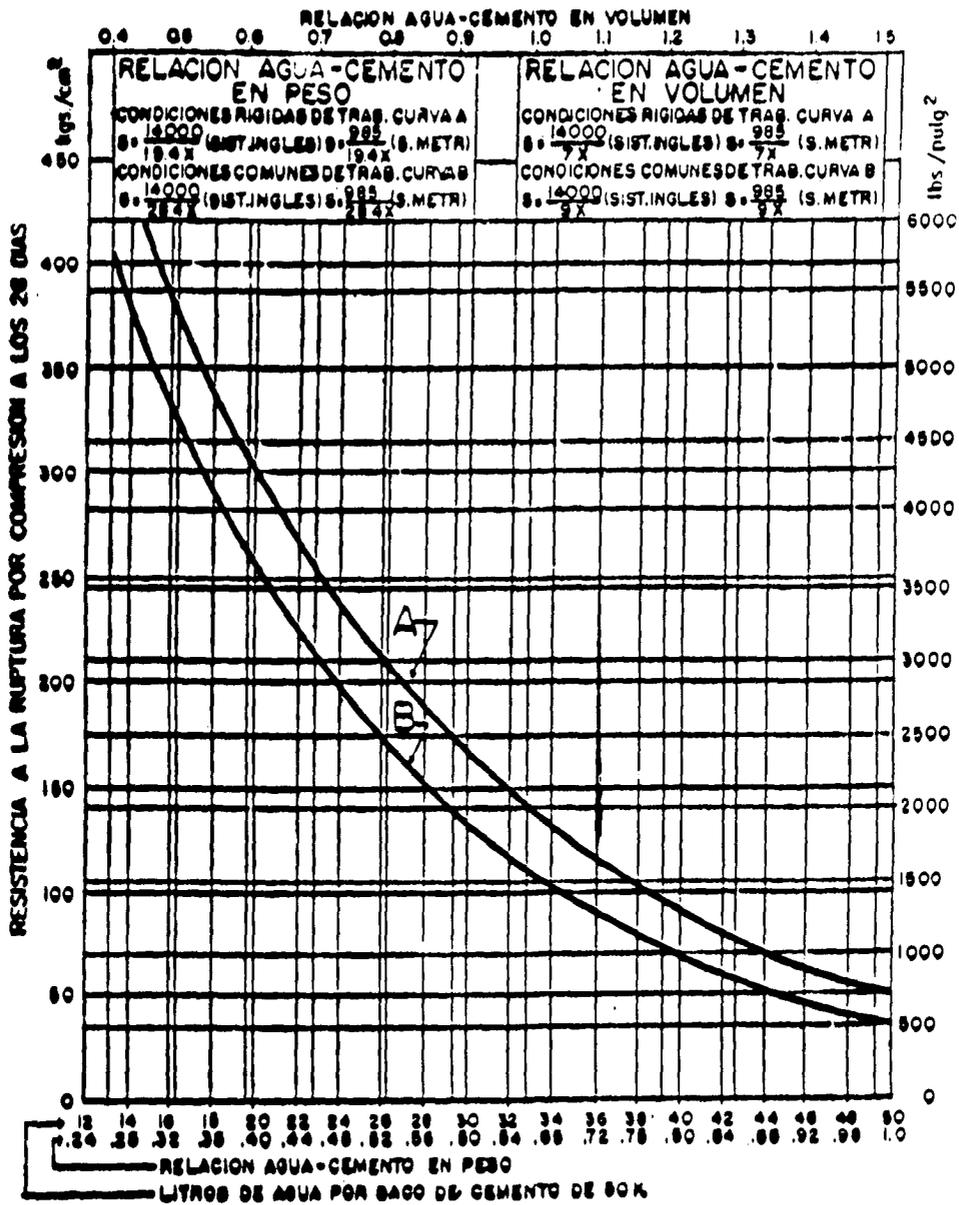


Figura II.9 Curvas de Abrams

11.4.3 Cálculo por volumen absoluto.

peso unitario es el peso de 1 metro cubico de un material,
 un metro cubico de agua son 1000 litros
 peso unitario del agua es 1000 kg en un metro cubico
 p.e. = peso específico relativo
 s.s.s. = saturado superficial seco

Ejercicio: calcular la cantidad de cemento, arena y grava para un metro cubico de concreto y que en 28 dias alcance una resistencia de 200 kg/cm² (fatiga de fractura) se selecciona el tamaño máximo del agregado que nunca debe ser mayor que la cuarta parte de la menor dimensión del molde, ni mayor que las tres cuartas partes del menor espacio libre entre refuerzos. El concreto fresco debe tener un revenimiento de 10 cm.

1er. paso:

Materiales	Peso específico	Peso volumétrico Kg/m ³
Cemento	3.10	1515
Arena	2.65	1521
Grava	2.65	1682

De la fig. 11.9 de Fatiga de Fractura para distintas relaciones a/c que para f'c = 200 kg/cm² la cantidad de agua es de 27 por saco de cemento litros para condiciones rígidas de trabajo.

Si se emplea la fórmula se tiene que:

$$A = \frac{33 (\log 980 - \log 200)}{\log 7} = \frac{33 (2.99 - 2.3)}{0.84} = \frac{33 \times 0.69}{0.84}$$

A = 27.10 litros por saco de cemento

Vol. absoluto = $\frac{\text{Peso del material}}{\text{p.e.} \times 1000 \text{ kg/m}^3}$ en el sistema MKS gravitacional

Componentes	Vol. (m ³)	Proporción	Rendimiento (m ³)
Cemento $\frac{1515 \text{ kg}}{3.10 \times 1000 \text{ kg/m}^3}$	= 0.48	x 1	= 0.48
Arena $\frac{1521 \text{ kg}}{2.65 \times 1000 \text{ kg/m}^3}$	= 0.574	x 2	= 1.15
Grava $\frac{1682 \text{ kg}}{2.65 \times 1000 \text{ kg/m}^3}$	= 0.635	x 4	= 2.54
Agua $\frac{1000 \text{ l}}{1 \times 1000 \text{ l/m}^3}$	= 1	x 1	= 1.00
		SUMA	= 5.17 m ³

este volumen resultante es el rendimiento y es función de la cantidad de huecos o vacíos que contengan los materiales

2do. paso

Se determina el factor de cemento para ello se necesita convertir en sacos de cemento el peso volumétrico del cemento, el cual se divide entre 50Kg (cantidad de cemento de una bolsa)

$$\frac{1515 \text{ Kg/m}^3}{50 \text{ Kg}} = 30.3 \text{ sacos de cemento} = 1\text{m}^3$$

$$\text{factor de cemento} = \frac{30.3}{5.17} = 5.85 \text{ sacos de cemento/m}^3$$

cantidad de agua necesaria para un metro cúbico es:

$$5.85 \times 27 \text{ litros/saco} = 158 \text{ litros de agua}$$

$$\text{volumen del cemento es } 5.85 \times 0.027 \times 0.48 = 0.076 \text{ m}^3$$

$$\text{cantidad de agua en m}^3 \text{ es } 158 / 1000 = 0.158 \text{ m}^3$$

$$\text{suma} = \underline{0.234 \text{ m}^3}$$

3er. paso

El volumen que ocupa la pasta de cemento en un metro cúbico de donde $1\text{m}^3 - 0.234 \text{ m}^3 = 0.766 \text{ m}^3$ que debe ser llenado por los agregados. Para nuestro ejemplo los dos materiales tienen el mismo peso específico 2.65 luego el peso de esta cantidad de material es:

$$V_{ab} = \frac{\text{Peso Mat.}}{\text{P.E.} \times 1000} \text{ por tanto } \text{Peso de material} = \underline{V_{ab} \times \text{P.E.} \times 1000}$$

peso del material (agregado) = $0.766 \times 2.65 \times 1000 = 2030 \text{ Kg}$. de la mezcla 1:2:4 por tener los agregados los mismos pesos específicos, la proporción será 1:6 se divide el peso anterior por 6 partes

$$\frac{2030 \text{ Kg}}{6} = 338 \text{ Kg}$$

$$\text{para la arena es } 338 \times 2 \text{ partes} = 676 \text{ Kg}$$

$$\text{para la grava es } 338 \times 4 \text{ partes} = 1352 \text{ Kg}$$

$$\Sigma = 2028 \text{ Kg} = 2030 \text{ Kg}$$

se agrega para completar el metro cúbico.

Por lo tanto para 1 m³ de concreto de 1:2:4 se necesitan

Cemento = 5.85 x 50	= 293 Kg
Arena	= 676 Kg
Grava	= 1352 kg
Agua (de hidratación y resistencia)	= 234 lts.

Comprobando el proporcionamiento

$\frac{293}{293} = 1$	$\frac{676}{293} = 2.3$	$\frac{1352}{293} = 4.6$
-----------------------	-------------------------	--------------------------

Porcentaje de arena empleado; si 2030 Kg total de agregado igual 100%, entonces 676 Kg. de arena le corresponde = x%

2030 = 100%	
676 = x%	$x = \frac{676}{2030} = 33.3\%$

que es la relación de arena/agregado.

Si hacemos otro ensayo aumentando la relación arena/agregado, aumentando arena para darle más trabajabilidad

Relación en peso : aumento en 36%
2030 kg por 36% de arena = 731 Kg de arena
luego total de agregado menos arena = grava
2030 - 731 = 1299 kg de grava
1299 + 731 = 2030 Kg total de agregado

se puede hacer también por volumen

0.766 m³ de agregado x 36% de arena = 0.276 m³ (Vab)

$$Vab = \frac{\text{Peso de material}}{P.E. \times 1000}$$

por tanto

Peso del material = Vab x P.E. X 1000

Peso de la arena = 0.276 x 2.65 x 1000 = 731.4 Kg

para la grava es = 0.766 m³ agregado menos 0.276m³ de arena
= 0.766 - 0.276 = 0.490m³

Peso de la grava = Vab x P.E. x 1000

Peso de la grava = 0.490 x 2.65 x 1000 = 1298.5 kg

Siendo la suma = 731.4 + 1298.5 = 2029.9 Kg = 2030 Kg

En el caso de que los pesos específicos relativos fueran diferentes los pesos se deben obtener por volumen.

Si el agregado grueso tiene un peso específico igual a 2.75 se tiene que:

$$1\text{m}^3 - 0.234\text{ m}^3 (\text{cemento} + \text{agua}) = 0.766\text{ m}^3 \text{ de agregado}$$

El rendimiento en peso debe mantenerse constante, si consideramos el 36% de arena de la segunda mezcla, en lugar del 33.3 % de la primera, se tiene :

$$0.766\text{ m}^3 \times 36\% \text{ de arena} = 0.276\text{ m}^3 \text{ de arena}$$

$$\text{Peso de la arena} = V_{ab} \times P.E. \times 1000$$

$$\text{Peso de la arena} = 0.276 \times 2.65 \times 1000 = 731.4\text{ Kg}$$

$$\text{Volumen de la grava es } 0.766 - 0.276 = 0.490\text{m}^3 \text{ de grava}$$

$$\text{Peso de la grava} = 0.490 \times 2.75 \times 1000 = 1347.5\text{ Kg}$$

Comprobando resultados, con la grava de P.E. = 2.65 se obtuvo 1298.5 Kg y con la grava de P.E. = 2.75 se necesitan 1347.5 Kg para mantener el rendimiento.

Si al concreto se le agrega un aditivo como agente inclusor de aire de nuestro ejemplo anterior manteniendo, un factor constante de cemento, agua y agregado, la emulsión de un 5% de aire en el diseño, se tiene en igual forma sin repetir los dos primeros pasos :

cantidades en volúmenes:

cemento	5.85 x 0.027 x 0.48	= 0.076 m ³
agua	193 litros / 1000	= 0.193 m ³
aire	5%	= 0.050 m ³
	suma	= 0.319 m ³

$$1 - 0.319 = 0.681\text{ m}^3 \text{ de agregado}$$

Los agregados de igual P.E. = 2.65

Relacion de arena/grava 33.3%

$$\text{Cantidad de arena } 0.681\text{ m}^3 \times 33.3\% = 0.226\text{m}^3$$

$$\text{Cantidad de grava } 0.681\text{ m}^3 - 0.226\text{ m}^3 = 0.455\text{ m}^3$$

$$\text{Peso de la arena} = 0.226 \times 2.65 \times 1000 = 601.5$$

$$\text{Peso de la grava} = 0.454 \times 2.65 \times 1000 = 1203.0\text{ Kg}$$

Si el agregado fuera piedra triturada con un peso específico mayor, se le tendría que aumentar a la mezcla un 3% de arena de

acuerdo a la tabla de agregados, procediendo de igual forma que en el ejemplo anterior.

Las mezclas de los ejemplos anteriores son mezclas de pruebas, por lo que hay que hacer ajustes a los valores obtenidos, ya que el concreto con aire requiere menor porcentaje de arena que las mezclas sin inductor de aire y se mejora la trabajabilidad. Los inductores de aire en el concreto reducen la resistencia a la compresión a los 28 días, a no ser que se aumente el factor de cemento para compensar. Esto no es práctico cuando se utiliza concreto pobre.

Si se quiere ajustar la reducción de resistencia debido al inductor de aire, hay que considerar la adición de un reductor de agua en la mezcla, en lugar de incrementar el factor cemento. Un alto contenido de cemento, no es garantía para una calidad elevada. Especialmente en climas calientes, se generan problemas que no lo presentan la mezclas pobres, como la durabilidad, como la trabajabilidad, por lo que es muy conveniente el reductor de agua.

Por experiencia en campo cuando se agrega el inductor de aire se debe reducir un litro de agua y 2.6 kg de arena por saco de cemento por un porcentaje de aire incluido.

CAPITULO III

PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DEL CONCRETO

III.1 DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO

El propósito de diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Para lograr tal propósito, una mezcla de concreto bien proporcionada deberá poseer las siguientes propiedades:

- a) En concreto fresco, trabajabilidad aceptable.
- b) En concreto endurecido, resistencia y durabilidad.
- c) Economía.

El comprender los principios básicos del diseño de mezclas es tan importante como la realización de los cálculos mismos. Solamente con una selección adecuada de los materiales y las características de la mezcla, así como con un proporcionamiento adecuado se pueden obtener las propiedades anteriores al elaborar un concreto.

Primero se seleccionan sus características en base al uso que se le quiera dar al concreto, a las condiciones de exposición, al tamaño y forma de los elementos y a las propiedades físicas del concreto, que se requieran para la estructura. En seguida se puede proporcionar una mezcla a partir de datos de laboratorio o de campo. La mayor parte de las propiedades que se buscan obtener en el concreto endurecido, dependen principalmente de la calidad de la pasta de cemento, y para proporcionar una mezcla de concreto es la relación agua-cemento acorde con la durabilidad y resistencia que se requiere.

III.1.1 Relación Agua-Cemento.

La relación agua-cemento es el peso del agua, dividido entre el peso del cemento. La relación agua-cemento que se elija para el diseño de una mezcla, debe ser el menor valor requerido para cubrir las consideraciones de exposición de diseño.

Si la durabilidad no es el factor que rija en el diseño, la relación agua-cemento deberá elegirse con base en la resistencia a la compresión del concreto. En tal caso la relación agua-cemento y las proporciones de la mezcla para la resistencia requerida deberán basarse en datos de campo o pruebas de mezclas hechas con los materiales con los que se va a trabajar.

III.1.2 Resistencia

La resistencia a la compresión especificada a los 28 días, $f'c$, para una clase individual de concreto, es la resistencia que se espera sea igualada o sobrepasada por el promedio de cualquier conjunto de tres ensayos de resistencia consecutivos, sin que ningún ensayo individual (promedio de dos cilindros) quede debajo de más de 35 kg/cm^2 de la resistencia especificada cuando los especímenes hayan sido curados en condiciones de laboratorio.

La resistencia promedio debe igualar a la resistencia especificada más una tolerancia que responde a las variaciones en los materiales; a las variaciones en los métodos de mezclado, transporte y colocación del concreto, y a las variaciones de la elaboración, curado y ensayo de los especímenes cilíndricos de concreto. La resistencia promedio, misma que es mayor que $f'c$ se denomina $f'cr$, y es la resistencia que se requiere para el diseño de la mezcla.

III.1.3 Agregados.

Así se designa a los materiales que se mezclan con el cemento y el agua para obtener el concreto, siendo estos materiales de dos clases: finos y gruesos; denominando el fino a la arena y el grueso a la grava.

Se ha considerado a estos materiales como inertes, pero estudios recientes al nivel de gel demuestran que los agregados no son realmente inertes y sus propiedades físicas, térmicas y a veces químicas, influyen en el comportamiento del concreto.

El Concreto es considerado como piedra artificial con un control en sus componentes y con la idea de ser un producto más económico por sus agregados, que el uso nada más del cemento, de ahí que se exija una excelente calidad de dichos agregados para darie también una ventaja técnica, de mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad. Podemos decir que los agregados inertes forman el "esqueleto" del concreto.

Las porciones en que se mezclan los distintos componentes, varían de acuerdo con la granulometría de los agregados y con la resistencia final deseada. La proporción en por ciento de volumen nos da una idea aproximada de esta mezcla.

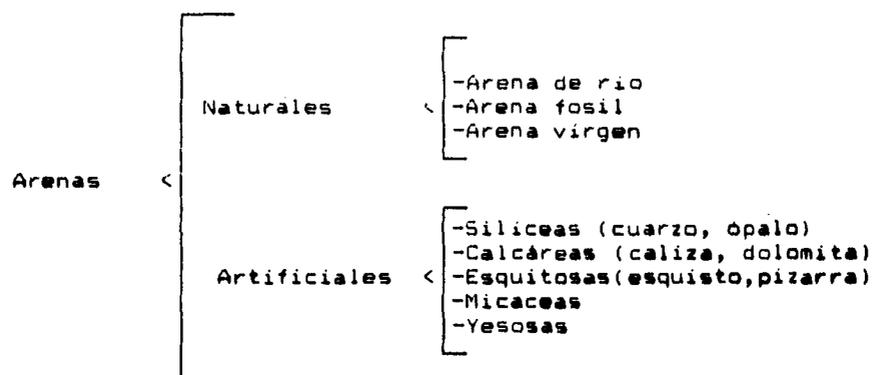
Agregados	75%
Cemento	10%
Agua	15%

lo que indica que las tres cuartas partes del volumen de concreto, está ocupada por los agregados, lo que hace económico el concreto en relación al cemento.

Arena

Es el elemento de mayor importancia y que más influencia tiene en la calidad del concreto, la podemos definir como un conjunto de granos o partículas de piedra dura, limpia de arcilla, barro o materia orgánica.

La arena, para un mejor estudio la podemos clasificar en las siguientes clases: Naturales y Artificiales



Arena de río

Dependiendo de la localización, las arenas de río, presentan el problema de sales nocivas (salitres) que atacan al cemento y al hierro.

Arenas de mar

Presentan el mismo problema, también se han creado debates. Francia hizo estudios con arenas de mar y sus conclusiones fueron las siguientes: La resistencia por flexión bajo en 1%, a la compresión se redujo del 10% al 20%, que era poca la acción de las sales nocivas de arena, que la eflorescencia no era debida a la arena sino al sulfato de sodio del cemento y que dichas arenas se pueden usar previo un lavado con agua dulce.

Consideramos que el empleo de la arena de mar, depende del tipo de cemento, tipo de grava y agua, para que cumpla el concreto así elaborado con la calidad especificada.

Arenas Fósiles

Se encuentran depositadas en los más diversos lugares, habiendo sufrido un transporte con anterioridad al período geológico actual; están libres de arenas nocivas y sus granos tienen forma más angular que las de río y mar por lo que son más aceptadas.

Arenas Virgenes

Proceden de la desintegración de rocas que están en disgregación por intemperismo o acción química, sus granos son irregulares, asperos y angulosos, deben ser lavadas por contener materia orgánica.

Arenas de Cuarzo

Son arenas de canteras, producidas por trituración de rocas silíceas casi puras; tienen granos duros e inalterables, exentas de polvo en el proceso de cribado y selección.

Arenas Calcáreas

Poseen buena adherencia, útiles si sus granos no son muy blandos. Deben evitarse para los trabajos que son expuestos a emanaciones ácidas.

Clasificación de arenas.

En forma artificial se hace esta clasificación con la finalidad de entender mejor de propiedades físicas y químicas.

Se designa como granulometría a la distribución de las partículas según el tamaño de acuerdo a los anchos de mallas del tamiz que las selecciona.

Hasta 0.06 mm polvo (limo, arcilla)
de 0.06 a 2 mm Arena fina
de 2 a 5 mm Arena gruesa

La arena óptima es la combinada en dos rangos de tamaño dadas en porcentaje:

65% de arena fina
25% de arena gruesa

con un volumen de vacíos aproximado entre 36 y 38%. Su peso específico de 1450 kg/m³, ya que en estado seco los granos se acomodan mejor, disminuyendo así el volumen de vacíos. La arena con agua llega a 2000 kg/m³.

Los requisitos para una buena arena son los siguientes:

- I. Limpia de materias arcillosas y orgánicas
- II. Los granos, cualquiera que sea su tamaño, no deben tener un grueso uniforme, con lo que se pueden evitar huecos y así disminuir el índice de vacíos.
- III. Son preferibles las arenas de grano angular a las de grano redondeado por su mejor asentamiento, aunque presentan más huecos que las redondas.
- IV. Son preferibles arenas de grano grueso a las de grano fino

Nota: Consultar tecnología del concreto del Dr. A. M. Neville.

Textura

La textura superficial se basa en el grado de pulimentación, suavidad o aspereza de la partícula.

La textura superficial, depende de la dureza, tamaño del grano, características del poro.

Hasta el momento la función de la textura y forma de los granos, no está bien definida para la influencia en el desarrollo de la resistencia del concreto. Feret, en sus estudios clasificó las arenas también de acuerdo al tamaño de sus granos y al tamiz por el que pasan. Le llama gruesas a las que pasan por el tamiz de 5 mm de abertura y son retenidas por el de 2 mm. Medianas si pasan por el tamiz de 2 mm y son retenidas por el de 0.5 mm y finas las que pasan por el tamiz de 0.5 mm y son retenidas por el de 0.02 mm.

La arena óptima es aquella en cuya composición se combinan granos finos, medianos y gruesos para dar mayor capacidad del conjunto; es decir, cuando los granos finos llenan los vacíos de los granos medianos y ambos llenan los vacíos de los granos gruesos.

Feret con su clasificación llama G al grano Grueso, M al grano Mediano y F al grano Fino e ingeniosamente se vale de un diagrama triangular de un equilátero y cuyos vértices los designa con las letras G, F y M. Los lados del triángulo los divide en 10 partes iguales que representan los porcentajes y traza paralelos a los respectivos lados de dicho triángulo graduando estas divisiones del 0 al 1, correspondientes a los vértices el cero de las escalas a partir del vértice F en sentido contrario a las manecillas del reloj. En esta forma cualquier punto, localizado en el perímetro o en el interior del área del triángulo nos da los porcentajes de cada tipo de grano que miden la composición granulométrica de la arena.

Las magnitudes proporcionales que se leen en cada lado del triángulo, corresponden a las magnitudes reales medidas sobre las normales a los lados opuestos a los vértices.

Por ejemplo:

Sea un punto cualquiera como el "A" se traza a partir de A la normal al lado MF que lo corta en el punto C, se mide el segmento AC en la escala de los lados, da una lectura aproximada de 26%, como la normal se trazo al lado MF opuesto al vértice G el porcentaje corresponde a gruesos o sea 26% de granos gruesos. Del punto A se traza la normal al lado MG que lo corta dando el punto D se mide el segmento AD normal al lado MG opuesto al vértice F por lo tanto corresponde a 26% de granos finos, se repite lo mismo para el lado GF se mide la normal a dicho lado que es opuesta al vértice M y el porcentaje es 46% de grano medio. Si no hay normal que medir, el porcentaje es 0 para el vértice a dicho lado opuesto, ver figura III.1.

En forma parecida obtiene la compacidad uniendo puntos de igual característica que dan curvas parecidas a las curvas de nivel, ver figura III.2.

Para la finalidad que se requiera, son importantes estos estudios, si se requiere de máxima resistencia e impermeabilidad, es necesario que el agregado presente la máxima compacidad o sea el mínimo por ciento de vacíos.

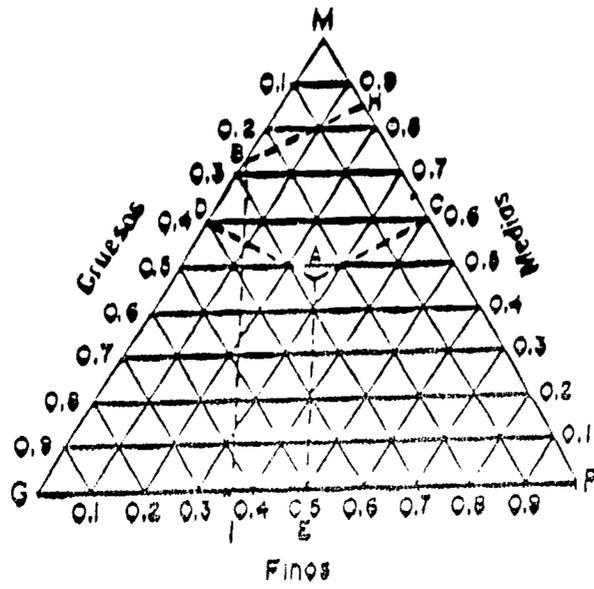


Figura III.1 Diagrama Triangular de Feret.

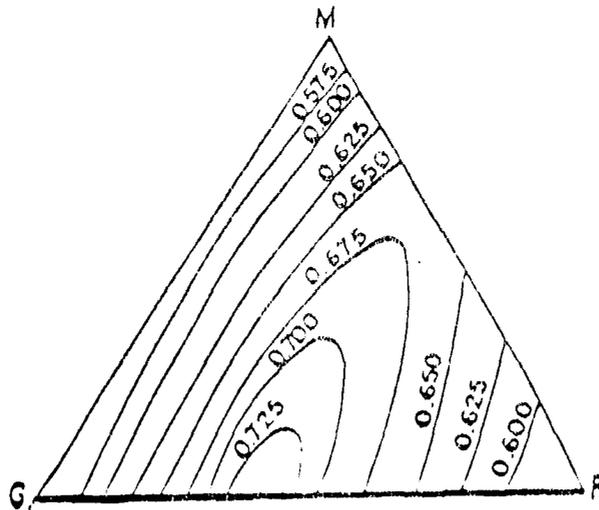


Figura III.2 Curvas de compacidad.

Si se busca una mayor resistencia, el cementante debe de cubrir la superficie de contacto de las partículas del agregado. Se ha establecido que la forma esférica de los granos, proporciona más manejabilidad y economía, a la de los granos alargados, sin embargo debe de evitarse una granulación escalonada, ya que la adherencia y el módulo de finura, juegan un papel muy importante en el concreto, la tabla III.1 indica una prueba común de granulometría de las arenas.

Tabla III.1

TAMAÑO DE MALLA	AGREGADO RETENIDO EN GRS.	AGREGADO RETENIDO EN %	AGREGADO QUE PASA EN %	LIMITE DE ESPECIFICACIONES EN %
No. 4	0	0	100	95 - 100
No. 8	80	14	86	80 - 100
No. 16	207	36	64	50 - 85
No. 30	320	56	44	25 - 60
No. 50	438	76	24	10 - 0
No. 100	533	93	7	2 - 10
Charola	574			

Módulo de finura de las arenas.

El módulo de finura (MF) es un indicador aproximadamente proporcional al tamaño promedio de las partículas de agregado en prueba y confiable si se ajusta a especificaciones granulométricas.

De la tabla anterior se obtiene el módulo de finura de la siguiente manera, la primera columna indica el juego de tamices de la abertura más grande, que es el tamiz No.4 a la malla más cerrada que es la charola.

La segunda columna nos indica la cantidad en gramos que queda en cada tamiz de una muestra de arena.

La tercera columna se obtiene dividiendo los gramos retenidos en cada tamiz entre los gramos retenidos en la charola.

$$\frac{80}{574} = 0.139 = 14\%$$

$$\frac{207}{574} = 0.36 = 36\%$$

$$\text{hasta } \frac{533}{574} = 0.928 = 93\%$$

ya no se indica el de charola que es 100.

Se suman estos porcentajes, $\Sigma 14 + 36 + 56 + 76 + 93 = 275$
El modulo de finura es MF = $\frac{275}{100} = 2.75$

Que es lo mismo si la suma se hubiera hecho en decimales. Indicaremos que el tamiz No. 4, segun la ASTM, establece la división entre los agregados gruesos y los finos, es decir que los agregados que quedan en el tamiz No.4 son agregados gruesos y los que pasan son agregados finos (arenas).

La cuarta columna es el ajuste a 100 de la columna 3, es decir:

$100 - 0 = 100$, $100 - 14 = 86$, $100 - 36 = 64$ etc.
18

En la quinta columna se indica los limites especificados de la col. 4

Los resultados de un análisis granulométrico se visualizan mejor representados en una gráfica, en donde se ve si la muestra es demasiado gruesa o fina.

En la gráfica el eje abscisas representa la serie de tamices para nuestro ejemplo. se inicia de la charola hasta la última división que es el tamiz No.4, señalados en forma logaritmica por la relación 1/2 que existe entre los tamices, es muy ilustrativo el seleccionar la escala en que las separaciones entre dos tamices consecutivos sea aproximadamente correspondiente al 20% de la escala de las ordenadas. Como se indica en la **figura III.3.**

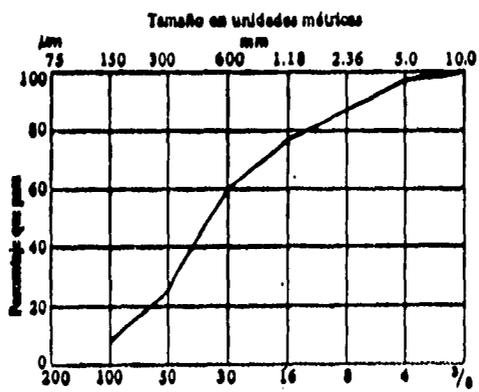


Figura III.3 Curva granulométrica.

La arena gruesa cuyo modulo de finura es mayor de 3 es ya aceptable en mezclas ricas en cemento, pero si la mezcla es pobre en cemento esta no se debe aceptar. Mientras más bajo es el modulo de finura, mas fina es la arena.

Indicaremos otro ejemplo de análisis granulométrico diferente al anterior en el cálculo del módulo de finura. En el siguiente ejemplo, las cantidades en peso de los agregados retenidos son mucho menores y el procedimiento numérico es parecido al de obtener la ojiva en estadística.

TAMAÑO DE MALLA EN GRs.	AGREGADO RETENIDO EN GRs.	AGREGADO RETENIDO EN %	AGREGADO QUE PASA EN %	AGREGADO RETENIDO ACUMULADO EN %
No. 4 5.00 mm	6	2.0	98	2
No. 8 2.36 mm	31	10.1	88	12
No. 16 1.18 mm	30	9.8	78	22
No. 30 0.60 mm	59	19.2	59	41
No. 50 0.30 mm	107	34.9	24	76
No. 100 0.15 mm	53	17.3	7	93
Charola 0.75 mm	21	6.8		

Primera columna tamices clasificación ASTM, segunda columna peso en gramos de agregado que queda retenido en cada tamiz de una muestra de arena determinada cuya suma es:

$$\Sigma 6 + 31 + 30 + 59 + 107 + 53 + 21 = 307$$

La tercera columna porcentaje retenido que se obtuvo dividiendo cada peso en gramos retenidos por cada tamiz con la suma total de ellos

$$\frac{6}{307} = 0.0195 = 0.02 = 2\%$$

$$\frac{31}{307} = 0.1009 = 0.1010 = 10.1\%$$

$$\frac{30}{307} = 0.0977 = 0.098 = 9.8\%$$

Así sucesivamente hasta obtener $\frac{21}{307} = 0.068 = 6.8\%$

La cuarta columna se obtiene restando de 100% el porcentaje obtenido en la tercer columna y efectuando sucesivas restas.

$$100 - 2 = 98 ; 98 - 10.1 = 87.9 = 88$$

$$87.9 - 9.8 = 78.1 = 78$$

$$78.1 - 19.2 = 58.9 = 59$$

$$58.9 - 34.9 = 24$$

$$24 - 17.3 = 6.7 = 7 ; 6.7 - 7 = 0.3 = 0$$

Para la quinta columna se resta de 100% cada uno de los valores obtenidos de la cuarta columna así:

$100-98=02$	$100-59=41$
$100-88=12$	$100-24=76$
$100-78=22$	$100-7=93$

Para calcular el modulo de finura sumamos los valores de la quinta columna $\Sigma 2+12+22+41+76+93=246$

$$M.F = \frac{246}{100} = 2.46$$

Contenido de humedad de la arena.

En general, por la lluvia o por lo lavado, la arena conserva un mayor grado de humedad en la superficie de la partícula. La humedad superficial o libre (capa de agua que envuelve a la partícula), cuando la partícula tiene sus poros llenos de agua se dice que está en estado saturado y superficialmente seca. Por la cantidad de finos que tiene la arena, cada partícula crea un área superficial mayor y también un mayor número de cavidades para retener humedad.

La absorción representa el contenido de agua de la partícula en su estado saturado y superficialmente seco (S.S.S.). El contenido de humedad es el agua superficial o libre. El contenido de humedad se expresa como un porcentaje del peso del agregado saturado y superficialmente seco si una muestra de agregado en estado saturado y parcialmente seco se calienta en un horno durante 24 horas para secarlo, entonces se dice que el agregado está seco. El porcentaje de absorción es la cantidad de agua que adquiere de su estado seco hasta el estado saturado y superficialmente seco, ver **figura III.4.**

La cuarta columna se obtiene restando de 100% el porcentaje obtenido en la tercer columna y efectuando sucesivas restas.

$$100 - 2 = 98 ; 98 - 10.1 = 87.9 = 88$$

$$87.9 - 9.8 = 78.1 = 78$$

$$78.1 - 19.2 = 58.9 = 59$$

$$58.9 - 34.9 = 24$$

$$24 - 17.3 = 6.7 = 7 ; 6.7 - 7 = 0.3 = 0$$

Para la quinta columna se resta de 100% cada uno de los valores obtenidos de la cuarta columna así:

$$100-98=02$$

$$100-59=41$$

$$100-88=12$$

$$100-24=76$$

$$100-78=22$$

$$100-7=93$$

Para calcular el módulo de finura sumamos los valores de la quinta columna $\Sigma 2+12+22+41+76+93=246$

$$M.F.=\frac{246}{100}=2.46$$

$$100$$

Contenido de humedad de la arena.

En general, por la lluvia o por lo lavado, la arena conserva un mayor grado de humedad en la superficie de la partícula. La humedad superficial o libre (capa de agua que envuelve a la partícula), cuando la partícula tiene sus poros llenos de agua se dice que está en estado saturado y superficialmente seca. Por la cantidad de finos que tiene la arena, cada partícula crea un área superficial mayor y también un mayor número de cavidades para retener humedad.

La absorción representa el contenido de agua de la partícula en su estado saturado y superficialmente seco (S.S.S.). El contenido de humedad es el agua superficial o libre. El contenido de humedad se expresa como un porcentaje del peso del agregado saturado y superficialmente seco si una muestra de agregado en estado saturado y parcialmente seco se calienta en un horno durante 24 horas para secarlo, entonces se dice que el agregado está seco. El porcentaje de absorción es la cantidad de agua que adquiere de su estado seco hasta el estado saturado y superficialmente seco, ver **figura III.4.**



Figura III.4 Porcentaje de absorción.

La presencia de la humedad en la arena hace necesario corregir las proporciones reales de la mezcla, ya que el contenido de humedad de la arena fluctúa entre el 1% y 10%. Hay que cuidar la relación agua-cemento. El peso del agua utilizada en la proporción de la mezcla tiene que reducirse en la proporción del peso de la humedad superficial del agregado.

Abundamiento de la arena.

El abundamiento es el aumento del volumen de determinado peso de la arena, causado por la presión del agua superficial. Al hacer la mezcla por volumen, el abundamiento reduce el peso de la arena que ocupa el volumen fijo, por lo que la mezcla resulta deficiente en arena. Si la humedad superficial se eleva entre el 5 y el 8%, el abundamiento puede ser de entre un 20 y 30%. De aquí la baja del volumen de la arena.

Grava

Se llama grava al material retenido en el tamiz No. 4, cuyo diámetro es mayor de 5 mm.

Confitillo de 6 mm. (1/4") hasta 38 mm. (1 1/2")
 Grava de 38 mm. (1 1/2") hasta 89 mm. (3 1/2")
 Matatena de 89 mm. (3 1/2") hasta 152 mm. (6")

Otra clasificación es:

Garbancillo de 7 mm. hasta 25 mm.
 Gravilla de 25 mm. hasta 40 mm.
 Grava de 40 mm. hasta 80 mm.

La norma ASTM C-33 establece los requisitos de calidad. La dimensión nominal máxima de los agregados gruesos no debe ser mayor de una quinta parte de las dimensiones más angostas de la cimbra, de una tercera parte del peralte de la losa o de las tres cuartas partes de la separación mínima entre las varillas de refuerzo. Es importante la experiencia del ingeniero en modificar limitaciones. No se altera la trabajabilidad y una buena compactación y resistencia.

Tamaño y forma.

Ya se indicó que el tamaño de la grava depende del tipo de obra para cumplir especificaciones y criterios.

Experimentalmente se ha comprobado que la masa de agregado grueso que presenta mayor compacidad, resistencia y plasticidades es la que está constituida por partículas de forma más esférica. Los agregados angulosos disminuyen la trabajabilidad de la mezcla y pueden afectar la durabilidad del concreto. Tanto la textura y forma como indicamos aún no está determinada su función en el desarrollo de resistencia del concreto. Sin embargo, la mayor área superficial del agregado angular hace que se logre una fuerza mayor de adherencia, lo que favorece la resistencia a la flexión. Una superficie más áspera, da como resultado una mejor adherencia. La textura que no permite la penetración de las partículas del cemento por la superficie no produce una buena resistencia. Además hay propiedades físicas y químicas de los agregados que también afectan la adherencia.

Preparación del agregado.

Así se indica a los procesos que se efectúan en forma física al agregado como son: el cribado para obtener sus distintos gruesos, lavado para eliminar las sales, arcillas y sustancias extrañas, e inclusive el secado si es necesario. Los agregados gruesos deben satisfacer las condiciones de dureza, estabilidad, resistencia, etc. sujetos a una serie de pruebas: peso específico y peso volumétrico, absorción, humedad, prueba de polvos, pruebas colorimétricas y determinación de sales.

$$\text{Peso Específico o Densidad de Peso} = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen absoluto}}$$

Volumen absoluto es el ocupado por la materia= V_{ab}
Volumen aparente dado por las dimensiones del cuerpo= V_a
Volumen de huecos o vacíos= V_h

Para absorción

Pa=Peso de la muestra seca

Ps=Peso de la muestra saturada y superficialmente seca

$$\% \text{ de absorción} = \frac{Ps - Pa}{Pa} \times 100$$

A menor porcentaje de absorción se garantiza mayor seguridad, mejor control de agua en la dosificación y más resistencia en el concreto.

$$\% \text{ de huecos} = \frac{Va - Vab}{Va} \quad ; \quad \% \text{ de hueco} = 1 - \frac{Vab}{Va}$$

Empleando el peso específico y volumétrico el porcentaje de huecos o vacíos se obtiene:

$$\% \text{ de vacíos} = 1 - \frac{\text{Peso Volumétrico}}{\text{Peso Específico} \times 1000} \quad \text{en el sistema MKS}$$

Peso volumétrico del agua 1000 kg/m³

El peso volumétrico se utiliza para estimar el peso medio por unidad de volumen de los materiales que integran un conjunto estructural.

La humedad en el agregado grueso prácticamente es tan poca que no se toma en cuenta. La prueba de polvo y la colorimétrica son más indicadas en el agregado fino que en el grueso.

$$\text{Volumen aparente} = \frac{\text{Peso del Material}}{\text{Peso volumétrico del material}}$$

$$\text{Volumen absoluto} = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Peso específico de materia} \times \text{peso específico del agua}}$$

$$Vab = \frac{W \text{ del Mat.}}{P.E. \times 1000}$$

El concreto desde sus inicios se basó en la hipótesis única de mezclas compactas, es decir mezclas en donde los huecos del agregado grueso se llenaran con arena y los huecos dejados por la arena y la grava fueran llenados por el cemento, lo que daba lugar a una serie de mezclas arbitrarias en las cuales se expresaba la relación de los ingredientes por medio de una

proporción de cemento, arena y grava en volúmenes, luego la calidad del concreto estaba dada por la compactación y cantidades de material, pero de resistencia deficiente y olvidándose de su plasticidad o sea el agua necesaria para hidratar a los constituyentes del cemento y dar manejabilidad a la masa. Las experiencias de los constructores era que sus resultados variaban en cuanto a resistencia, para una proporción igual de agregado y una misma cantidad de cemento, dando lugar a una serie de criterios y teorías.

Nota: Woods en 1968 estableció que las reacciones químicas de los agregados en el concreto pueden ser benéficas o causar daños serios como la expansión normal, agrietamiento y pérdida de resistencia.

Existen dos características en los agregados que tienen una importante influencia sobre el proporcionamiento de las mezclas de concreto, porque afectan la trabajabilidad del concreto fresco.

- a) La granulometría (tamaño de partícula y distribución).
- b) La naturaleza de las partículas (forma, porosidad, textura superficial).

La granulometría es importante para lograr una mezcla económica, porque afecta a la cantidad de concreto que puede fabricarse con una cantidad determinada de cemento y agua. Los agregados gruesos deberán llegar al máximo tamaño práctico en las condiciones de trabajo. El tamaño máximo que se pueda usar depende del tamaño y forma del elemento de concreto que se vaya a colocar y de la cantidad y distribución del acero de refuerzo en el mismo.

El tamaño máximo del agregado grueso no debe exceder una quinta de la menor dimensión entre los lados de la cimbra, ni tres cuartos de la distancia libre entre la varilla o cables de refuerzo individuales, paquetes de varillas o ductos o tendones de refuerzo. Para las losas de pavimento sin refuerzo el tamaño máximo no debe rebasar un tercio del espesor de la losa. Se pueden usar tamaños menores cuando así lo requiera la disponibilidad o alguna consideración económica.

También es una buena práctica limitar el tamaño de agregado a no más de tres cuartos de la distancia libre entre el refuerzo y las cimbras.

La cantidad de agua de mezclado que se requiera para producir un metro cúbico de concreto con un revenimiento dado depende del tamaño máximo, forma y cantidad de agregado grueso. Los tamaños menores minimizan el requisito de agua por lo tanto permite que el contenido de agua se reduzca. También un agregado redondeado requiere de menos agua que un agregado triturado en

concreto de igual revenimiento. Para un contenido de cemento dado, el tamaño máximo de agregado grueso que produciría un concreto de máxima resistencia a la compresión (de 420 kg/cm² en adelante), con un contenido de cemento que rebasa a los 350 kg por metro cúbico el tamaño máximo óptimo es de aproximadamente 19 mm. La granulometría más deseada para agregado fino dependerá del tipo de obra, de la riqueza de la mezcla y el tamaño del agregado grueso. En las mezclas pobres, se espera una granulometría más fina (menor módulo de finura) para cumplir con la trabajabilidad. En las mezclas más ricas se utiliza una granulometría más gruesa (mayor módulo de finura), para tener mayor economía.

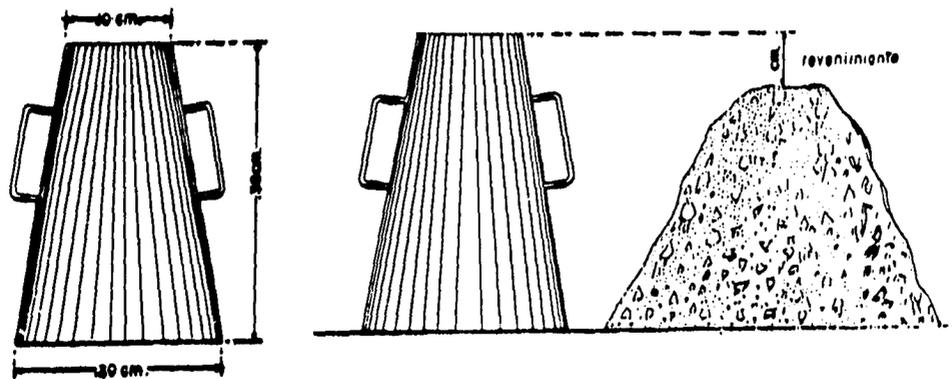
Revenimiento. El concreto debe ser fabricado para tener una trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas a las condiciones de trabajo.

La trabajabilidad es una medida de lo fácil o lo difícil que resulta colocar, consolidar y dar acabado al concreto.

La consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir.

La plasticidad determina la facilidad de moldear el concreto.

Si se usa más agregado con una mezcla de concreto o si se agrega menos agua, la mezcla se vuelve más rígida (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldear. No se puede considerar plástica a las mezclas muy secas o muy desmoronables ni a las muy aguadas o fluidas. La prueba de revenimiento es una medida de la consistencia del concreto. Para determinar proporciones de cemento y agregado sin aditivos entre más alto es el revenimiento es un indicador de trabajabilidad cuando se evalúan mezclas similares. Sin embargo, no debe usarse para comparar mezclas de proporciones totalmente distintas. Un cambio de revenimiento en las diferentes mezclas de la misma proporción, indican un cambio en la consistencia y en las características de los materiales en las proporciones de la mezcla o en el contenido de agua. Se requieren distintos revenimientos para los diferentes tipos de construcción con concreto. Usualmente se indica el revenimiento en las especificaciones de obras como rango de cinco a diez centímetros, en la figura III.5 se indican los revenimientos más usuales.



LOS REVENIMIENTOS MAS USUALES SEGUN LA CLASE DE OBRA A QUE SE DESTINA EL CONCRETO SON :

Clase de estructura	Revenimiento en cm.			
	Fluidez de la mezcla	Mínimo	Máximo	Promedio
Presas, pilas de puentes, cimientos, rellenos, pavimentos.	Seca	0	8	4
Losas y trabes; muros gruesos.	Plástica	8	12	10
Columnas y muros; piezas de pequeñas dimensiones con gran cantidad de refuerzo.	Fluide	10	20	15

Figura III.5 Revenimientos.

III.1.4 Contenido de agua.

El contenido de agua del concreto puede ser alterado por un gran número de factores: Tamaño y forma del agregado, revenimiento, relación agua-cemento, contenido de aire, contenido de cemento, aditivos y condiciones ambientales. Un mayor contenido de aire y tamaño de agregados, una reducción agua-cemento, y en el revenimiento los agregados redondeados, y el uso de aditivos reductores de agua ó de ceniza volante disminuyen la demanda de agua. Por otra parte los aumentos de temperatura, en los contenidos de cemento, de revenimiento en la relación agua-cemento, de la angularidad de los agregados, así como la disminución en la proporción de agregado grueso a fino elevan la demanda de agua.

III.1.5 Contenido de cemento.

El contenido de cemento se determina usualmente a partir de la relación agua-cemento y del contenido de agua elegidos, aunque frecuentemente se incluyen en las especificaciones un contenido mínimo de cemento, además de una relación de agua-cemento máxima, además, los requisitos y acabados satisfactorios, una mayor resistencia al desgaste en las losas, y una apariencia apropiada de las superficies verticales. Esto es importante a pesar de que los requisitos de resistencia se satisfagan con menos contenido de cemento.

Para las exposiciones severas a la congelación-deshielo, productos descongelantes y sulfatos es adecuado especificar un contenido mínimo de cemento de 335 kg. por metro cúbico de concreto y sólo la suficiente agua de mezclado para alcanzar la consistencia deseada sin exceder las relaciones agua-cemento máximas. Para colocar cemento bajo el agua, normalmente se deben usar no menos de 385 kg. de cemento por metro cúbico de concreto.

Para evitar problemas de colocación, acabados, resistencia a la abrasión, y durabilidad en los trabajos en obra, la cantidad de cemento a usar no deberá ser menor que la que muestra la **tabla III.2.**

Para lograr una mayor economía, el proporcionamiento deberá ser tal que el consumo requerido de cemento sea mínimo sin que se llegue a sacrificar la calidad del concreto. Como la calidad depende principalmente de la relación agua-cemento, se debe mantener en un mínimo el contenido de agua para reducir la demanda de cemento. Entre las medidas para minimizar la demanda de agua y cemento se incluye el uso de:

- a) La mezcla más áspera que sea práctica para usar.
- b) El tamaño máximo de agregado que sea posible usar.
- c) La relación óptima de agregado fino a grueso.

Tabla III.2 Requisitos mínimos de cemento para concretos de peso normal empleados en obra.

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO		CEMENTO, KG/M ³
MM.	PULG.	
38.1	1 1/2"	279
25.4	1"	309
19.0	3/4"	320
12.7	1/2"	350
9.5	3/8"	362



III.2 PROPORCIONAMIENTO.

Los metodos han evolucionado desde el arbitrario método volumétrico (1:2:3, cemento : arena : agregado grueso), hasta los métodos actuales de peso y de volumen absoluto descritos en la práctica estándar para el proporcionamiento de mezclas de concreto.

Los metodos de proporcionamiento por peso son muy simples y rápidos para estimar las proporciones de las mezclas utilizando un peso supuesto o conocido del concreto por unidad de volumen. Un método más exacto, el del volumen absoluto involucra el uso de los valores de la densidad de todos los ingredientes para calcular el volumen que cada ingrediente ocupara en la unidad de volumen de concreto. Una mezcla de concreto se puede proporcionar a partir de experiencias de campo (datos estadísticos o de mezclas de prueba de concreto).

III.2.1 A partir de datos de campo.

Cualquier diseño de mezclas que se encuentren en uso o que haya sido usado previamente, podrá ser empleado en un nuevo proyecto, si los datos de los ensayos de resistencia y desviación estándar demuestran que las mezclas son aceptables. También se deben satisfacer los aspectos referentes a la durabilidad.

Los datos estadísticos deberán representar a los mismos materiales, proporciones, y condiciones de colado que serán empleados en el nuevo proyecto. Los datos usados para el proporcionamiento también deberán provenir de un concreto con un $f'c$ dentro de 70 kg/cm² de la resistencia requerida para el trabajo propuesto. Así mismo, los datos deberán representar al menos 30 ensayos consecutivos o dos grupos de ensayos consecutivos que totalicen al menos 30 ensayos (un ensayo es la resistencia promedio de dos cilindros de una misma muestra). Si solo se disponen de 15 a 29 ensayos consecutivos, se puede obtener una desviación estándar ajustada, multiplicando la desviación estándar (S) por los 15 a 29 ensayos y por un factor de modificación. La desviación estándar o la modificación se utiliza en las ecuaciones A y B. Para que las proporciones del concreto se consideren aceptables, la resistencia a la compresión promedio del registro de prueba, deberá igualar o rebasar la resistencia a la compresión promedio requerida $f'cr$. El valor de $f'cr$ para los proporcionamientos elegidas de la mezcla serán igual al mayor de las ecuaciones de A y B.

$$f'cr = f'c + 1.34 S \text{ ----- (A)}$$

$$f'cr = f'c + 2.33 S - 35 \text{ ----- (B)}$$

Donde:

f'_{cr} = Resistencia a la compresión promedio del concreto requerida como base para la selección de las proporciones del concreto kg/cm^2 .

f'_c = Resistencia a la compresión especificada en el concreto, kg/cm^2

La desviación estándar de los ensayos de resistencia de una mezcla de concreto con al menos 30 ensayos consecutivos se puede determinar como:

$$S = \left(\sum (X_i - \bar{X})^2 + (n - 1) \right)^{1/2}$$

Donde:

S = Desviación estándar, kg/cm^2

X_i = Ensayo individual de resistencia (resistencia - promedio de dos cilindros a 28 días)

\bar{X} = Promedio de n resultados de ensayos de resistencia

n = Número de ensayos de resistencia consecutivos

Si se hace uso de los registros para obtener al menos 30 ensayos, la desviación estándar usada deberá ser el promedio estadístico de los valores calculados de cada registro de ensayos de acuerdo con la fórmula:

$$\bar{S} = \left[\frac{(n_1 - 1) (S_1)^2 + (n_2 - 1) (S_2)^2}{(n_1 + n_2 - 2)} \right]^{1/2}$$

Donde:

\bar{S} = Desviación promedio estadística donde dos registros de ensayos se utilizan para estimar la desviación estándar (kg/cm^2)

S_1, S_2 = Desviación estándar calculadas a partir de dos registros de ensayos uno y dos respectivamente

n_1, n_2 = Número de ensayos de los registros de ensayos 1 y 2 respectivamente

III.2.2 *Por mezclas de prueba.*

Cuando no se dispone de registros de campo, o cuando estos son insuficientes para elaborar un proporcionamiento con los métodos de experiencia de campo, las proporciones elegidas para el concreto deberán estar basadas en mezclas de prueba.

Las mezclas de prueba deberán usar los mismos materiales propuestos para la obra. Se deberán elaborar tres mezclas con tres distintas relaciones agua-cemento o contenidos de cemento para producir un rango de resistencias que se encuentren cercanas a f'_{cr} . Las mezclas de prueba deberán tener un revenimiento y un contenido de aire de dos cms. y 0.5% respectivamente, del máximo promedio o se deberán fabricar 3 cilindros a los 28 días o la edad de ensaye designada. Se determinará la resistencia a compresión del concreto ensayando los cilindros.

Se ha empleado un cierto número de métodos distintos para proporcionar los ingredientes del concreto incluyendo:

- Asignación arbitraria (1:2:3), volumétrica
- Relación de vacíos
- Módulo de finura
- Area superficial de los agregados
- Contenido de cemento

Cualquiera de estos métodos puede producir de manera aproximada la misma mezcla final luego que se hayan practicado en el campo los ajustes correspondientes. El mejor enfoque, es elegir las proporciones, basándose en las anteriores experiencias y en datos confiables de ensayos con una relación ya establecida entre la resistencia y la relación agua-cemento, en los materiales que se van a usar para producir el concreto. Las mezclas pueden ser de volumen relativamente pequeño hechas con precisión de laboratorio o mezclas de gran volumen fabricadas durante el uso de ambas para lograr mezclas satisfactorias para la obra.

Deberán seleccionar primero los siguientes parámetros:

- Resistencia requerida
- Contenido de cemento mínimo o
- Relación agua-cemento máxima
- Tamaño máximo de agregado
- Contenido de aire
- Revenimiento deseado

Entonces se elaborarán las mezclas de prueba variando las cantidades relativas de agregados fino a grueso así como otros ingredientes. Las proporciones de la mezcla adecuada se selecciona tomando como base las consideraciones de trabajabilidad y economía.

Cuando la calidad de mezcla de concreto ha sido especificada por la relación agua-cemento, el procedimiento de prueba consiste esencialmente en combinar una pasta (agua, cemento, y por lo general un aditivo inclusor de aire), de proporciones correctas con las cantidades necesarias de agregado fino y grueso para producir el revenimiento y la trabajabilidad requeridos. Después se calculan las cantidades por metro cúbico.

Se deben usar muestras respectivas de cemento, agua, agregados y aditivos. Para simplificar los cálculos y eliminar errores causados por las variaciones en los contenidos de humedad de los agregados, los agregados deberán ser humedecidos y luego sacados hasta una condición saturada y superficialmente seca y colocados en recipientes cubiertos para conservarlos en esta condición hasta que son usados. Se deberán determinar los contenidos de humedad de los agregados y conforme a estos se corregirán los pesos de los materiales para la mezcla.

El tamaño de la mezcla de prueba dependerá del equipo disponible y del número y tamaño de los especímenes a fabricar. Si las mezclas se realizan en forma manual y no se necesitan especímenes de prueba, una muestra hecha con 4.5 kg de cemento puede ser adecuada. Sin embargo, las mezclas de mayor tamaño producirán información más adecuada. Se recomienda el mezclado con máquina por que representa de manera más cercana las condiciones de la obra; su uso es obligatorio si el concreto va a tener aire incluido.

III.2.3 Mediciones y cálculos.

Las pruebas de revenimiento, contenido de aire y temperatura deberán efectuarse en la mezcla de pruebas, y también deberán desarrollarse las siguientes mediciones y cálculos:

Peso volumétrico y rendimiento. El peso volumétrico del concreto fresco se expresa en kilogramos por metro cúbico. El rendimiento es el volumen de concreto fresco producido en una mezcla y normalmente está expresado en metros cúbicos. El rendimiento se calcula dividiendo el peso total de los materiales dosificados entre el peso volumétrico del concreto fresco.

Volumen absoluto. El volumen (rendimiento) del concreto fresco es igual a la suma de los volúmenes absolutos del cemento, agua (excluyendo a la del interior del agregado), agregados, aditivos cuando existe y aire. El volumen absoluto se calcula a partir del peso específico del material como sigue:

$$\text{Volumen absoluto} = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Peso específico del material}}$$

Se puede usar un valor de 3150 kg/m³ para el peso específico del cemento portland. El peso específico del agua es igual a 1000 kg por metro cúbico.

El peso específico de los agregados de peso normal usualmente varía entre 2400 y 2900 kg por metro cúbico.

El peso específico del agregado que se emplea en los cálculos para el diseño de mezclas es el peso superficialmente seco o del material secado al horno. Los pesos específicos de los aditivos tales como los reductores de agua o los materiales finamente divididos, también deberán considerarse. El volumen absoluto normalmente se expresa en metros cúbicos.

El volumen absoluto del aire dentro del concreto, expresado en metros cúbicos, es igual al porcentaje de contenido de aire dividido entre 100 y después multiplicado por el volumen (en metros cúbicos) de la mezcla de concreto.

Se puede determinar el volumen de concreto en la mezcla por alguno de los dos métodos siguientes:

1.- Si se conocen los pesos específicos de los agregados y del cemento, se puede usar para calcular el volumen del concreto.

2.- Si se desconocen o varían los pesos específicos se puede calcular el volumen dividiendo el peso total de los materiales en el mezclador entre el peso volumétrico del concreto.

III.3 DOSIFICACION.

La dosificación es el proceso de pesar o medir volumétricamente e introducir al mezclador los ingredientes para una mezcla de concreto. Para producir concreto de calidad uniforme, los ingredientes deberán medirse con precisión en cada mezcla. La mayoría de las especificaciones requiere que la dosificación se efectúe por peso en lugar de hacerse por volumen, debido a las imprecisiones al medir por el volumen al agregado (especialmente la arena húmeda). El empleo de un sistema de dosificación por peso suministra una mayor exactitud y simplicidad y evita el problema probocado por el abundamiento de las arenas húmedas. El agua y los aditivos líquidos se pueden medir adecuadamente ya sea por volumen o por peso. La dosificación volumétrica se usa para concretos mezclados en una mezcladora continua y para ciertas obras en lugares donde no se cuenta con instalaciones para pesaje.

Las especificaciones generalmente exigen que los materiales se midan en revolturas individuales con los siguientes porcentajes de precisión:

Cemento	1%
Agregado	2%
Agua	1%
Aditivos	3%

El equipo deberá ser capaz de medir las cantidades dentro de éstas tolerancias para las mezclas pequeñas empleadas regularmente así como para las mezclas de mayor cantidad. Periódicamente se deberá revisar la exactitud del equipo de dosificación, mismo que deberá ser ajustado cuando sea necesario.

Los aditivos inclusores de aire, el cloruro de calcio, así como otros aditivos químicos deberán ir cargados en la mezcla como soluciones y la cantidad de líquido deberá ser considerada parte del agua de mezclado. Los aditivos no pueden ser agregados en solución, podrán ser pesados o medidos por volumen según las instrucciones del fabricante.

III.4 MEZCLADO DEL CONCRETO.

Todo concreto se debe mezclar completamente hasta que sea uniforme en apariencia, con todos sus ingredientes distribuidos equitativamente. Los mezcladores no deben ser cargados por encima de sus capacidades evaluadas y deberán ser operados aproximadamente a la misma velocidad para la cual fueron diseñados. Se podrá aumentar la salida con el uso de un mezclador mayor o con mezcladores adicionales en lugar de acelerar o sobrecargar el equipo con que se cuenta.

Si las espas del mezclador se han desgastado o se han recubierto de concreto endurecido, la acción de mezclado será menos eficiente. Se deben reemplazar las espas muy desgastadas y el concreto endurecido deberá ser removido periódicamente, de preferencia después de cada día de producción de concreto.

Si el concreto ha sido mezclado adecuadamente, las muestras que se tomen de distintas porciones de una mezcla tendrán los mismos pesos volumétricos, contenidos de aire, revenimiento y contenidos de agregados grueso.

III.4.1 Mezclado estacionario.

En ocasiones el concreto se mezcla en el lugar de la obra en un mezclador estacionario o una mezcladora pavimentadora. Dentro de los mezcladores estacionarios se incluyen los mezcladores en el lugar y los mezcladores centrales de las plantas de concreto de mezclado. Se encuentran disponibles en tamaños desde 56 litros hasta 9.2 m³ y pueden ser del tipo basculante o abertura superior. Todos los tipos pueden estar equipados con botes (skips), de carga y algunos están equipados con un canalón oscilante de descarga. Muchos mezcladores estacionarios cuentan con dispositivos para medir el tiempo, algunos de los cuales pueden ser regulados para un cierto tiempo de mezclado y asegurados para que la mezcla no se pueda descargar sino hasta que haya transcurrido el tiempo designado. Las especificaciones comúnmente requieren de un minuto como tiempo de mezclado mínimo para mezcladores estacionarios de hasta 765 litros de capacidad, adicionales o fracción de esta cantidad.

Las especificaciones para carreteras normalmente permiten un periodo de mezclado más corto para las pavimentadoras o para los mezcladores centrales.

El período de mezclado debe medirse desde el momento en que todo el cemento y el agregado se encuentren en el tambor mezclador, a condición de que toda el agua se agregue antes que transcurra un cuarto del tiempo de mezclado.

Bajo condiciones normales hasta aproximadamente un 10% del agua de mezclado se debe colocar en el tambor antes que se agreguen los materiales sólidos. Entonces el agua se debe vaciar uniformemente con los materiales sólidos, dejando un 10% para agregarla después que todos los materiales se encuentren dentro del tambor.

Cuando se cargue directamente el mezclador desde los dosificadores, los materiales deberán agregarse simultáneamente a velocidades tales que el tiempo de carga sea aproximadamente el mismo para todos los materiales.

III.4.2 Concreto premezclado.

El concreto premezclado se dosifica y se mezcla fuera del sitio del proyecto y se entrega en el área de construcción en estado fresco y sin endurecer se puede manufacturar por cualquiera de los métodos siguientes:

1.- El concreto de mezclado central se mezcla completamente en un mezclador estacionario y se entrega ya sea con un camión agitador, con un camión mezclador operando a velocidad de agitación o con un camión especial no agitador.

2.- El concreto de mezcla iniciada en planta fija y terminada en tránsito se mezcla parcialmente en un mezclador estacionario y se acaba de mezclar en un camión mezclador.

3.- El concreto mezclado en camión se mezcla completamente en camión mezclador.

El mezclado a altas velocidades durante períodos prolongados, de aproximadamente uno o más horas, puede producir pérdidas de resistencia en el concreto, aumentos de temperatura, pérdidas excesivas de aire incluido y pérdidas aceleradas de revenimiento.

III.4.3 Concreto mezclado en dosificadora móvil.

Los mezcladores dosificadores móviles son camiones especiales que dosifican por volumen y mezclan continuamente el concreto a medida que los materiales secos, agua y aditivos se van eliminando de manera continua dentro del mezclador.

III.4.4 Mezcladores de alta energía.

Los mezcladores de alta energía, a diferencia de los mezcladores de concreto convencionales, primero mezclan el cemento y el agua para formar una lechada por medio de espas rotatorias de alta velocidad. En seguida se agrega la lechada a los agregados y se mezclan con un equipo convencional para producir una mezcla de concreto uniforme. El mezclado de alta energía provoca que el agua se integre completamente con las partículas de cemento, dando como resultado una hidratación más completa. Con esto se logra un uso más eficiente del cemento, mayores resistencias y mejoras en algunas otras propiedades del concreto en comparación con las obtenidas por el sólo mezclado convencional.

III.4.5 Remezclado del concreto.

El concreto fresco que se deja agitar en el tambor mezclador tiende a rigidizarse antes que se desarrolle el fraguado inicial.

Tal concreto se puede usar si al remezclarlo se vuelve lo suficientemente plástico para ser compactado en las cimbras. Bajo una supervisión cuidadosa, se puede agregar una pequeña cantidad de agua siempre y cuando se cumpla con las especificaciones siguientes:

- 1.- No se exceda la relación agua-cemento máxima permisible.
- 2.- No se rebase el revenimiento máximo permisible
- 3.- No se sobrepase el tiempo máximo permisible de mezclado y de agitación (o revoluciones del tambor)
- 4.- Se remezcle el concreto por lo menos la mitad del tiempo de mezclado mínimo requerido o número de revoluciones

No se debe permitir la adición indiscriminada de agua para hacer más fluido el concreto porque esto disminuye su calidad. Se puede esperar que el concreto remezclado endurezca rápidamente. Eventualmente se podría desarrollar una junta fría al colocar el concreto de manera adyacente o por encima del concreto remezclado.

III.5 TRANSPORTE Y MANEJO DEL CONCRETO.

No existe una forma perfecta para transportar y manejar el concreto, una planeación anticipada puede ayudar a la selección del método más adecuado evitando así la ocurrencia de problemas. La planeación deberá tener en consideración tres eventos que en caso de que sucedan durante el manejo y la colocación podría afectar seriamente la calidad del trabajo efectuado.

1.- Retrasos. El objetivo que se persigue al planear cualquier calendario de trabajo es producir el trabajo con la mayor rapidez contando con la mejor fuerza laboral y con el equipo adecuado para realizarlo. Las máquinas para transportar y para manejar el concreto se han ido modernizando continuamente. Se logrará una productividad máxima si se emplea el trabajo o hará aprovechar al máximo el personal y al equipo, y se elija al equipo de manera que reduzca el tiempo de retraso durante la colocación del concreto.

2.- Endurecimiento temprano y secado. el concreto comienza a endurecerse en el momento en que se mezcla el cemento con el agua, pero el grado de endurecimiento que ocurre durante los primeros treinta minutos, normalmente no presenta problema; por lo general, el concreto que se haya mantenido en agitación se puede colocar y compactar dentro de la primera hora y media posterior al mezclado. La planeación deberá eliminar o minimizar cualquier variable que permita que el concreto endurezca hasta el

grado en que no se puede lograr una completa consolidación y se dificulta efectuar el acabado. Se dispone de menos tiempo cuando existen condiciones que aceleren el proceso de endurecimiento, como ocurre en los climas cálidos y secos, con el uso de aditivos acelerantes; y con el uso de concreto calentado.

3.- Segregación. La segregación es la tendencia que presenta el agregado grueso a separarse del mortero cemento-arena.

Esto tiene como consecuencia que parte de la mezcla tenga una cantidad demasiado pequeña de agregado grueso y que el resto tenga agregado grueso en cantidades excesivas. Probablemente la primera parte se contraerá más y se agrietará y tendrá una baja resistencia a la abrasión. La segunda será demasiado áspera para lograr una consolidación y acabados totales y será causa frecuente de apanalamientos. Los métodos y equipos que lleguen a usarse para transportar y manejar concreto no deberán ser causa de segregación.

III.5.1 Equipo para transporte y manejo del concreto.

En los últimos cincuenta años ha habido pocos cambios importantes, si acaso, en los principios para transportar el concreto. Lo que ha cambiado es la tecnología que ha llevado a desarrollar una mejor maquinaria para ejecutar el trabajo con mayor eficiencia.

Los métodos y equipos más comunes para mover el concreto hasta el punto donde se requiera ha ido evolucionando y perfeccionando hasta nuestros días. Lo antes descrito se resume en la tabla III.3

Tabla III.3 Métodos y equipos más comunes para mover concreto.

EQUIPO	TIPO DE UTILIZACIÓN PARA EL CUAL FUE DISEÑADO	PRINCIPALES VENTAJAS	CUIDADOS A CONSIDERAR
Bandas transportadoras	Transporta el concreto horizontalmente a un nivel superior o inferior	<ul style="list-style-type: none"> - Alcance ajustable. - Velocidad variable. - Desviador viajero. - Transporta grandes volúmenes de concreto rápidamente, cuando el acceso está restringido 	<ul style="list-style-type: none"> - En la descarga evitar la segregación. - Evitar que el concreto regrese por la banda. - Tapar las bandas en clima cálido o con mucho viento
Bandas transportadoras montadas sobre camiones mezcladores	Transporta concreto al mismo nivel, a un nivel inferior o a un nivel superior	<ul style="list-style-type: none"> - Alcance ajustable. - Velocidad variable. - El equipo de transporte llega junto con el concreto 	<ul style="list-style-type: none"> - En la descarga evitar la segregación. - Evitar que el concreto regrese por la banda.
Cucharones	Se emplean con grúes, cablevías y helicópteros, para construir edificios y presas. El concreto es transportado desde el punto central de descarga hasta la cimbra y/o a un punto de descarga secundario.	<ul style="list-style-type: none"> - Amplio rango de capacidades. - La descarga es limpia. - Explora totalmente la versatilidad de grúes, cablevías y helicópteros. 	<ul style="list-style-type: none"> - La capacidad del cucharón, esta en función del tamaño de la mezcla de concreto y capacidad del equipo de colocación. - Debe ser controlada la descarga.
Canalones	Transporta concreto a niveles inferiores, generalmente a niveles bajo terreno, en todo tipo de construcción de concreto.	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo. - Facilidad de maniobra. - La gravedad efectúa la mayor parte de la colocación. 	<ul style="list-style-type: none"> - La pendiente deberá ser entre 1 a 2 y 1 a 3. - Deben estar soportados adecuadamente. - Evitar la segregación del concreto en la bajada.
Grúes	Es muy adecuada para el trabajo sobre el nivel del terreno.	<ul style="list-style-type: none"> - Maneja concreto, acero de refuerzo, cimbras y otros elementos diversos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Únicamente cuenta con un gancho. - Si se tiene un programa, se puede mantener ocupada.
Canalones de desnivel	Se utilizan para colocación del concreto en cimbras verticales. Pueden ser de una sola pieza o segmentos para conectarse entre sí.	<ul style="list-style-type: none"> - Dirigen el concreto dentro de la cimbra y lo conducen hasta el fondo sin segregarse. - Evita el derrame de lechada y cemento en los lados de la cimbra - Evita la segregación de partículas gruesas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Deben contar con aberturas abocinadas lo suficientemente grandes para que se descarge el concreto y no se derrame. - La sección transversal del canalón no deberá interferir con el acero de refuerzo de la cimbra.
Mezcladoras de dosificación móviles	Se emplean para producir concreto en obra, constantemente.	<ul style="list-style-type: none"> - Es un sistema en donde se combina el transporte, dosificadora y mezcladora móvil. - Efectúa el proporcionamiento del concreto especificado en forma precisa y rápida. - La operación del equipo lo hace un hombre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tener un mantenimiento preventivo del equipo para evitar problemas de operación. - Los materiales deberán ser idénticos a los empleados en el diseño original de la mezcla.
Camiones no agitadores	Transportan concreto en trayectos cortos y caminos en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> - El costo de este equipo es inferior al de los camiones agitadores o mezcladores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se deberá limitar el revestimiento del concreto - Evitar la segregación. - En la descarga no debe impedir nada en la parte superior de la caja del camión

continua tabla

EQUIPO	TIPO DE UTILIZACION PARA EL CUAL FUE DISEÑADO	PRINCIPALES VENTAJAS	CUIDADOS A CONSIDERAR
Pistolas neumáticas (concreto lanzado)	Se emplean en lugares difíciles de colar y donde se necesitan secciones delgadas y áreas extensas.	<ul style="list-style-type: none"> - Coloca el concreto en formas libres de cimbras, para reparar y reforzar edificios. - Se utiliza para recubrimientos protectores y cubiertas delgadas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dependiendo de la habilidad del operador, se tendrá la calidad del trabajo. - Se deberán emplear operadores con experiencia en boquilla.
Bombas	Transporta en forma directa el concreto desde el punto central de descarga hasta la cimbra o un punto de descarga secundario.	<ul style="list-style-type: none"> - La tubería ocupa poco espacio y es fácil de tender. - El concreto es entregado en flujo continuo. - La bomba mueve al concreto de manera vertical u horizontal. - Las plumas de bombas estacionarias suministran concreto de forma continua para edificios muy altos. 	<ul style="list-style-type: none"> - El suministro debe ser constante y el concreto deberá ser fresco con una consistencia promedio y sin tendencia a segregarse. - La operación se hará con cuidado a lo largo de la línea de bombeo para asegurar un flujo uniforme. - La línea de bombeo se limpiará una vez terminado el colado. - La distancia máxima de bombeo se verá reducida considerablemente con el bombeo vertical, curvaturas y mangueras flexibles.
Extendedores de tornillos	Se utilizan para extender concreto en áreas planas y en pavimentos.	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede tender rápidamente una mezcla de concreto sobre un área grande con un espesor uniforme. - Una vez tendido el concreto tiene una uniformidad de compactación antes que se utilice la vibración para la compactación final. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se deben utilizar como parte de un trazo de pavimentación. - Se deberá emplear para extender concreto antes de aplicar el vibrado.
Tubo embudo (tubo tremie)	Se utiliza para colocar concreto bajo el agua.	<ul style="list-style-type: none"> - Su uso es para verter el concreto por medio de un embudo a través del agua, dentro de la cimentación. - Puede colar otros elementos de la estructura. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe tener precaución para que el extremo de descarga del tubo, siempre se encuentre enterrado en concreto fresco, para tener un sello entre el agua y la masa de concreto. - A menos que se cuente con presión, el diámetro deberá ser de 25 a 30 cm. - La mezcla de concreto requiere de mayor cantidad de cemento (de 360 a 450 kg) por metro cúbico. - Un revenimiento mayor, de 15 a 22.5 cm., para que el concreto deba fluir y consolidarse sin ninguna vibración.
Carretillas manuales y motorizadas	Se utilizan en todo tipo de construcción para acarrear planos y distancias cortas.	<ul style="list-style-type: none"> - Son ideales en interiores y en condiciones donde el colado se encuentre cambiando constantemente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lentas y de trabajo intenso.

III.6 CURADO DEL CONCRETO.

El curado consiste en el mantenimiento de contenidos de humedad y temperaturas satisfactorias en el concreto durante un periodo definido inmediatamente después de la colocación y acabado, con el propósito que se desarrollen las propiedades deseadas. El curado tiene una gran influencia sobre las propiedades del concreto endurecido como lo son durabilidad, resistencia, hermeticidad, resistencia a la abrasión, estabilidad volumétrica y resistencia a la congelación y deshielo y a las sales para descongelar.

Los objetivos del curado son:

- a) Prevenir (o reaprovisionar) la pérdida de humedad del concreto
- b) Mantener una temperatura favorable en el concreto durante un periodo definido

Con un curado adecuado, el concreto se volverá más fuerte, impermeable y resistente a los esfuerzos, a la abrasión, congelación y deshielo. La mejora es inmediata en las edades tempranas, aunque continúa dándose más lentamente durante un periodo indefinido.

La pérdida de agua también va a promover que el concreto haya adquirido la resistencia a la tensión adecuada, se podrían obtener como resultado agrietamientos superficiales. Todas las superficies expuestas, deberán protegerse contra la evaporación de la humedad.

III.6.1 Métodos y materiales del curado.

El concreto puede mantenerse húmedo con el uso de tres métodos de curado.

1.- Métodos que mantengan la presencia de agua de mezclado en el concreto durante el periodo inicial de endurecimiento. Entre éstos se incluye el estancamiento o inmersión, al rociado y a las cubiertas húmedas saturadas. Estos métodos proporcionan un cierto enfriamiento a través de la evaporación, lo cual es benéfico en climas calidos.

2.- Métodos que evitan la pérdida del agua de mezclado del concreto sellando la superficie. Esto se puede lograr cubriendo el concreto con papel permeable o con hojas de plástico o aplicando compuestos de curado que formen membranas.

3.- Métodos que aceleren la ganancia de resistencia suministrando calor y humedad adicional al concreto. Esto se

logra normalmente con vapor directo, serpentines de calentamiento, cimbras o almohadillas calentadas eléctricamente.

El método o la combinación de métodos elegida dependerá de factores tales como la disponibilidad de los materiales de curado, el volumen y forma del concreto, las instalaciones de producción (en obra o en planta), la apariencia estética y la economía.

Estancamiento o inmersión.

En las superficies planas tales como pavimentos y pisos, el concreto se puede curar por estancamiento. Se puede retener un tirante de agua por bordos de arena o de tierra en el perímetro de la superficie del concreto. El estancamiento es un método ideal para evitar la pérdida de humedad y también es efectivo para conservar la temperatura uniforme en el concreto. El agua de curado no deberá estar en 11°C más fría que el concreto, para evitar esfuerzos por temperatura que pudieran ser causa de agrietamientos. Como el estancamiento requiere de trabajo y supervisión considerables, el método solamente es empleado en los trabajos pequeños.

El método más completo de curado con agua consiste en la inmersión total de elemento de concreto ya terminado. Este método se utiliza comúnmente en el laboratorio. Cuando la apariencia del concreto sea importante, el agua que se utilice para curar por estancamiento o inmersión deberá estar libre de sustancias que manchen o decoloren al concreto. El material utilizado para los bordos también podría decolorar al concreto.

Rociado o aspersión.

La aspersión o rociado continuo con agua es un método excelente de curado cuando la temperatura ambiente queda suficientemente por encima de la congelación y cuando la humedad es muy baja. Se debe aplicar una llovizna muy fina de manera continua a través de un sistema de boquillas o rociadores. Los rociadores ordinarios para césped resultan ser efectivos si se logra una buena cobertura y si el volumen de descarga de agua no tiene demasiada importancia.

Las mangueras para regar el suelo son útiles para superficies que son verticales o casi verticales.

El costo del rociado puede ser una desventaja. El método requiere de una amplia fuente de abastecimiento y de una supervisión cuidadosa. Si el rociado o aspersión se hace a intervalos, se debe evitar que el concreto se seque entre las aplicaciones de agua, por que los ciclos alternos de saturación y secado pueden ser causa de agrietamientos irregulares en la

superficie. También se deben adoptar precauciones para evitar se presente erosión en el concreto recién acabado provocada por el agua.

Cubiertas húmedas.

Las cubiertas de tela saturada con agua, como la arpillera, las esteras de algodón, las esterillas, u otras telas que retengan la humedad, se utilizan comúnmente para el curado.

La arpillera debe estar libre de encolados o de cualquier sustancia que sea dañina para el concreto o que cause decoloración. Las arpilleras nuevas deben ser enjuagadas a conciencia en agua para remover sustancias solubles y volverlas absorbentes.

Las cubiertas de tela saturadas, capaces de retener la humedad, deberán colocarse tan pronto como el concreto haya endurecido lo suficiente para evitarle daños en su superficie, incluyendo los bordes de las losas. Las cubiertas deberán mantenerse húmedas de manera continua, de tal suerte que una película de agua permanezca sobre la superficie del concreto durante el periodo de curado. Con el empleo de rollos de polietileno sobre la arpillera se eliminará la necesidad de un riego continuo sobre la cubierta. Los ciclos alternos de saturación y secado durante el curado a edades tempranas pueden provocar agrietamientos irregulares en la superficie.

Papel impermeable.

El papel impermeable para curar el concreto consiste en dos hojas de papel kraf, cementadas entre sí por un adhesivo bituminoso con fibras de refuerzo.

Una ventaja de importancia de este método es que no se necesitan adiciones periódicas de agua. el curado con papel impermeable asegura una hidratación adecuada del cemento evitando la pérdida de humedad en el concreto.

En cuanto el concreto haya endurecido lo suficiente para evitar daños en su superficie, deberá ser saturado completamente y se le deberá colocar el papel con el mayor ancho con el que se pueda contar. Los bordes de las hojas adyacentes deberán quedar traslapados aproximadamente unos 15 centímetros y estar sellados firmemente con arena, tablones de madera, cinta adhesiva sensible a la presión, mastique o cola. Las hojas deberán ser ancladas con pesos para mantener un contacto estrecho con la superficie del concreto durante todo el periodo de curado.

Láminas de plástico.

Las láminas de materiales plásticos, tales como los rollos de polietileno, pueden ser empleadas para curar el concreto. Los rollos de polietileno constituyen una barrera efectiva de peso ligero contra la humedad y se pueden aplicar fácilmente en los elementos de formas simples o complejas. Su aplicación es igual a la descrita en papel impermeable.

Compuestos para curado formadores de membranas:

Los compuestos líquidos o formadores de membranas a base de parafinas, resinas, hules clorados, y solventes de alta volatilidad se pueden usar para retardar o reducir la evaporación de la humedad del concreto. Son adecuados no solamente para curar el concreto recién colocado, sino también para prolongar el curado luego de la remoción de la cimbra o después del curado húmedo inicial.

Los compuestos formadores de membranas de curado se puede clasificar en dos tipos generales:

- a) Claros o translúcidos
- b) Pigmentados de blanco

Los compuestos claros o translúcidos pueden llegar a contener un tinte perecedero que facilita la revisión visual de la cobertura total de la superficie de concreto cuando se aplica el compuesto. El tinte se desvanece rápidamente después de haber sido aplicado. En los días cálidos y soleados, el uso de compuestos con pigmentos blancos reduce el aumento de calor provocado por el sol, reduciendo así la temperatura del concreto. Para impedir que el pigmento se asiente en el fondo, se debe agitar el recipiente que contenga los compuestos pigmentados.

Los compuestos de curado deberán ser aplicados con equipos rociadores operados manualmente o de propulsión mecánica inmediatamente después de haber dado el acabado final al concreto.

Comunmente sólo se aplica una placa llena y uniforme a razón de 3.6 a 4.9 m² por litro, aunque pueden llegar a ser necesarias dos capas para asegurar un recubrimiento completo y una protección efectiva. Cuando se utilice la segunda capa, deberá ser aplicada en ángulo recto (cuatrapeada), respecto a la primera. Se debe lograr un recubrimiento completo de la superficie pues aún los agujeros más diminutos en la membrana permitirían la evaporación de una cierta humedad del concreto.

Cimbras dejadas en su lugar.

Las cimbras brindan una protección satisfactoria contra la pérdida de humedad si las superficies expuestas del concreto se conservan húmedas.

Una manguera para regar suelos es excelente para lograr esto. Las cimbras se deberán dejar en el concreto el mayor tiempo posible.

Las cimbras de madera dejadas en la obra se deberán mantener húmedas ya sea por medio de riego, especialmente en los climas cálidos y secos.

Si esto no se puede realizar, se deberá remover tan pronto como sea práctico y se deberá comenzar sin ningún retraso algún otro método de curado.

Curado al vapor.

El curado al vapor resulta ventajoso en los casos en que sea importante contar con una mejora a edad temprana, en la resistencia del concreto o en los casos en que se requiera de una cantidad adicional de calor para completar la hidratación como ocurre en los climas fríos.

Se usan dos métodos de curado al vapor:

- a) Vapor vivo (o directo) a presión atmosférica (para estructuras encerradas, coladas en obra y para unidades grandes de concreto prefabricado).
- b) Vapor a alta presión en autoclaves (para unidades manufacturadas pequeñas)

El ciclo de curado al vapor consiste:

- 1.- Un retardo inicial antes de aplicar el vapor
- 2.- Un periodo para elevar la temperatura
- 3.- Un periodo para mantener constante la temperatura máxima
- 4.- Un periodo para disminuir la temperatura

El curado al vapor a presión atmosférica generalmente se efectúa en un sitio cerrado para minimizar las pérdidas de humedad y calor.

Frecuentemente se utilizan lonas para formar el sitio cerrado. La aplicación del vapor en tal sitio se debe retardar dos horas por lo menos, después del colado final del concreto para permitir un cierto endurecimiento del concreto. Sin embargo, con un periodo del retraso antes de la exposición al vapor se logrará la máxima resistencia a edad temprana. La temperatura del vapor en el sitio cerrado se deberá mantener aproximadamente a 65°C. Se deben evitar temperaturas de curado al vapor mayores a 82°C; son antieconómicas y pueden dar como resultado una reducción indebida en la resistencia última.

El curado al vapor a alta presión en los autoclaves aprovecha temperaturas que varían de 163°C a 190°C y las correspondiente a presiones manométricas de 5.6 a 12 kg/cm². La hidratación se acelera grandemente y las elevadas temperaturas y presiones pueden producir en unas cuantas horas resistencias iguales a las que se obtienen en los concretos con curado húmedo durante 28 días a 21°C.

Mantas cubiertas o aislantes.

Cuando las temperaturas llegan a caer por debajo de 0°C, se pueden utilizar capas de materiales secos y porosos, como la paja y el forraje para proporcionar un aislamiento contra la congelación del concreto.

La cimbra se puede aislar de manera económica en colchas comerciales o con aislantes de material fibroso, cuyas cubiertas no permitan el escape de la humedad. Las colchas aislantes adecuadas están hechas de fibra de vidrio, hule esponja, fibras de celulosa, lana de asbesto, esponja de vinilo y esponja de poliuretano de celdas descubiertas. Cuando se usen cimbras aisladas, se deberá tener la precaución de asegurarse que las temperaturas del concreto no lleguen a ser excesivas.

Se pueden colocar alrededor de la estructura marcos con lonas o con polietileno reforzado u otros materiales que encierran el espacio y que puedan calentarse por medio de calentadores de espacio o de vapor.

Curado por método eléctrico.

Desde hace muchos años se dispone de métodos para curado normal y acelerado del concreto por medio de electricidad, aceite caliente y rayos infrarrojos. Dentro de los métodos eléctricos se incluyen una cierta variedad de técnicas; el uso del concreto mismo como conductor eléctrico, el uso del acero de refuerzo como elemento de calefacción, las mantas eléctricas y el uso de las cimbras de acero calentadas eléctricamente.

La calefacción eléctrica es especialmente útil para los colados en climas fríos. A través de las cimbras de acero se puede hacer que circule aceite caliente para calentar el concreto. Los rayos infrarrojos han tenido un empleo limitado en el curado acelerado del concreto. El concreto que se cura por métodos con rayos infrarrojos queda normalmente bajo una cubierta o es encerrado en cimbras de acero. Los métodos de curado eléctrico, con aceite y con rayos infrarrojos se utilizan principalmente en la industria de los elementos precolados.

Periodo de colado y temperatura.

El período durante el cual se debe proteger el concreto contra la pérdida de humedad depende del tipo de cemento, de las proporciones de la mezcla, de la resistencia requerida, del tamaño y forma del miembro del concreto, de las condiciones ambientales futuras de exposición. El período puede ser de tres semanas o mayor para mezclas pobres de cemento empleadas en las estructuras masivas como lo son las presas y contrariamente pueden ser de sólo unos días para las mezclas ricas, especialmente si se han empleado cementos tipo III. Los períodos de curado al vapor, normalmente son mucho mayores, variando desde tres horas hasta tres días, aunque generalmente se emplean ciclos de veinticuatro horas.

Como el curado mejora todas las propiedades deseadas en el concreto, el período de curado deberá ser tan largo como lo permitan las condiciones prácticas. Para las losas de concreto sobre el piso (pisos, pavimentos, revestimientos de canales, lotes de estacionamientos, calzadas, banquetas), y para el concreto estructural (columnas, losas, trabes, zapatas pequeñas, estribos, muros de contención, cubiertas de puentes y muros colados en el lugar), la longitud del período de curado para temperaturas ambientales superiores a 4°C deberá ser como mínimo de siete días o el tiempo necesario para llegar al 70% de la resistencia especificada a la compresión o a la flexión. Una mayor temperatura de curado proporciona un aumento en la resistencia del concreto a edad más temprana que una temperatura baja, pero puede ser causa de que disminuya la resistencia a los 28 días.

III.7 COLOCACION DEL CONCRETO.

La colocación del concreto se efectúa con recipientes, tolvas, carritos propulsados a mano o con motor, conductos o tubos de caída, bandas transportadoras, aire comprimido, bombeo, tubo-embudo y equipo para pavimentar.

Un requisito básico del equipo y métodos de colocación, como de todos los demás equipos y métodos de manejo, es que se debe conservar la calidad del concreto en lo referente a la relación agua-cemento, revenimiento, contenido de aire y homogeneidad. La elección del equipo debe basarse en capacidad para manejar eficientemente el concreto en las condiciones más ventajosas, de tal forma que pueda ser fácilmente consolidado en su lugar mediante vibración.

Para construcción monolítica, cada capa debe colocarse cuando la capa subyacente todavía responda a la vibración, las capas deben ser lo suficientemente poco profundas como para permitir la unión entre sí, mediante una vibración apropiada. El concreto debe depositarse en su posición final a segregarse cuando tiene que ser movido lateralmente a su lugar. En superficies inclinadas, el concreto debe colocarse primero en la porción más baja de la pendiente, continuando hacia arriba, y así aumentar la natural consolidación del concreto. Debe evitarse la descarga a alta velocidad, que origina la segregación del concreto.

El método escalonado de colocación debe emplearse en estructuras masivas donde se abarcan grandes áreas, para impedir la formación de juntas frías. En este método, la colocación del concreto va haciéndose por una serie de capas horizontales escalonadas de aproximadamente 45-60 cm (1 1/2 a 2 pies) de espesor. La colocación del concreto de cada capa (nivel) se extiende por la anchura total del bloque, y las operaciones de colocación progresan desde un extremo de la elevación hacia el otro, exponiendo solamente pequeñas áreas de concreto a la vez. Al progresar la colocación, parte de la misma estará ya terminada ("rematada"), mientras que la colocación continuará en lo que queda.

III.7.1 Equipo de colocación.

Tolvas de sección circular y rectangulares.

El empleo de tolvas de sección circular con descarga por la parte inferior, diseñadas apropiadamente, permiten la colocación del concreto con el más bajo revenimiento práctico, compatible con la consolidación mediante vibración. Las puertas de descarga deben tener una salida libre que equivalga a no menos de una tercera parte del área máxima horizontal interior o cinco veces

el tamaño máximo del agregado que se está empleando. Las paredes laterales deben ser inclinadas, por lo menos 60 grados respecto a la horizontal. Los controles en las puertas deben permitir que el personal que trabaja en la colocación las abra o las cierre durante cualquier etapa del ciclo de descarga. Deben utilizarse, en cuanto a las tolvas de sección rectangular, criterios similares de diseño, con paredes laterales inclinadas y suficiente amplitud de abertura, de acuerdo con el tamaño máximo del agregado y el revenimiento de concreto.

El amontonamiento de concreto por la descarga de las tolvas demasiado arriba o cercana de la superficie, o mientras están en movimiento, da lugar a causas comunes de segregación. Debe evitarse la contaminación descansando las tolvas sobre plataformas, sin balancearlas sobre el concreto descubierto que acaba de terminarse. El concreto derramado no debe recogerse con palas y devolverse a las tolvas para su uso subsecuente.

Carros manuales y motorizados "buggies".

Es importante el empleo de vías lisas y rígidas para impedir la separación de materiales del concreto durante el tránsito. Las distancias máximas de entrega recomendadas para carritos mecanizados es aproximadamente de 300 m (1000 pies) para carritos impulsados manualmente y carretillas de 60 m (200 pies).

Canalones y tubos de caída.

Los canalones se emplean con frecuencia para trasladar concreto de elevaciones superiores a inferiores. Deben de ser de fondo curvo y contruidos o forrados de metal y tener suficiente para permitir que el concreto del revenimiento requerido en el sitio, fluya continuamente por el canalón sin segregarse. Debe controlarse el flujo del concreto en el extremo del canalón para evitar la segregación; los canalones demasiado largos y descubiertos deben cubrirse para evitar la evaporación y la pérdida de revenimiento.

Los tubos de caída que se emplean para trasladar verticalmente el concreto desde niveles altos son circulares. El tubo debe tener un diámetro de por lo menos ocho veces el tamaño máximo del agregado. Debe ser firme, a plomo y colocados de tal manera que el concreto caiga verticalmente. Un método satisfactorio para disipar la energía acumulada en la caída libre es hacer que el concreto caiga sobre el colchón amortiguador de concreto al extremo del tubo. Este se logra fijando un saco de tipo reforzado al final del tubo y efectuando la descarga lateral del concreto por medio de aberturas justamente arriba del saco. Esto proporciona un colchón de concreto al final de la caída, y el concreto fluye hacia la colocación por las aberturas de

el tamaño máximo del agregado que se está empleando. Las paredes laterales deben ser inclinadas, por lo menos 60 grados respecto a la horizontal. Los controles en las puertas deben permitir que el personal que trabaja en la colocación las abra o las cierre durante cualquier etapa del ciclo de descarga. Deben utilizarse, en cuanto a las tolvas de sección rectangular, criterios similares de diseño, con paredes laterales inclinadas y suficiente amplitud de abertura, de acuerdo con el tamaño máximo del agregado y el revenimiento de concreto.

El amontonamiento de concreto por la descarga de las tolvas demasiado arriba o cercana de la superficie, o mientras están en movimiento, da lugar a causas comunes de segregación. Debe evitarse la contaminación descansando las tolvas sobre plataformas, sin balancearlas sobre el concreto descubierto que acaba de terminarse. El concreto derramado no debe recogerse con palas y devolverse a las tolvas para su uso subsecuente.

Carros manuales y motorizados "buggies".

Es importante el empleo de vías lisas y rígidas para impedir la separación de materiales del concreto durante el tránsito. Las distancias máximas de entrega recomendadas para carritos mecanizados es aproximadamente de 300 m (1000 pies) para carritos impulsados manualmente y carretillas de 60 m (200 pies).

Canalones y tubos de caída.

Los canalones se emplean con frecuencia para trasladar concreto de elevaciones superiores a inferiores. Deben de ser de fondo curvo y contruidos o forrados de metal y tener suficiente para permitir que el concreto del revenimiento requerido en el sitio, fluya continuamente por el canalón sin segregarse. Debe controlarse el flujo del concreto en el extremo del canalón para evitar la segregación; los canalones demasiado largos y descubiertos deben cubrirse para evitar la evaporación y la pérdida de revenimiento.

Los tubos de caída que se emplean para trasladar verticalmente el concreto desde niveles altos son circulares. El tubo debe tener un diámetro de por lo menos ocho veces el tamaño máximo del agregado. Debe ser firme, a plomo y colocados de tal manera que el concreto caiga verticalmente. Un método satisfactorio para disipar la energía acumulada en la caída libre es hacer que el concreto caiga sobre el colchón amortiguador de concreto al extremo del tubo. Este se logra fijando un saco de tipo reforzado al final del tubo y efectuando la descarga lateral del concreto por medio de aberturas justamente arriba del saco. Esto proporciona un colchón de concreto al final de la caída, y el concreto fluye hacia la colocación por las aberturas de

descarga laterales del tubo. La colocación se inicia cubriendo el tubo con una lechada de mortero antes de depositar el primer concreto. La mezcla de concreto suele tener un contenido de arena mayor que el normal, manteniendo el revenimiento entre 7.5 hasta 15 cm (3 a 6")

El concreto se ha vertido así con buenos resultados hasta 1500 m (5,000 pies). Es necesario que haya comunicación telefónica entre la cima del tubo y el sitio de colocación.

Bandas transportadoras.

El empleo de transportadores de banda se ha establecido bien en la construcción de concreto. Las transportadoras pueden clasificarse en tres tipos:

- a) Transportadoras portátiles o autosuficientes.
- b) Transportadoras alimentadoras o en serie.
- c) Transportadoras de descarga lateral o esparcidoras.

El tipo de alimentador o transportador en serie funciona a velocidades de bandas altas, generalmente a más de 150 m/min. (500 pies por minuto) y los tipos portátiles y de descarga lateral operan a velocidades menores. Todos los tipos dependen de la combinación apropiada del ancho de la banda transportadora y de la velocidad para lograr la colocación deseada.

Con el concreto debe alimentarse la transportadora por medio de una tolva para obtener un listón uniforme de material a lo largo de la banda.

Las transportadoras deben estar apoyadas adecuadamente para lograr un transporte suave, sin vibración, a lo largo de la banda, y el ángulo empleado de inclinación o de declive debe controlarse para eliminar la tendencia del agregado grueso a separarse del mortero de la mezcla. La inclinación máxima que se puede emplear con una banda transportadora es variable, y es una función tanto de la mezcladora del concreto como del dueño de la banda. Unas bandas con corrugados pequeños rectos y costillajes en la superficie que lleva la carga, pueden transportar concreto a través de inclinaciones empinadas, con mayor éxito que las bandas lisas. Debe prestarse atención especial a los puntos en los cuales se carga el concreto sobre la banda y a los lugares en donde la segregación tiende a efectuarse. Deben utilizarse en estos puntos tolvas, canalones, y conductos troncales apropiadamente diseñados, o combinaciones de estos para conservar la homogeneidad del concreto. Además, debe equiparse el punto de descarga en cada banda transportadora con una regla limpiadora o raspadora, para limitar la pérdida de mortero.

La colocación de corto alcance, generalmente se maneja mejor con transportadoras portátiles con voladizo, con el punto de descarga más allá de las ruedas del armazón de sustentación, pudiendo subirse o bajarse aquellas por unidades independientes.

La colocación de largo alcance se maneja generalmente por unidades fijas, formadas por un número de bandas transportadoras en serie. Las bandas alimentadoras en estas colocaciones de alcance más largo funcionan a velocidades altas de banda, generalmente a más de 150 m/min (500 pies por minuto), de modo que se logra una alta capacidad con bandas estrechas, reduciendo así a un mínimo el tiempo durante el cual el concreto está expuesto a condiciones ambientales adversas.

Cuando se emplean transportadoras para depositar concreto en colocaciones profundas, tolvas apropiadamente diseñadas con trompas de elefante deben usarse para introducir el concreto a poca distancia de la superficie donde se vacía. También como en cualquier otro método de colocación, el punto de descarga desde la banda transportadora debe moverse con frecuencia, para que el concreto no tenga que moverse lateralmente de posición por vibración u otro método. Esto se logra mediante el uso de unidades radiales, variables y unidades de descarga lateral.

El movimiento de la transportadora, mientras el concreto está pasando por la banda, debe planearse con anticipación, reduciéndose al mínimo.

Para evitar la segregación del concreto fresco debe depositarse sobre concreto plástico colocado previamente, hasta donde sea esto posible. Deben emplearse protecciones o cubiertas para las transportadoras, cuando las condiciones climatológicas (lluvia, viento, sol y temperaturas ambientales) sean severas, de manera que no ocurran cambios significativos en el revenimiento o temperatura del concreto. Generalmente se logra la máxima eficiencia con la banda transportadora, con una mezcla de concreto plástica y homogénea, controlada a un revenimiento de 6.5 a 7.5 cm (2 1/2 a 3 pulgadas)

CAPITULO IV

COMPACTACION DEL CONCRETO

IV.1 METODOS DE COMPACTACION.

Cuando el concreto de bajo revenimiento se deposita en la cimbra, se encuentra en condicion alveolada, es decir, contiene particulas de agregado grueso recubiertas de mortero y bolsas de aire atrapado. La cantidad de aire atrapado depende de la trabajabilidad de la mezcla, del tamaño y la forma de la cimbra, de la cantidad de acero de refuerzo y del método de colado del concreto; por lo general es del 5 al 20%. Este aire produce un efecto adverso sobre la resistencia del concreto (cada 1% de aire, reduce la resistencia en un 5% aproximadamente) y sobre otras de sus propiedades que dependen de la densidad, así como sobre el aspecto de la superficie cuando este es de importancia. El propósito de la compactación, es eliminar, si es posible, todo aire atrapado.

En mezclas de elevado revenimiento, se observa que por peso propio del concreto se logra cierta compactación al depositarlo en la cimbra, por lo que se requiere muy poco esfuerzo de compactación adicional. Sin embargo, la calidad de estos concretos es bastante pobre debido a su elevado contenido de agua y no es aceptable para muchas clases de construcción.

Las mezclas plásticas o de revenimiento moderado, pueden compactarse mediante varillado, método que consiste en insertar una varilla de apisonamiento, otra herramienta adecuada dentro del concreto o bien apisonándolas con el pie. En ocasiones se utiliza el paleado para mejorar las superficies en contacto con las cimbras, esto es, se inserta y se saca repetidamente una herramienta plana en sitios adyacentes a la cimbra, apartando de estas las particulas gruesas y ayudando a que las burbujas de aire suban a la superficie.

En algunos casos, para compactar mezclas rígidas se puede aplicar el apisonado manual, en donde el concreto en capas delgadas se apisona con cuidado en cada capa. Este es un método de compactación efectivo pero es laborioso y costoso.

Existe una gran variedad de métodos de compactación tanto manuales como mecánicos, internos como externos, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

Vibrado.

Es uno de los métodos más empleados en la actualidad dado que es muy adecuado para las consistencias más rígidas, propias de los concretos de alta calidad.

Varillas de apisonamiento.

Operadas en forma mecánica son adecuadas para compactar las mezclas rígidas empleadas en algunos productos prefabricados.

La centrifugación.

Puede compactar concretos de revenimiento moderado y elevado, que se utilizan en la fabricación de tuberías, pilotes, postes y otros productos huecos de concreto.

Equipos de presión.

Los equipos que aplican elevadas presiones estáticas sobre la superficie de concreto, se emplean principalmente para compactar losas delgadas de consistencia plástica o fluida.

Mesas de impacto o golpeteo.

Son adecuadas para compactar mezclas rígidas. El concreto se deposita dentro de moldes resistentes en capas delgadas y conforme se van llenando los moldes, se levantan una altura determinada (de 3 a 13mm) y se dejan caer sobre una base sólida.

Existen también muchos vibradores de superficie como son:

Reglas vibradoras
Rodillos vibradores
Apisonadores vibradores
así como herramientas vibradoras de acabado

El proceso de vacío es un método que se utiliza para mejorar la calidad del concreto cercano a la superficie. Este método se emplea principalmente en la construcción de losas. En este caso se coloca una lona sobre la superficie del concreto y mediante una bomba de aire se produce un vacío de tal manera que la presión atmosférica actuando sobre la lona producirá una presión sobre la losa. Esta presión es la fuerza compactante, la cual va eliminando el agua y el aire atrapado en la zona cercana a la superficie, cerrando los espacios que estos ocupaban. Este método necesita una compactación previa por algún otro método.

Los compactadores de potencia pueden emplearse para compactar concretos rígidos en unidades prefabricadas. Este método proporciona un efecto de apisonamiento y al mismo tiempo una vibración de baja frecuencia.

Hay también gran variedad de vibradores para cimbra lo cual se conoce como vibración externa. Son vibradores fijados en el exterior de la cimbra o molde la cual a su vez transmite esta vibración al concreto provocando así la compactación.

En ocasiones una combinación de dos o más métodos de compactación proporciona muy buenos resultados. Se puede combinar la vibración interna con una vibración externa en elementos prefabricados y en ocasiones también en concretos colados en obra, es decir, se puede emplear una vibración externa para la compactación de rutina y vibración interna en secciones muy reforzadas, propensas a los vacíos y a la adherencia deficiente con el acero de refuerzo. En otros casos por el contrario se puede emplear la vibración interna como método principal y un vibrado de cimbras para lograr un mejor aspecto en la superficie. Puede aplicarse la vibración en forma simultánea en la cimbra y en la superficie, procedimiento que se emplea para hacer elementos prefabricados y consiste en vibrar la cimbra mientras una placa o regla vibradora ejerce presión e impulsos vibratorios sobre la superficie.

Algunas veces la vibración de la cimbra se combina con presión estática aplicada en la superficie. Este procedimiento se emplea en bloques de concreto en las que la mezcla que se emplea es tan rígida que no reacciona en forma favorable a una sola vibración.

Una combinación que se emplea frecuentemente es la centrifugación, la vibración y la compactación con rodillos en la producción de tuberías de concreto de alta calidad y de otras secciones huecas.

Para seleccionar el método más adecuado a nuestras necesidades se debe tomar en cuenta la mezcla de concreto que se va a emplear y las condiciones de colado.

IV.2 COMPACTACION MEDIANTE VIBRADO.

El método de vibrado, consiste en someter el concreto fresco a impulsos vibratorios rápidos que "licuan" la mezcla, reduciendo en forma considerable la fricción entre las partículas, de tal manera que el concreto se asienta por gravedad y en ocasiones ayudado por una fuerza aplicada en la superficie.

Existen dos tipos de vibradores de concreto: Los internos y los externos.

Los internos se puede clasificar en oscilatorios y rotatorios.

Los vibradores oscilatorios tienen un movimiento rápido que se transmite al concreto. Este movimiento se describe en términos de frecuencia y amplitud, es decir, por el número de oscilaciones por unidad de tiempo y por la desviación máxima del punto de reposo.

Los vibradores rotatorios siguen una trayectoria orbital que se logra al hacer girar un peso excéntrico dentro de la funda del vibrador. La aceleración o intensidad de la vibración, puede medirse a partir de la frecuencia y de la amplitud y se expresa con una "g" que es la relación entre la aceleración de la vibración y la aceleración de la gravedad.

Los vibradores internos, llamados también vibradores de corto alcance o vibradores hurgadores, tiene una caja o cabeza vibradora la cual se sumerge en el concreto y actúa en forma directa sobre este. En la mayoría de los casos los vibradores internos dependen del efecto enfriador del concreto que los circunda para evitar el sobrecalentamiento.

En la actualidad, todos los vibradores internos que se utilizan son del tipo rotatorio, es decir, los impulsos vibratorios emanan de la cabeza del vibrador en ángulo recto.

En la selección de un vibrador interno, el requisito principal es su efectividad para compactar el concreto; debe tener un radio de acción adecuado y ser capaz de "licuar" y desairear con rapidez el concreto. Debe ser un vibrador de operación confiable, ligero, fácil de manejar y resistente al uso.

En la mayoría de los casos estos requisitos no se encuentran en un mismo vibrador por lo que es necesario hacer un estudio de nuestras necesidades (tipo de mezcla, cantidad de concreto, etc.) para poder seleccionar el más adecuado.

A pesar de que falta mucho por conocer acerca de los vibradores de concreto y su acción sobre el concreto fresco durante el proceso de compactación, la experiencia señala que la efectividad de los vibradores internos depende del diámetro de la cabeza, de la frecuencia y de la amplitud. La amplitud está en función del momento excéntrico y del peso de la cabeza, pero hasta la fecha no existe ningún método sencillo para determinar la amplitud de un vibrador operando dentro del concreto, por lo que es necesario emplear la amplitud del vibrador al operar en el aire que es un poco mayor que en el concreto.

El radio de acción y por lo tanto la separación entre las inserciones, dependen no sólo de las características del vibrador, sino también de la trabajabilidad de la mezcla.

En la **tabla IV.1** se proporciona el intervalo comun de las características del comportamiento y las aplicaciones de los vibradores internos. Por lo general se pueden lograr buenos resultados seleccionando un vibrador del tamaño mayor siguiente de los que se recomiendan en la tabla, siempre que se hagan los ajustes necesarios en cuanto a espaciamiento y tiempo de inserción.

Estos valores no deben considerarse como garantía de rendimiento en cualquier condición.

Otras formas de cabeza de los vibradores como lo son las cuadradas, poligonales, acanaladas, de aspas, etc, tienen diferentes áreas superficiales y diferente distribución de la fuerza entre el vibrador y el concreto.

Los vibradores externos se pueden clasificar en :

- *Vibradores para cimbras.*
- *Vibradores de superficie.*
- *Mesas vibradoras.*

Los vibradores para cimbra son vibradores fijos al lado exterior de la cimbra o el molde, ésta al vibrar, transmite las vibraciones al concreto. Estos vibradores pueden ser del tipo rotatorio o de acción vertical.

Tabla IV.1 Características, comportamiento y aplicación de los vibradores internos.

OPC.	DIAMETRO DE LA CABEZA (MM)	FRECUENCIA RECOMENDADA, VIBRACIONES POR MINUTO (Hz)	MOMENTO INERCIAL (MM ⁴)	AMPLITUD PROGRESIVA (MM)	FUERZA CENTRIFUGA (N)	TAMAÑO DE ACHAS (MM)	VEL. DE COLAPSO DEL CONCRETO EN-NE POR VIBRADOR	APLICACION
1	20-40	170-250	0.35-1.2	0.4-0.8	0.5-1.8	80-150	0.4-4	Concreto plástico y fluido en elementos muy delgados o sitios estrechos. Puede emplearse para complementar vibradores más grandes, en especial en trabajos prefabricados, en los que los cables y ductos causen congestión en las cimbras. También se emplean para fabricar muestras para pruebas de laboratorio.
2	30-60	150-225	0.9-2.9	0.5-1.0	1.4-4.0	130-250	2-3.6	Concreto plástico en muros delgados, columnas, vigas, pilas prefabricadas, losas delgadas y a lo largo de juntas de construcción. Puede emplearse para complementar vibradores más grandes en sitios estrechos.
3	50-90	130-200	2.3-8.1	0.6-1.3	3.1-9.9	180-380	4.6-15	Concreto plástico rígido (renovimiento menor a 75 mm.) en construcción normal como muros, columnas, vigas, pilas perforadas y losas pesadas. Vibrado auxiliar adyacente a las cimbras de concreto masivo y pavimentos. Puede ser de montaje múltiple para proporcionar vibrado interno a todo lo ancho de las losas de pavimentos.
4	80-150	120-180	2.9-8.1	0.6-1.5	6.7-18	300-510	11-31	Concreto masivo y estructural con renovimiento hasta de 50 mm., depositados en cantidades hasta de 3 m ³ en cimbras relativamente abiertas de construcción sólida (centrales de energía, pilas y cimentaciones pesadas para puentes). También vibrado auxiliar en la construcción de presas cerca de las cimbras y alrededor de los elementos empujados y el acero de refuerzo.
5	130-180	90-140	28-40	1-2	1.1-2	400-610	19-38	Concreto masivo en presas de gravedad, pilas grandes, muros masivos, etc. Se requieren de dos o más vibradores que operen simultáneamente para colocar y compactar cantidades de concreto de tres metros cúbicos o más, depositadas de una sola vez en la cimbra.

El vibrador rotatorio produce sencillamente un movimiento armónico simple. Los impulsos tienen componentes tanto perpendiculares a la cimbra como en el mismo plano de ésta. Este tipo de vibrador puede ser de operación neumática, eléctrica o hidráulica.

En los vibradores de acción vertical se acelera primero en una dirección, se detiene por impacto contra una placa de acero y después se acelera en dirección opuesta. Estos vibradores se operan por medios neumáticos.

Otros vibradores para cimbra menos empleados son:

El electromagnético, que suele desarrollar una forma de onda combinada de sinusoidal, diente de sierra.

El martillo manual magnético o eléctrico.

La efectividad del vibrador de cimbra depende ante todo de la aceleración impartida al concreto por la cimbra, tomando como base que la amplitud de la cimbra será adecuada si es de más de 0.05 mm para mezclas rígidas y más de 0.025 mm para mezclas plásticas.

La aceleración de la cimbra es una función de la fuerza centrífuga de los vibradores en relación con su peso y el peso del concreto.

Con las siguientes fórmulas empíricas se puede estimar la fuerza centrífuga de los vibradores para cimbra que se requiere para proporcionar una compactación adecuada.

Para mezclas fluidas en cimbbras vigas y muros.

Fuerza centrífuga = 0.5 (Peso de cimbra) + 0.2 (Peso del concreto)

Para mezclas rígidas en cimbbras de tuberías y otras cimbbras rígidas.

Fuerza centrífuga = 1.5 (Peso de cimbra) + 0.2 (Peso del concreto)

Cualquier fórmula empleada debe cotejarse con la experiencia en el campo. Se sugiere que el usuario se ponga en contacto con el fabricante del vibrador, para proporcionarle planos de la estructura que se pretende vibrar y solicitar su asesoría en cuanto al tamaño, cantidad y ubicación de las unidades vibratoras. La distancia entre los vibradores para cimbra es por lo general de 1.5 a 2.5 m.

Para el vibrado de cimbras se recomiendan aceleraciones de 1 y 5 g, dependiendo de la consistencia de la mezcla.

Las mesas vibratoras, consisten en una mesa de acero o de concreto reforzado sobre la cual se apoya perimetralmente la cimbra en forma de marco. La mesa y el marco estan unidos a una base mediante resortes de acero, empaques aislantes de neopreno u otros medios. Es comun instalar vibradores de cimbra en el exterior del marco. La vibración se transmite de la mesa a la cimbra y de esta al concreto.

Por lo regular y sobre todo tratándose de mezclas rígidas, se prefieren vibraciones de baja frecuencia (menos de 6000 vibraciones por minuto [100 Hz]) y de gran amplitud (más de 0.13 mm).

Al igual que en el caso de los vibradores para cimbra, la efectividad de la mesa vibradora depende principalmente de la aceleración que imprime esta al concreto, suponiendo que la amplitud es la adecuada. Por lo general es preferible una aceleración de 3 a 10 g, donde el valor depende ante todo de la consistencia de la mezcla. Asimismo, la aceleración de la mesa es una función de la fuerza vibratoria en relación con el peso de la cimbra y el peso del concreto.

Mesa vibradora rígida o vigas vibratoras, con la cimbra asentada libremente sobre la mesa.

Fuerza centrífuga = (2 a 4) * [(peso de la mesa) + 0.2 (peso de la cimbra + 0.2 (peso del concreto))]

Mesa vibradora rígida con la cimbra fija a la mesa

Fuerza centrífuga = (2 a 4) * [(peso de la mesa + peso de la cimbra + 0.2 (peso del concreto))]

Mesa vibradora flexible, continua sobre varios apoyos.

Fuerza centrífuga = (0.5 a 1) * [(peso de la mesa + 0.2 peso del concreto)]

La vibración debe prolongarse hasta que se hayan eliminado todos los puntos muertos y se haya logrado una vibración lo más uniforme posible.

La mesa vibradora puede tener una amplitud de frecuencia variable en cada zona, lo cual es una ventaja para poder vibrar elementos de diferentes tamaños.

Para lograr una buena compactación en mezclas muy rígidas es necesario aplicar presión sobre la superficie al mismo tiempo que se lleva a cabo el vibrado.

Los vibradores de superficie ejercen sus efectos en la superficie del concreto y lo compactan de arriba hacia abajo, tiene además un efecto nivelador que es muy importante para lograr un buen acabado. Se utilizan mucho en la construcción de losas.

- a) **Regla vibradora:** Consiste en una viga doble o sencilla o un tablón de longitud suficiente para cubrir el ancho de la losa. En la parte superior se fijan uno o más excéntricos, dependiendo del largo de la regla que se opera con un pequeño motor de gasolina o mediante vibradores para cimbra eléctricos o de aire. La viga se apoya sobre las cimbras del borde o sobre rieles apropiados; esto controla la elevación de la regla de manera que actúe no sólo como compactador, sino también proporcione el acabado final. Por lo general las reglas vibradoras se operan en forma manual en obras pequeñas y mecánicas en obras grandes.

La vibración producida por las oscilaciones de la viga se transmite al concreto alrededor del elemento vibrador. Se requiere de gran amplitud, en especial para consistencias muy rígidas, a fin de lograr la compactación a la profundidad adecuada. Se ha observado que las frecuencias entre 3000 y 4000 vibraciones por minuto son las más satisfactorias. En general, las reglas vibradoras trabajan mejor con aceleraciones de 5g aproximadamente. Las investigaciones han demostrado que la compactación es proporcional al producto del peso por la amplitud por la frecuencia, dividido entre la velocidad de avance de la máquina.

- b) **Vibrador de artesas:** Este elemento consiste en una artesa horizontal (o una serie de artesas) que cubren todo el ancho de la losa y que descansa por completo sobre ésta sin tocar las cimbras, por lo que no puede proporcionar un acabado final. La artesa se vibra mediante excéntricos operados mecánica o eléctricamente. La frecuencia, amplitud y casi todas las demás características son bastante similares a las de la regla vibradora.

- c) **Apisonadores vibradores de placa o de rejilla:** Consisten en una pequeña placa o rejilla vibradora (por lo general de 0.2 m² de superficie) que no se mueve sobre la superficie de la losa. Estos vibradores trabajan mejor sobre concretos de consistencia rígida.
- d) **Vibradores de rodillos:** Esta unidad empareja y compacta al mismo tiempo. Uno de los modelos consta de tres rodillos, el frontal actúa como excéntrico y es el rodillo vibrador que gira a 100 o 400 revoluciones por minuto (regulado de acuerdo con la consistencia de la mezcla) en dirección opuesta a la dirección del movimiento. Abate, empareja y proporciona vibración ligera. Este equipo es adecuado para mezclas fluidas.

También existen vibradoras manuales de madera o de metal y pequeños dispositivos vibradores de operación eléctrica o de aire, que se fijan a las herramientas estándar de acabado para facilitar esta operación.

IV.3 COMPACTACION MEDIANTE RODILLOS.

Otra técnica para la compactación de concreto es mediante rodillos. Esta técnica se ha empleado en la construcción de presas y pavimentos en algunos países como Estados Unidos, Canadá, Japón, Australia, Alemania, Inglaterra, Francia, Italia, Pakistán, Sudáfrica, Argentina y Brasil.

En las obras que se han construido empleando este método, se ha podido constatar su grandes ventajas.

Haciendo un análisis de los aspectos de diseño, construcción y comportamiento de presas; diseño, compactación y durabilidad de pavimentos; pruebas de laboratorio y de campo para asegurar la calidad del concreto compactado por medio de rodillos; análisis comparativo de costos; y tiempos de realización y utilización de las obras mediante esta tecnología en comparación con las tecnologías alternas aplicables, podemos mencionar lo siguiente.

IV.3.1 En presas.

En general las presas que se han construido con la técnica del concreto compactado con rodillos, presentan un costo de aproximadamente un tercio del costo si se hubieran construido utilizando concreto convencional, con la ventaja de que el agua de alguna creciente inesperada puede brincar la cresta de la presa durante la etapa de construcción causando un mínimo de daño. Se observa la necesidad de una cimentación rocosa o cuando menos un suelo firme y el requisito adicional de asegurar la

impermeabilidad entre las diferentes capas del concreto compactado con rodillos (CCR).

La tabla IV.2 presenta las características principales de las presas de CCR de más de 15 metros de altura terminadas en varios países de 1980 a 1987.

Esta técnica señala la necesidad de evitar el deslizamiento en las juntas de las diferentes capas de CCR por medio de la impermeabilización de la cara aguas arriba y reducir la subpresión entre capas mediante drenes colocados en el interior de la presa que descarguen a una galería filtrante. Además, se tiene la escasa posibilidad de que se produzcan fisuras por efecto térmico y se da como receta que el ancho mínimo de la base debe ser aproximadamente 0.7 de la altura de la cortina.

Una de las principales ventajas del CCR es la velocidad de construcción que permite ahorrar de 1 a 2 años en la terminación de un proyecto típico debido a la utilización de un menor volumen de material, al manejo del vertedor como parte de la estructura de CCR y a esquemas de desviación del río mucho más cortos. La velocidad de colocación del CCR en los Estados Unidos es del orden de 7,630 metros cúbicos diarios en dos turnos y el avance vertical en la construcción de las cortinas es del orden de 1.2 metros por día.

Tabla IV.2 Características principales de las presas de CCR de más de 15 mts. de altura de 1980 a 1987.

FECHA DE TERMINACION	NOMBRE DEL PROYECTO	UBICACION	ALYURA MAXIMA (M)	CEMENTO Y PUZOLANA (KG/M ³)	VALOR AGUAS ABAJO	VOLUMEN DE CCR (M ³)
1980	Shimajigawa	Yamaguchi JAPON	89	91+39	0.80:1.0	170,000
1982	Willow Creek	Oregon EUA	52	70+23	0.80:1.0	331,000
1984	Winchester	Kentucky EUA	21	104+0	1.0:1.0	24,500
1984	Middle Fork	Colorado EUA	38	66+0	0.80:1.0	42,100
1985	Kidston Copperfield River	Queensland AUSTRALIA	40	85+15	0.80:1.0	140,000
1985	Galesville	Oregon EUA	51	54+52	0.80:1.0	180,300
1986	Craigbours	New Jersey EUA	48	64+0	0.75:1.0	219,200
1986	De Mist Kraal Weir	Cape 30 SUDAFRICA		58.5+58.5	0.80:1.0	80,000
1986	Arabic	Lebowa SUDAFRICA	35	38+74		107,000
1986	Oaten	Frijian CHINA	38			50,000
1986	Crindstone Canyon	New México EUA	42	74+30	0.75:1.0	87,700
1986	Zaaihoek	Natal 50 SUDAFRICA		31.5+73.5	0.62:1.0	120,000
1986	Saco de Nova Olinda	Paraiba BRASIL	57	72+0	0.80:1.0	132,000
1987	Tamagawa	Akita JAPON	103	91+39	0.80:1.0	750,000
1987	Upper Stillwater	Utah 87 EUA		77+171	0.60:1.0	1'102,000
1987	Les Olivettes	Bas Rhone FRANCIA	36	88+47	0.75:1.0	85,000
1987	Lower Chase Creek	Arizona EUA	18	64+40	0.70:1.0	13,000
1988	Erizana (dique)	ESPAÑA	15	90+90		12,000

En virtud de que la cortina puede ser rebasada sin riesgo por alguna creciente inesperada y de hecho trabaja como vertedor de emergencias, la creciente de diseño que puede utilizarse es la de 100 años, en lugar de la de 500 años. Otras ventajas pueden ser la incorporación de escalones en el vertedero para amortiguar la energía del agua, lo que da lugar a una cubeta de menores dimensiones. Además para la reducción del costo influyen una menor excavación en el suelo de cimentación y un menor volumen de inyecciones, conductos más cortos a través de la presa y el evitarse pozos de oscilación en el caso de hidroeléctricas, por la menor longitud de tubería a presión.

IV.3.2 En pavimentos.

En cuanto al diseño de pavimentos tanto en sus aplicaciones del tipo industrial ya sean en patios de maniobras o plataformas de estacionamiento de aeropuertos, como en caminos, se puede mencionar que con la tecnología del CCR se tiene la ventaja de la formación natural de fisuras con espaciamientos de 12 a 18 metros, lo que evita cortar la superficie del concreto para formar juntas de contracción.

Se observa la necesidad de una compactación adecuada mediante equipo pesado y capas suficientemente delgadas de CCR (15 a 25 cm). Las características del CCR son esencialmente las mismas que las del concreto normal, pudiendo usarse materiales marginales con granulometrías, plasticidad u otras características que normalmente no se aceptarían en concreto normal.

Debido a la baja relación agua-cemento y a la alta densidad, el CCR tiene una permeabilidad muy reducida, por lo que es ideal para condiciones de congelación o descongelación en carreteras ubicadas en climas extremos. Además el CCR permite obtener la misma resistencia que el concreto normal con un contenido más bajo de cemento.

Todas las operaciones de campo del cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos de Norteamérica, están recurriendo actualmente al CCR en sus pavimentos; obteniendo un ahorro en el costo debido principalmente a los procedimientos de producción, colocación y compactación seleccionados.

Es recomendable en todos los casos la construcción de un tramo de prueba y evaluar densidades, resistencias y acabados en comparación con la mezcla diseñada en el laboratorio.

La **tabla IV.3** muestra parámetros típicos para el CCR que se usa en presas y el CCR que se usa en pavimentos y en las **figuras IV.1 y IV.2**, las granulometrias correspondientes a ambos casos.

Tabla IV.3 Comparación entre CCR para presas y para pavimentos.

	CCR EN PRESAS	CCR EN PAVIMENTOS
Tamaño máximo del agregado	2"	3/4"
% que pasa la malla No. 4	35	56
Relación agua /puzolana	0.35	0.30

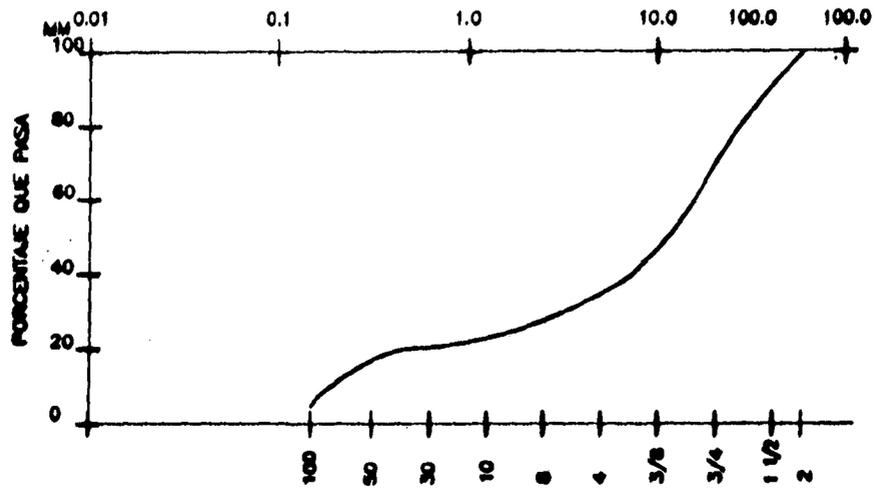


Figura IV.1 Granulometria típica para presas de CCR (Withrow).

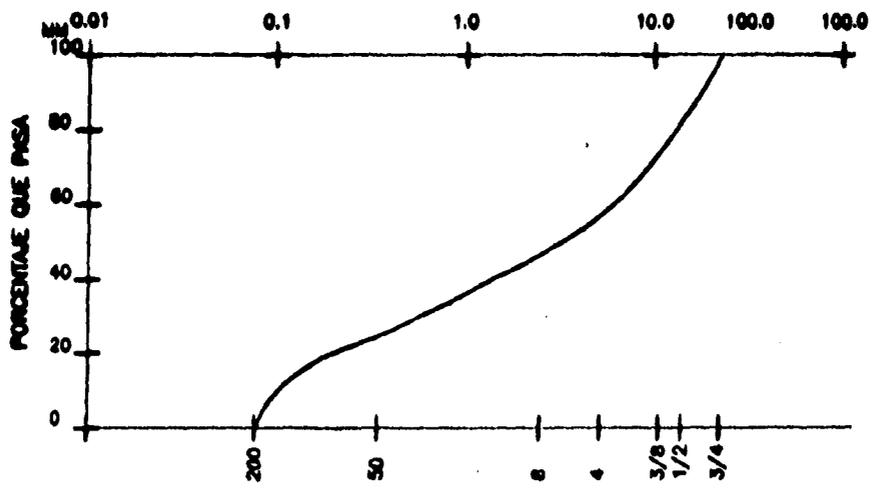


Figura IV.2 Granulometria típica para pavimentos de CCR (Withrow).

En la **tabla IV.4** se muestra una comparacion entre los costos de pavimentacion, equivalentes de: Asfalto, concreto convencional, suelo-cemento y CCR resultando este ultimo el más economico con la ventaja de que el pavimento se puede utilizar inmediatamente después de terminada la compactación.

Pitman, Kifer y Hess, ingenieros del ejército de E.U.A. señalan que existen evidencias de excelente comportamiento de pavimentos de CCR en los Estados Unidos durante los últimos tres años y en Canadá durante más de 10 años, considerando un ahorro de cuando menos el 35% del costo en comparación de pavimentos con concreto convencional. Señalan también la fácil adaptabilidad de los operarios de pavimentos que con una experiencia en pavimentos asfálticos rápidamente adquieren la capacidad para colocar y controlar el CCR.

Una de las más importantes ventajas es el uso inmediato del pavimento al terminar la colocación y vibrado.

Tabla IV.4 Costos durante la vida útil de diferentes alternativas de pavimentación.

ALTERNATIVA	COSTO BASICO UNITARIO (DLS. UOMM)		
	COSTO INICIAL	COSTO ANUAL DE MANTENIMIENTO ESTIMADO	COSTO ESTIMADO A LO LARGO DE LA VIDA UTIL (1)
Concreto asfáltico, mezcla caliente, 30 cm. de espesor.	\$ 17.92	\$ 1.97	\$ 40.53
Concreto hidráulico convencional, 25 cm. de espesor.	\$ 29.66	\$ 0.15	\$ 31.57
Concreto compactado con rodillos, 30 cm. de espesor.	\$ 19.11	\$ 0.19	\$ 21.31
Suelo-cemento 30 cm. de espesor.	\$ 9.56	\$ 2.09 (2)	\$ 33.53

- (1) Suponiendo vida útil de 20 años, intereses del 6% anual e inflación del 5% anual.
 (2) Sustitución de toda la capa a los 5 años, más bacheo.

CAPITULO V

CONCRETO RODILLADO

V.1 COMPACTACION DEL CONCRETO POR MEDIO DE RODILLOS.

Como se menciona en el capítulo IV, que una de las formas de consolidar el concreto es mediante rodillos, para lo cual nos referiremos en lo que sigue como concreto compactado por medio de rodillos (CCR).

El CCR se define como una tecnología constructiva que utiliza una mezcla de concreto con revenimiento cero, bajo contenido de cemento (de 80 a 100 kilogramos por metro cúbico), presencia opcional de puzzolanas (de 20 a 30 kilogramos por metro cúbico), relación agua-cemento muy baja, buena graduación de agregados con un tamaño máximo del orden de 3 pulgadas, que generalmente se mezcla en plantas de proceso continuo y se transporta y coloca usando equipos para movimiento de tierras, en capas del orden de 15 centímetros y sometiendo cada capa a compactación con equipo vibratorio.

Aunque existen aplicaciones documentadas de algo parecido al CCR desde los años cuarentas, no es sino hasta mediados de los setentas, cuando se organiza y estructura esta tecnología, tanto en sus aplicaciones en presas como en pavimentos.

V.2 DISEÑO DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.

V.2.1 Presas.

Contrariamente al concreto convencional, el diseño de mezclas para concreto compactado con rodillos (CRR) no depende directamente de determinar las relaciones agua-cemento apropiadas para obtener la resistencia y la trabajabilidad requerida ni tampoco las relaciones grava-arena.

El contenido de agua se determina con base en consideraciones de manejabilidad, compactabilidad y la necesidad de obtener la máxima densidad.

De la información proporcionada en la referencia 13, se puede decir en forma general, que el contenido de cemento será del orden del 4% al 7% en relación al peso de la mezcla, porcentajes que corresponden a consumos aproximados de 85 kg/m³ a 170 kg/m³ todo dependerá del tipo de agregado, como puede observarse en la figura V.1

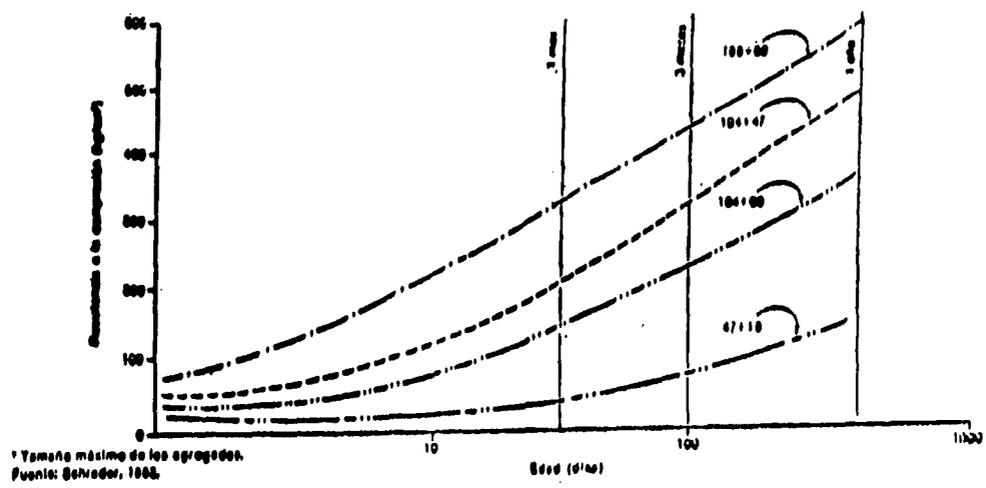


Figura V.1 Relación edad-resistencia de cilindros de CCR de la presa Willow Creek.

Los agregados pueden ser los utilizados para un concreto convencional, grava clasificada y dosificada para lograr una buena graduación, o roca triturada para obtener los tamaños de agregados con una graduación aceptable.

El control de la graduación es mucho más estricto que para el concreto convencional y en algunas ocasiones, no será necesario lavar el material para retirar las partículas que pasan la malla número 200, si estas no son plásticas.

Según la referencia 17, la cantidad de finos varía, del 4% al 10% del peso total del agregado de acuerdo al tipo de concreto usado.

Los agregados son materiales pétreos clasificados como grava, arenas y cenizas volantes. Los agregados pueden ser producto de la explotación y la trituración de canteras de roca. Las gravas y arenas se almacenan clasificadas, separándolas de manera que no se mezclen entre sí, a fin de obtener la granulometría de proyecto.

Las cenizas volantes, subproducto de la utilización del carbón mineral no coquizable en las plantas carboeléctricas, se utilizan en un porcentaje máximo de 6% con respecto al peso de la grava y arena, y generalmente no es sustituto del cemento cuando se usan cementos puzolánicos.

Refiriéndose a las estructuras para el control de agua como son las presas, diremos que la proporción en que se dosifica cada elemento será conforme a los resultados de las pruebas de laboratorio y los obtenidos en los bordos de prueba.

Antes de comenzar a construir es necesario definir el comportamiento del material durante su colocación, así como sus características después del endurecimiento. Esta información es recopilada, primero, a través de pruebas de laboratorio que permiten conocer los valores aproximados de los parámetros de diseño y las características de la mezcla. Posteriormente son verificadas mediante un bordo de prueba.

Entre las características estudiadas en el laboratorio destacan las siguientes: Resistencia a la compresión simple, resistencia a la tensión, resistencia al esfuerzo cortante en pruebas triaxiales, módulo de elasticidad y relación de Poisson, resistencia al esfuerzo cortante entre capas, densidad, permeabilidad y estabilidad dimensional.

Es importante destacar que los resultados de las pruebas que se realicen en especímenes ensayados en el laboratorio, sólo servirán para el diseño preliminar y de guía durante la construcción. Los resultados del laboratorio deben verificarse con la información obtenida del bordo de prueba.

De la construcción de un bordo de prueba se pretende determinar densidad y resistencia, procedimientos para asegurar la adherencia entre las capas, tratamientos de paramentos y definición de la geometría de la sección y adherencia de CCR con la cimentación y los empotramientos.

Densidad y resistencia.

Es necesario definir el número de pasadas del equipo de compactación, así como el efecto que tiene el espesor de capa para lograr la calidad de concreto requerido.

Las pruebas se realizarán variando el contenido de agua y cemento, con base en las pruebas preliminares de laboratorio, para observar el comportamiento del equipo de compactación y los resultados obtenidos.

La selección adecuada del contenido de agua es de vital importancia. El exceso en su aplicación provocará que la mezcla se adhiera al equipo de compactación o que éste se atasque. Si la cantidad de agua es insuficiente, se presentarán fallas locales por cortante en la mezcla bajo el rodillo, o el cemento no podrá hidratarse totalmente.

Las capas serán colocadas de una manera uniforme, vigilando la unión entre ellas. Debe definirse el tratamiento más adecuado que se dará a la superficie del CCR cuando se interrumpa la colocación de material por uno o más días.

Si se ha elegido una sección de paramento vertical o casi vertical, se pondrán a prueba los procedimientos de construcción propuestos.

En caso de no utilizar un sistema de soporte o cimbra para el paramento de aguas arriba, deberán realizarse pruebas para definir el talud permisible y verificar las condiciones consideradas en el diseño.

Adherencia de CCR a la cimentación y los empotramientos.

Debido a la gran importancia de un desplante adecuado, se obtendrán núcleos para evaluar la adherencia existente entre la primera capa de CCR y la roca base. Se comprobará la adherencia a todo lo largo del contacto. Se debe tener especial cuidado al seleccionar el método y el equipo de compactación en las zonas a las que no pueda llegar el rodillo vibratorio, para asegurar la homogeneidad del material.

Con el propósito de edificar la presa La Manzanilla, en Guanajuato, se construyó un bordo de prueba en las cercanías del poblado La Colonia, Nuevo Mexico, entre las ciudades de León y Silao, con las siguientes características:

Longitud	12.0 m
Ancho	4.1 m
Altura	15.0 m
Talud	0.75:1

Los agregados empleados para la construcción fueron grava triturada del banco La Manzanilla y arena del río Ibarra.

El equipo utilizado para la construcción del bordo constó de: dosificadora de bandas, revoladora de 1 1/2 sacos de cemento (172 lbs.), camiones de volteo para transportar el concreto, motoconformadora con cuchilla para extender el concreto, rodillo liso vibratorio de 10 toneladas de peso y bailarinas con motor de gasolina.

El bordo se dividió longitudinalmente en tres zonas, las cuales se compactaron con dos, cuatro y seis pasadas.

Se dosificó un concreto con porcentajes de cemento variables entre 4 y 8 y contenidos de agua entre 4% y 6%. El material fue colocado sobre una base de concreto normal, en capas de 30 cm de espesor; se extendió por medio de la motoconformadora con cuchilla e inmediatamente después se le compactó con el rodillo liso con cuatro, ocho y doce pasadas.

Los resultados de resistencia obtenidos para 6% y 5% de agua fueron los siguientes:

	Resistencia (Kg/cm ²)	Peso Volumetrico (kg/m ³)
A - 4 pasadas	64 - 78	1 895
B - 8 pasadas	59 - 79	1 992
C - 12 pasadas	76 - 79	2 279

Observando los valores de resistencia se aprecia que son muy bajos sin embargo sirvieron como parámetros representativos del procedimiento seguido.

De acuerdo con el criterio empleado normalmente en la dosificación es común utilizar, en la construcción de cortinas de gravedad, de 250 kg/m³ a 300 kg/m³ de cemento, para fabricar concretos cuyas resistencias varían entre 100 kg/cm² y 140 kg/cm².

Observando, en la figura V.2 las curvas que relacionan el contenido de cemento con la resistencia a la compresión de CCR, puede apreciarse que para un contenido de cemento de aproximadamente 125 kg/m³ se obtienen resistencias a la compresión de 210 kg/cm² a los 90 días. lo que significa una disminución en el consumo del cemento hasta el 60%. Por tanto, el procedimiento resulta atractivo desde el punto de vista económico. Además, conviene mencionar que debido a los bajos consumos de cemento, la reactividad álcali-agregado, importante en presas con concreto normal, carece prácticamente de significado en estructuras construidas con concreto compactado con rodillo.

Otro factor de gran relevancia es la resistencia. En el concreto normal es función del consumo de cemento, en tanto que en el CCR depende de la densidad que se pretenda alcanzar.

En la figura V.3 pueden apreciarse las resistencias obtenidas de pruebas para concreto convencional y CCR para diferentes edades.

Construcción y control de calidad.

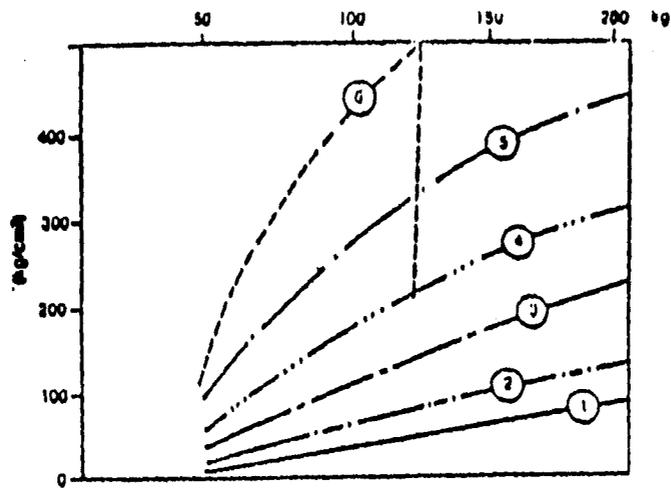
Las mezclas pueden hacerse con equipo convencional o por medio de una planta de mezclado continuo. Sin excepción, se dosifica el peso de concreto para cada batchada. La proporción en que se dosifica cada elemento será conforme a los resultados de las pruebas de laboratorio y los obtenidos en los bordos de prueba antes de iniciar la construcción.

La mezcla puede transportarse hasta el sitio de colocación por medio de bandas, camiones de volteo, motoescrepas o una combinación de éstos. Se colocarán indicadores y señalamientos para el control y la identificación de concretos, en cuanto sean mezclados y descargados en los transportes y sitios de colocación, para extenderlos con la ayuda de maquinaria pesada y posteriormente compactarlos con un rodillo liso vibratorio.

El concreto se colocará dentro de los treinta minutos siguientes al mezclado, refiriéndose a las presas, la cortina se construye colocando el concreto en franjas traslapadas entre sí 40 cm, en forma continua, empleando el tiempo mínimo, para impedir la pérdida de agua o que se formen juntas frías. Cuando el material se encuentra en estas condiciones debe removerse.

No es permitido añadir agua, cemento y agregados a la mezcla, una vez que ésta haya salido de la mezcladora. Debe impedirse que la superficie del concreto se contamine y, en caso de lluvia, debe suspenderse la colocación del concreto.

Los cambios volumetricos potenciales ocasionados por la perdida de humedad o el acortamiento por secado son significativamente menores en el CCR, debido a que contiene mucho menos agua de mezclado que el concreto convencional. Los cambios volumetricos ocurridos por la disipación del calor de hidratación tambien son reducidos, en razón del menor contenido de cemento y posiblemente al método de colocación, puesto que el concreto convencional se coloca en hiladas de 45 a 60 cm, mientras que el CCR es colocado en capas sucesivas y uniformes, cuyo espesor puede variar entre 20 y 30 cm. Las capas delgadas permiten una mejor disipación de calor.



Peso total de material cementante
(Aproximadamente 37% de reemplazo con cenizas volantes)

Edad de prueba

- | | |
|-----------|-----------|
| ① 3 días | ④ 90 días |
| ② 7 días | ⑤ 1 año |
| ③ 28 días | ⑥ 5 años |

Fuente: Schrader, 1902.

Figura V.2 Relación material cementante/resistencia.

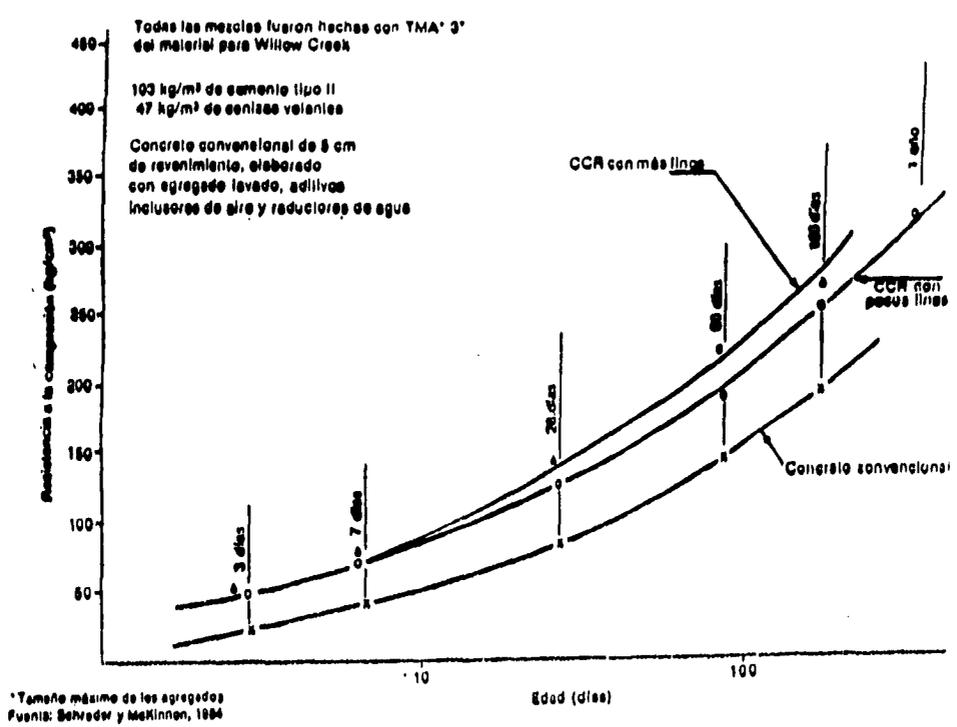


Figura V.3 Edad-resistencia del concreto convencional CCR.

En la figura V.4 se muestran secciones transversales de terraplenes, enrocamiento y concreto compactado con rodillos, puede apreciarse en forma esquemática la diferencia en magnitud de la obra.

Una presa de CCR se construye como se observa en la figura V.5

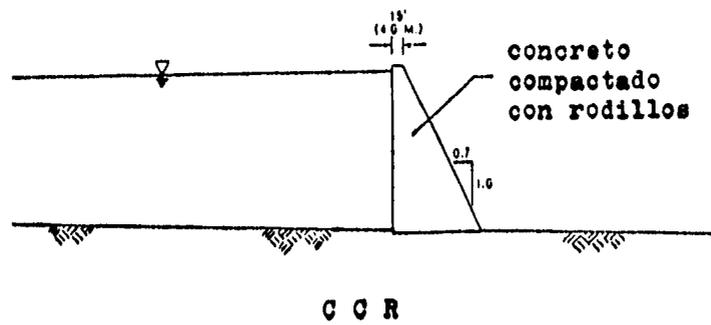
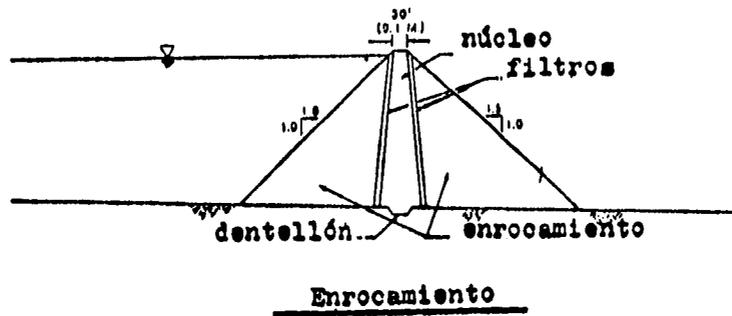
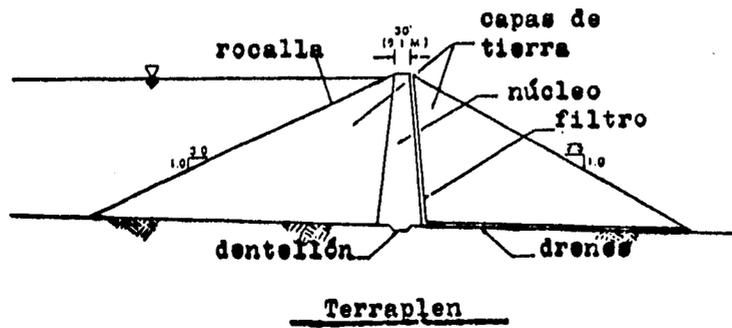


Figura V.4 Secciones transversales de presas.



Figura V.5 Construcción de una presa con CCR.

V.2.2 Pavimentos.

El diseño del CCR para pavimentos difiere del que se elabora para cortinas de presas u otras estructuras para el control de agua, la diferencia radica en las condiciones de trabajo a que están sujetos, en los pavimentos se deben tomar en cuenta la abrasión, las heladas, los periodos de deshielo así como su efecto en los componentes químicos de la mezcla en el invierno, aunque las estructuras para el control de agua están también expuestas a climas fríos el efecto sobre estas es en menor grado, debido a que el deshielo no está aplicado directamente sobre la cara del elemento estructural. Para obtener la resistencia requerida es necesario emplear mayor cantidad de cemento que el utilizado en presas. El porcentaje mínimo recomendado es del 12% de cemento en relación al peso de la mezcla.

La mezcla para concreto compactado con rodillos se compone de:

- a) Agregados (grava natural o roca triturada) de 20 mm de diámetro.
- b) Cemento Portland (Puede usarse cemento puzolánico y cenizas volantes).
- c) Agua
- d) Otros aditivos (acelerantes, retardadores, etc.) No se ha presentado evidencia de que con la inclusión de aire se tenga algún efecto sobre el deshielo, que logre mejorar la durabilidad del concreto compactado con rodillos.

Mezclando los diversos componentes se logra un revenimiento del concreto casi de cero. La colocación de este se hace con equipo de construcción con neumáticos, la densidad deseada se alcanza mediante el vibrado y el acabado final se hace con rodillo.

Los pavimentos de CCR pueden ser de una capa o de varias. Esto depende de los requerimientos de diseño. Para pavimentos se requiere un alto contenido de cemento que va del 10% al 14% del peso de la mezcla para la capa superior logrando obtener una mejor resistencia y durabilidad al deshielo. Para lograr una buena superficie de rodamiento y adecuada densidad es necesario que el agregado sea de 22 mm como máximo.

El contenido de cemento para las capas inferiores es generalmente del 0 al 8% del peso de la mezcla.

Espesores de las capas de CCR.

Hasta el momento no existe un procedimiento racional para la obtención del espesor de las losas de CCR. Sin embargo los parámetros que deben utilizarse para determinarlo son:

- * Magnitud de la carga
- * Área de contacto
- * Frecuencia de la carga
- * Sub-base de soporte así como las propiedades mismas del CCR.

Diseño de la mezcla.

El diseño de la mezcla para el concreto compactado con rodillos se basa en los principios de construcción a base de cemento, la cantidad de agua en la mezcla se selecciona sobre la base de porcentajes óptimos de humedad para la máxima densidad al compactar. La cantidad de cemento comprende dos casos, uno para las capas inferiores en las que se emplea un porcentaje del 7 al 8% del peso de los agregados, para el segundo caso que corresponde a la capa superior se emplea un porcentaje del 12 al 14% con objeto de tener una mayor resistencia y durabilidad, para lo cual se considera el criterio del ASTM D559 y D560.

Algunos materiales incluyen cenizas volantes como parte del contenido de cementantes que al igual que los aditivos puzolánicos se limitan a un 20% del total de cementantes.

Construcción y control de calidad.

En relación a los procedimientos de construcción para la elaboración de pavimentos de CCR estos están en plena evolución, pero son muy semejantes a los utilizados en la construcción de pavimentos flexibles.

Cuando toda la carga es soportada por una losa de concreto compactado con rodillos no es necesario colocar una sub-base granular. Muchas veces se coloca una capa delgada de grava de 50 a 75 mm que sirve como superficie de trabajo, permitiendo asegurar un espesor uniforme de la losa de CCR.

El CCR es producido en una planta mezcladora semejante a la usada para el concreto convencional, una planta mezcladora típica se muestra en la figura V.6.

La experiencia ha mostrado que el mejor agregado es roca triturada o grava del tamaño máximo de 22 mm, mientras que para la capa de base puede emplearse agregado hasta de 40 mm, debe cuidarse el tamaño máximo de agregados para lograr una superficie lisa.

Debe tenerse la menor segregación posible en la mezcla, para lo cual contribuye el triturar en mayor grado los agregados gruesos y colocar la mezcla en contenedores de los cuales puede retirarse la mezcla periódicamente, también ayuda el colocar los agregados, que se emplearan en la capa de la superficie, en contenedores específicos.

La mezcla es transportada por medio de camiones de volteo y colocada con maquinaria empleada para la colocación de asfalto logrando una buena compactación con el uso de compactadores cilíndricos.

El problema de segregación puede reducirse limitando el ancho del pavimento, los contratistas procuran colocar el mayor ancho posible para lograr una mayor productividad, sin embargo, parece ser que al distribuir la mezcla, el agregado grueso tiende a colocarse en los extremos, produciéndose segregación en los bordes de las capas.

Tomando en cuenta la experiencia de los constructores, resulta eficaz construir dos capas escalonadas de CCR para abatir el tiempo y costo de la obra.

La compactación debe seguir inmediatamente con vibrador de cilindros metálicos seguido de un compactador de caucho. El control de la densidad se hace directamente en el lugar hasta alcanzar el valor deseado.

Si bien, no se requieren precauciones especiales para la adhesión en el tendido de dos capas, es recomendable construir la capa base y superficial el mismo día. Bajo ciertas condiciones climatológicas, es necesario rociar con agua la capa base para prevenir la pérdida de humedad de la mezcla de la capa superficial, por esto es común colocar la capa base en la mañana y la superficial por la tarde.

Cuando se compactan anchos de 8.5 m el procedimiento se hace partiendo de la orilla hacia el centro. Esto asegura una adecuada densidad en todo el ancho de la losa.

Para lograr una adecuada densidad en los extremos libres del pavimento, se compacta una capa de 45 a 60 cm de ancho, contigua al borde libre durante 10 minutos más o menos, dependiendo de las condiciones del clima.

El problema de contracciones en el concreto compactado con rodillos no se ha estudiado ampliamente, lo que se hace al presentarse el agrietamiento es sellarlas con material sobrante de las capas colocadas. El problema de contracción se presenta con más frecuencia en pavimentos para carreteras no así para pavimentos en industrias.

La construcción de pavimentos con CCR requiere un especial cuidado en las juntas frías que se dejen al término de la jornada de trabajo. las juntas pueden ser longitudinales o transversales.

La cara de la junta puede tener pendiente o simplemente tener un corte vertical y puede quedar a corta distancia del área que se compactará completamente. Se debe tener cuidado en la compactación que se haga con rodillos metálicos no vibratorios para asegurar una buena densidad en las juntas frías. Lo anterior puede lograrse manteniendo unos minutos más la compactación en el área de las juntas.

Cuando se deja una junta longitudinal en el transcurso de la noche, al siguiente día continúan los trabajos dejando una separación de 30 cm entre bordes, posteriormente esta ranura se llena con mezcla de mayor humedad y contenido de cemento. Para lograr una mejor calidad pueden usarse aditivos estabilizadores de volumen.

En pavimentos para pisos de almacén, las capas de CCR se colocan en la dirección corta con lo que se logra tener juntas longitudinales pequeñas al interrumpir la jornada de trabajo y además se tendrá prevista una falla potencial en el sentido corto para mantenimiento futuro.

Como cualquier otra mezcla que contenga cemento es necesario efectuar el procedimiento de curado para evitar concentración de esfuerzos en el CCR. Un procedimiento común es el de aspersión de agua por medio de tubos de aluminio, como se muestra en la figura V.7. Rara vez se utilizan membranas.

En lugares donde escasea el agua se utilizan emulsiones asfálticas líquidas aplicando dos capas a razón de 0.5 litros por m².

En México, el IMCYC expuso a la Dirección Técnica de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y S.C.F. una alternativa para construir un tramo de pavimento de CCR de 30 m, en el Km. 23.30 de la autopista México-Cuernavaca. Esta fue aceptada y el primer tramo fue construido el 13 de julio de 1988.

La importancia de este proyecto radica en que el CCR ofrece ventajas económicas sobre otras alternativas de pavimentación ya que el mantenimiento anual es un porcentaje bajo de inversión inicial, posee gran durabilidad, y es fácil de colocar, utilizando el equipo de pavimentación tradicional, entre otras.

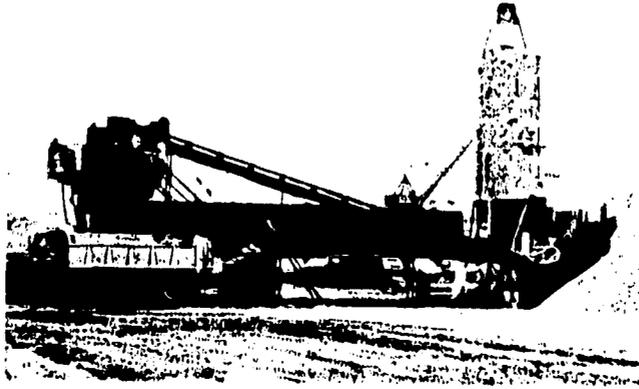


Figura V.6 Planta mezcladora típica.

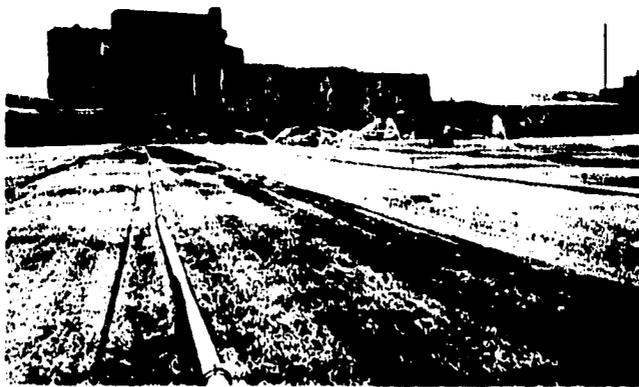


Figura V.7 Curado del pavimento por aspersión.

Para el diseño del espesor, el pavimento de CCR se consideró como un pavimento rígido, ya que gran parte de la capacidad estructural es proporcionada por la losa. El espesor del pavimento fue diseñado de acuerdo a los procedimientos tradicionales, y en primer lugar se utilizó el método de fatiga y erosión de la Portland Cement Association.

Por otra parte se verificó dicho espesor utilizando las cartas de Pickett y Ray (esfuerzo en el borde de la losa) y las ecuaciones de Westergaard (esfuerzos debidos a carga en el borde).

El tramo de pavimento que se construyó tiene una longitud de 30 m por un ancho de 3.10 m y un espesor de 15 cm. Se encuentra apoyado sobre una sub-base granular de 12 cm de espesor, tratada con cemento al 3%. La proporción grava-arena fue de 55%-45% respectivamente.

El tendido del CCR fue hecho a mano por tratarse de un tramo de 30 m de longitud. Previo al tendido de la mezcla se dió un ligero riego de agua a la sub-base.

El espesor del pavimento fue de 15 cm compactado, para lo cual se consideró un porcentaje de abudamiento del 30%.

La compactación se inició con 2 pasadas de un compactador estático de 10 toneladas, posteriormente se dieron de 4 a 6 pasadas con un compactador DYNAPAC CA-25 vibratorio de 10 toneladas y finalmente se dieron 2 pasadas con el equipo neumático de 7 toneladas. Para perfilar y controlar la pendiente del pavimento se utilizaron niveles a cada lado de las guarniciones. En zonas de difícil acceso se utilizó un compactador manual para alcanzar el peso volumétrico compacto de proyecto.

El curado de la superficie del pavimento de CCR se realizó con agua por un periodo de una semana.

El carril fue abierto al tráfico después de 60 horas de haber sido construido.

En el comportamiento del pavimento a largo plazo no se presentó agrietamiento después de las 72 horas, debido a que la longitud del tramo es muy pequeño (30m). El patrón de agrietamiento que siguen las juntas de contracción transversales del pavimento de CCR es de 15 a 20 m.

Por otra parte, a los 21 días de la construcción se presentó una ligera pérdida de finos en la superficie del pavimento. Esto debido a que se dió un pequeño riego de material fino (sellado) después de la compactación final.

De acuerdo a la experiencia obtenida se pueden dar algunas recomendaciones:

- 1.- Para obtener el proporcionamiento óptimo habrá que realizar diferentes mezclas de CCR en laboratorio y en campo.
- 2.- El modulo de ruptura se obtendrá mediante el ensaye de vigas con carga en los tercios.
- 3.- El tiempo de elaboración de la mezcla de CCR, transporte, tendido, y compactación no deberá ser mayor a una hora.
- 4.- No se debe sobre compactar el pavimento de CCR, ya que esto en lugar de beneficiarlo, lo perjudica.
- 5.- La compactación de zonas de difícil acceso, se podrá realizar con equipos manuales y dentro del tiempo especificado.
- 6.- No realizar riegos de materiales finos en la superficie del pavimento después de que ha terminado la compactación, pues al abrir el pavimento al tránsito pueden perderse.
- 7.- El tiempo de curado del pavimento es muy importante y será benéfico que se mantenga durante una semana.
- 8.- Es conveniente obtener relaciones previas entre el peso volumétrico compacto del lugar y el número de pasadas del equipo seco máximo.
- 9.- Es conveniente realizar algunos ensayos utilizando la pista circular de pruebas, para proponer ayudas de diseño.
- 10.- Es importante seguir el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil, a fin de corregir deficiencias en proyectos futuros.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

El procedimiento de compactación del concreto por medio de rodillos no es tan novedoso como puede pensarse. de acuerdo a la información recabada, su aplicación documentada data desde los años cuarentas, pero no es sino hasta mediados de los setentas, cuando se organiza y estructura, tanto en sus aplicaciones en presas como en pavimentos, esto obedece al desarrollo del equipo para tener un mejor control en la calidad de los componentes del concreto, su colocación y estudios de laboratorio necesarios e indispensables. Se comprende que la aplicación de la técnica del CCR requiere de personal capacitado y equipo apropiado para los trabajos de construcción, por lo que su aplicación se ve limitada a volúmenes de concreto por colocar que justifiquen su utilización.

La decisión para aplicar esta técnica requiere de un estudio económico, de factibilidad y de contar con personal con suficiente experiencia en la técnica del CCR. El estudio económico es indispensable ya que las obras construidas con CCR necesitan inversiones altas para su elaboración viéndose compensadas en bajos costos de mantenimiento, la factibilidad de la obra dependerá de los materiales disponibles, equipo, instrumentos, laboratorios y mano de obra especializada. El conocimiento de las propiedades de los componentes del concreto, cemento, agua y aditivos descritos en el capítulo II son indispensables debido a que el cemento como elemento fundamental del concreto, suele garantizar su calidad dentro de ciertos límites, ya que sus propiedades se encuentran en constante proceso de investigación.

En el laboratorio se investigan las propiedades de los componentes del concreto, por ejemplo en las ecuaciones químicas del cemento, sus coeficientes son determinados por condiciones prácticas o de utilidad para ciertas condiciones establecidas. Lo mismo sucede con los mecanismos de hidratación, precipitación coloidal, algunos procesos de fraguado, etc., no se conoce con absoluta claridad.

Los procedimientos y propiedades de los elementos que componen el concreto descritos en los capítulos II y III corresponden a la investigación, recopilación de notas de clases, textos de catedráticos de la facultad de ingeniería de la UNAM, observaciones y experiencias adquiridas en el desarrollo de la profesión, con el propósito de tener un concepto lo más claro posible de lo que es, sus principales características y aplicaciones prácticas. De esta forma conocer su manifestación en los procesos en los que se utiliza.

Una vez determinadas las características de la mezcla para la obra por construir, el siguiente paso es su elaboración y colocación en el sitio para lo cual existe actualmente equipo para producir, transportar, extender y compactar homogéneamente las mezclas de concreto, la selección para la utilización de estos equipos es función directa del tipo de obra ó proyecto, tamaño de la obra, tiempo de ejecución, recursos económicos disponibles y reparación ó suministro de refacciones del equipo.

Es importante tener presente la inversión en el equipo que se utilizará para la colocación y consolidación del CCR ya que como se vió en el capítulo IV, la forma de compactar el CCR es mediante equipo pesado como el que se utiliza para movimiento de tierras, esto da idea de los volúmenes de materiales que se mueven en las obras construidas con CCR y el tiempo de la obra.

De lo expuesto en el capítulo V podemos decir que el concreto rodillado conocido también como rolacreto o CCR, se define como la mezcla formada por grava de tamaño máximo de 3" (76.2 mm), arena con finos no plásticos o con cenizas volantes, cemento y agua. Se compacta mediante vibración externa con rodillo liso. El contenido de cemento será del orden de 4% al 7% en porcentajes que corresponden a consumos aproximados de 85 kg/m³ a 170 kg/m³, no dependiendo directamente de determinar la relación agua-cemento ni tampoco las relaciones grava-arena como ocurre en el caso del concreto convencional.

Esta técnica es sin duda altamente ventajosa en la construcción de presas de gravedad y pavimentos, sin embargo, para obtener resultados favorables es necesario tomar en cuenta que esta técnica requiere básicamente de la experiencia que se tenga en la elaboración de la mezcla y su colocación. También es imprescindible que muchos conceptos derivados del uso del concreto convencional y suelos compactados sean modificados y no aplicados automáticamente al CCR por que solamente lograría reducir muchos de los beneficios de esta técnica cuya aplicación correcta y razonable origina una más rápida ejecución y reducción de costos.

Debido al acelerado ritmo de colocación del CCR y al hecho de que varias capas pueden ser cubiertas en pocas horas, los resultados de probeta tienen más bien un valor estadístico, no siendo un método apropiado de control de calidad, siendo más práctico el control durante la construcción sobre la densidad y contenido de humedad, resultando indispensable para ello una correcta supervisión y dirección de los trabajos.

Una de las ventajas del concreto rodillado en terminos generales es la economía derivada del consumo mucho menor del cemento para la elaboración de mezclas, así como la rapidez y facilidad de su colocación en comparación con las estructuras erigidas con concreto convencional.

A pesar de la poca experiencia que se tiene en la técnica del concreto compactado con rodillos se ha podido observar grandes ventajas desde el punto de vista técnico en comparación con otras técnicas aplicables.

Por lo anterior consideramos que el CCR ha llegado en forma definitiva para impulsar el proceso de modernización de la infraestructura nacional.

BIBLIOGRAFIA

B I B L I O G R A F I A

1. Cartilla de Concreto.- IMCYC
2. Catalogos de Aditivos para concreto.- Poldi S.A. auxiliar de la construccion Tecnocreto S. A. de C. V.
3. Concreto.- Marco Aurelio Torres H.- Editorial Patria
4. Concreto compactado con rodillos, IMCYC, octubre 26,1988.
5. Concrete Construction Publications, Inc., March 1986.
6. Concrete Information, Portland Cement Association 1987.
7. Diseño de Concreto Armado.- Noel J. Everard y John L. Tanner.- Editorial MacGraw Hill
8. Diseño Simplificado de Concreto Reforzado.- Harry Parker.- Editorial Limusa
9. Hormigon.- Juan Machimbarrena.- Editorial Calpe
10. Ingenieria hidráulica en Mexico. Vol. I num 1-11, Epoca, septiembre-diciembre, 1985.
11. Kenneth D. Hansen. "Roller Compacted Concrete" American Society of Civil Engineers mayo 1985.
12. Manual Fester de Mexico, S.A.
13. Moffart, A.I.B. y Price, A.C. "The Rolled Dry Lean Concrete Gravity Dam" Water Power and Dam Construction, Julio 1978.
14. Patologia de las Construcciones de Hormigón Armado.- Jean Blevot.- Editorial Técnicos Asociados, S.A.
15. Problemas en el cemento publicacion IMCYC.
16. Roller Compacted Mass Concrete, ACI 207, 5R-89.
17. Schrader, E.k. "The First Concrete Gravity Dam Designed and Built for Roller Compacted Construction Methods". Concrete International, octubre 1982.
18. Sika, Duro roc.
19. Steven H. y William C. Panarese "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", IMCYC, 1992.

B I B L I O G R A F I A

20. Tecnologia del Concreto.- IMCYC
21. Tratado de Construccion.- Miguel Saad Antonio.- Editorial Continental