

706
2 eje.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EL USO DE LA TÉCNICA DEL CONCRETO
COMPACTADO CON RODILLO (CCR) EN LA
CONSTRUCCIÓN DE PRESAS EN MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

JUAN ELLIOT RUBIO TARANO



MEXICO, D. F.

OCTUBRE DE 1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-125/94

Señor
JUAN ELLIOT RUBIO TARANO
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. LUIS MANUEL SALMONES HERNANDEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

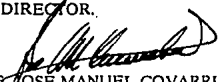
**"EL USO DE LA TECNICA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO
(CCR) EN LA CONSTRUCCION DE PRESAS EN MEXICO"**

- I. INTRODUCCION
- II. CEMENTO PORTLAND
- III. CENIZAS VOLANTES
- IV. CONCRETO TRADICIONAL Y CONCRETO RODILLADO
- V. PRESAS DE MEXICO CONSTRUIDAS CON CONCRETO RODILLADO
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted 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 le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá 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 12 de agosto de 1994
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS
JMCS/RCR*nl1

Agradecimientos:

A mis padres,

por todos estos años de apoyo, resistencia y paciencia jobiana.

A mis hermanos y familia extensa,

por ser lo que son.

A mis amigos los panchos y respectivas damas,

por ídem.

A mis amigos de la Facultad,

por haber quitado muchos obstáculos del camino.

Al MI Luis M. Salmones, Hernández,

por su interés mostrado en la realización de este trabajo, así como por la asesoría e información que me proporcionó y que hicieron posible la terminación de esta obra.

Al Ingeniero Carlos Toranzo Calles,

por la valiosa información que me ofreció.

A la Facultad de Ingeniería,

por ser la mejor.

A Arta y Diseño y a Vapasa,

por las múltiples impresiones preliminares.

" El alivio que habrá sentido César en la mañana de Farsalia, al pensar: Hoy es la batalla.

El alivio que habrá sentido Carlos Primo al ver el alba en el cristal y pensar: Hoy es el día
del palibulo, del coraje y del hacha.

El alivio que tú y yo sentiremos en el instante que precede la muerte, cuando la suerte nos
desata de la triste costumbre de ser alguien y del peso del universo. "

- Trifida - Jorge Luis Borges

Índice:

I.- Introducción

II.- Cemento portland

II.1.- Introducción

II.2.- Cemento portland

II.2.1.- Características físicas

II.2.2.- Características químicas

II.3.- Hidratación del cemento portland

II.4.- Tipos de cemento portland

II.5.- Cementos hidráulicos especiales

III.- Cenizas volantes

III.1.- Introducción

III.2.- Características físicas

III.3.- Características químicas

III.4.- Hidratación de cementos con cenizas volantes

III.5.- Efectos inducidos por las cenizas volantes

III.6.- Diferencias en la hidratación de conglomerantes puros y conglomerantes con cenizas volantes

III.6.1.- Porosidad

III.6.2.- Calor de hidratación

III.6.3.- A nivel de resistencias

III.6.4.- Carbonatación

IV.- Concreto tradicional y concreto rodillado

IV.1.- Introducción

IV.2.- Componentes del concreto

IV.3.- Tipos de concreto

IV.4.- Características físicas del concreto

IV.5.- Concreto compactado con rodillo (CCR)

IV.5.1.- Generalidades

IV.5.2.- Respecto al material

IV.5.3.- Acerca del diseño

IV.5.4.- Respecto a la construcción

IV.5.5.- Propiedades del CCR

IV.5.5.1.- Resistencia

IV.5.5.2.- Propiedades elásticas

IV.5.5.3.- Fluencia

IV.5.5.4.- Cambio de volumen

IV.5.5.5.- Capacidad de alargamiento

IV.5.5.6.- Permeabilidad

IV.5.5.7.- Durabilidad

IV.5.5.8.- Peso unitario

V.- Presas de México construidas con concreto rodillado

V.1.- Generalidades

V.2.- Presas construidas en México con concreto compactado con rodillo

**V.3.- Análisis de las ventajas y desventajas del uso de concreto rodillado
en presas mexicanas**

V.4.- Perspectivas

VI.- Conclusiones

Bibliografía

Capítulo I: Introducción

El grado de complejidad que han alcanzado las modernas sociedades en los dos últimos siglos, provocado en gran medida por descubrimientos e inventos que generaron nuevos esquemas de producción y de organización social ha obligado al hombre a tener los recursos naturales al alcance de su mano; esto sin embargo, no es siempre posible y por ello ha tenido la necesidad de crear formas de almacenar dichos recursos, de esta manera han surgido modelos que le han permitido el uso eficiente de las materias primas; es decir, ha podido almacenar recursos cuando estos han abundado y los ha utilizado en períodos de escasez, contrarrestando así los ciclos no benéficos e irregulares de la naturaleza.

Desde el inicio de su historia, la humanidad ha tenido que luchar contra fenómenos naturales de diversa índole, dos de los cuales están relacionados con el agua: inundaciones y sequías.

Si bien es cierto que el agua a través de su ciclo es la causante de la vida en la tierra, también es cierto que en numerosas ocasiones ha originado la desaparición de culturas enteras; por este motivo el hombre intentó (y continúa haciéndolo), regular la presencia del vital elemento por medio de su ingenio y

efectuando los recursos técnicos y económicos de que ha dispuesto en diferentes etapas de su historia.

La evolución científica, tecnológica y socioeconómica en este renglón, ha tenido como culminación la construcción de presas que actualmente abundan en el planeta, con la adición de que estos sistemas ya no son solamente elementos para el control de avenidas o de suministro de agua en tiempos de sequía, sino también son una fuente importante de generación de energía eléctrica, han creado áreas de riego aledañas e incluso se utilizan como zonas de pesca y de recreación.

En este siglo, en la década de los sesenta, surge una nueva tecnología que prometía la construcción de presas de manera más rápida y económica, pues el equipo y técnicas necesarias para su implementación eran similares a las utilizadas en movimientos de tierras y fue denominada "Roller Compacted Concrete" o "Concreto Compactado con Rodillo".

Las presas u obras de almacenamiento están constituidas por varios elementos:

- Vaso
- Cortina
- Obra de desvío

- **Obra de Toma**
- **Obra de excedencias**

Debido a que la parte más distintiva es sin duda alguna la cortina, una clasificación muy aceptada es con base a este elemento, pudiendo ser su altura, su propósito, o bien el tipo y los materiales empleados en su construcción el criterio usado para tal clasificación.

El presente trabajo enfocará su atención a las presas de concreto, contenidas en la clasificación que tiene en cuenta el tipo y los materiales empleados en la construcción de la cortina.

Sobre una presa las fuerzas principales que actúan son: el empuje hidrostático, la presión intersticial y los efectos térmicos, siendo los dos primeros aplicables a cualquier tipo de presa, en tanto que el efecto térmico sólo es trascendente en las presas de hormigón.

Las presas de fábrica cumplen con las solicitaciones estructurales de resistencia, sin embargo, debido al grosor de las tongadas la generación de calor ocasionada por la hidratación del cemento aunada a la baja capacidad del concreto para disipar tal incremento de temperatura, tiene como consecuencia la generación de esfuerzos adicionales a tensión que pueden generar pronunciados agrietamientos.

Los incrementos de temperatura cuando se utiliza cemento portland normal, se llevarán a cabo en los primeros días (50 % entre el primer y tercer día, al séptimo día el 75 %); por lo que es importante controlar en estos períodos cortos de tiempo dichos deltas de temperatura. Su control ha sido posible gracias al uso de puzolanas naturales o artificiales en la fabricación del hormigón.

El principal objetivo de este trabajo es presentar un balance de ventajas y desventajas que la técnica del concreto compactado con rodillo (CCR) o concreto seco ha tenido en la fabricación de presas en el país; esto es, con la utilización de concreto fabricado con cemento puzolánico, o bien concreto al que se le ha añadido puzolanas tales como las cenizas volantes.

Para arribar a esto será necesario tocar varios temas antes de abordar el punto principal. Así, en el capítulo II se hablará del cemento portland; en el episodio III se departirá de un tipo particular de puzolana: las cenizas volantes; en el capítulo IV se tocará el tema concreto tradicional y concreto rodillado; el capítulo V mostrará los trabajos que se han llevado a cabo en México con el uso de concreto seco en la construcción de presas y los resultados obtenidos, así como las perspectivas que tiene el uso de este sistema en la fabricación de presas en el país; finalmente en el apartado VI se darán las conclusiones del trabajo.

Capítulo II: Cemento portland

II.1.- Introducción

Dentro de los aglomerantes más utilizados en la actualidad están los cementos hidráulicos, siendo el cemento portland el más difundido de ellos.

El uso de materiales conglomerantes tiene más de 2000 años de historia, sin embargo, no fue sino hasta 1842 cuando Joseph Aspdin obtuvo un material que mezclado con agua y arena, y cocido a temperaturas relativamente bajas, formaba un conglomerante endurecido con aspecto semejante a las calizas de la Isla Portland. Posteriormente Isaac C. Johnson tomó únicamente las partes más cocidas del proceso Aspdin y las molió finamente y, en 1845 obtiene el cemento portland elevando notoriamente las temperaturas de cocción hasta lograr la sintetización de la mezcla.

Los **cementos hidráulicos** se definen como aquellos que no sólo reaccionan con el agua, sino que también forman un producto resistente a ella. Los cementos derivados de la calcinación del yeso o de carbonatos tales como piedras calizas son llamados **cementos no hidráulicos** porque sus productos de hidratación no son resistentes al agua; a este tipo pertenecen los morteros

de cal que se utilizaron en construcciones antiguas y que fueron convertidos en hidráulicos por adición de materiales puzolánicos que al reaccionar con la cal produce un cemento resistente al agua.

II.2.- Cemento portland

Comparado con los cementos de yeso y cálcicos, el cemento portland y sus múltiples modificaciones son los más importantes utilizados en nuestros días para la fabricación de estructuras de concreto. Esto se debe a que el cemento portland es verdaderamente hidráulico; no requiere la adición de elementos puzolánicos para tener un producto con propiedades que lo hagan resistente al agua.

De acuerdo con la ASTM C 150 el cemento portland se define como un cemento hidráulico producido por la pulverización de clinkers consistentes esencialmente de silicatos cálcicos hidratados, conteniendo usualmente una o más de las formas del sulfato de calcio como una adición combinada de elementos. El cemento portland se fabrica por calcinación de una mezcla de caliza y arcilla u otros materiales de composición global similar, a una temperatura que provoca una fusión parcial (unos 1400-1500 °C), consiguiendo la combinación prácticamente completa de sus componentes. El producto, llamado clinker, es una mezcla a base de silicatos y aluminatos de calcio, que se muele y se mezcla con un porcentaje pequeño de yeso. Los

clinkers son nódulos de entre 5 - 25 mm de diámetro de un material artificial que es producido cuando una mezcla cruda de determinada composición es horneado a altas temperaturas.

Entre todos los cementos usados en la industria de la construcción descuellan el cemento portland artificial.

El proceso de fabricación puede ser de dos formas: vía húmeda y vía seca. En el primer caso, las primeras materias (piedra caliza y arcilla) son machacadas y desleídas en agua hasta que forman un fango con el cual se ha de cargar el horno; en el procedimiento por vía seca, entretanto, los materiales son reducidos a un polvo fino que se introduce directamente en el horno después de haberlo humedecido ligeramente. En el sistema de vía húmeda el material se seca por evaporación, lo que implica mayor consumo de energía y hornos de mayor capacidad, por lo que este sistema ha entrado en desuso.

En ambos casos la mezcla se cuece a una temperatura de 1450 ° C, que permite la combinación integral de sus componentes (cal, sílice, alúmina y óxido de hierro). Los hornos generalmente utilizados son giratorios y alcanzan dimensiones gigantescas: 150 - 200 m de largo, de 5 - 7 m de diámetro, con una pendiente de un 5 % aproximadamente, girando del orden de 180 revoluciones por hora y llegando a producir hasta 6000 toneladas al día.

El caldeo se efectúa con carbón pulverizado o con aceites pesados. El material extraído de la caldera es triturado hasta obtener un tamaño entre 20 y 25 mm (e incluso menores para incrementar el rendimiento de los molinos), posteriormente se procede al secado y a continuación el material resultante se conduce a los dosificadores donde se da la proporción adecuada de cada una de ellos.

Una vez que el material está seco, molido y dosificado, se introduce al horno donde la mezcla entra por la parte más elevada con temperaturas más bajas y a medida que desciende se incrementa hasta los 1450 ° C.

En el recorrido la mezcla sufre diversas reacciones químicas a causa de la temperatura. Al final del trayecto quedará formado el clinker. La cocción de clinckas, una vez enfriadas, se muelen con un poco de yeso destinado a regularizar el fraguado, dependiendo del contenido de aluminato tricálcico que contiene el clinker, se agregará entre el 3 y 5 % en peso. El producto final es ensacado automáticamente, salvo cuando se ha de usar a granel en alguna obra muy importante. La figura 2.1 resume los pasos que se siguen en la fabricación del cemento portland.

Fabricación del cemento portland: 1. Caliza; 2. Arcilla; 3. Desleimiento; 4. Desmenuzamiento;
5. Dosificación; 6. Machacado; 7. Pulverización; 8. Homogeneización;
9. Pasta; 10. Horno; 11. Enfriamiento; 12. Clínica; 13. Gipso;
14. Dosificación; 15. Alto horno;
16. Granulación de las escorias en el agua;
17. Ecurrido; 18. Secado; 19. Machacado; 20. Silos; 21. Ensacado.

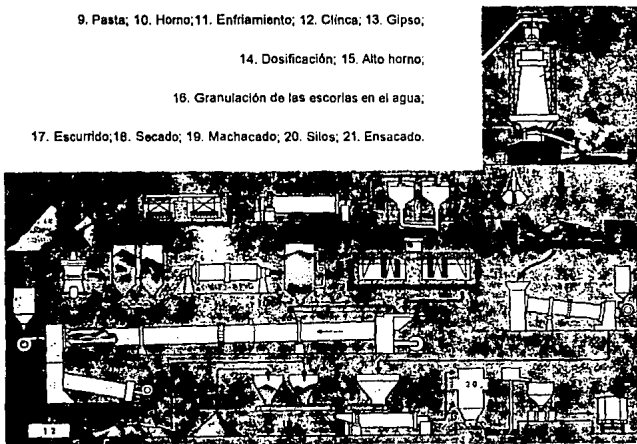


Figura 2.1.- Diagrama de flujo del proceso seco para la fabricación del cemento

II.2.1.- Características físicas

Las características físicas más importantes del cemento son: finura de molido, peso específico, granulometría y forma de las partículas.

La *finura de molido* es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y primer endurecimiento. A un mayor grado de finura le corresponde una mayor superficie de exposición a las reacciones de hidrólisis y, por lo tanto, a un mayor desarrollo inicial de resistencias y poder hidráulico.

La mayoría de los autores admiten que la fracción granulométrica de un cemento de 3 a 30 micras es la que da lugar prácticamente al desenvolvimiento de resistencias.

Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos, hecho que en general, resulta perjudicial. Dado que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se adopta una situación de compromiso: el cemento portland debe estar finamente molido pero no en exceso.

La finura de un cemento se mide por el porcentaje de residuo en diferentes tamices (véase la tabla 2.1) entre los que se encuentran el de 900 y 4900 mallas/cm² y determinando su superficie específica por algún procedimiento adecuado, siendo el método Blaine el más solicitado, que se obtiene a partir de la permeabilidad al aire que pasa a través de cilindros de cemento compactados en condiciones estándar. Los valores típicos de la

superficie específica varían entre 2800 y 3600 cm²/g, aunque en algunos casos pueden obtenerse valores mayores, dependiendo del método de medición empleado. La ASTM C 150 - 85 exige un mínimo de 280 m²/kg para todos sus tipos de cementos.

Diámetro (mm)	Superficie (m ² /kg)
3	76.2
2	50.8
1	26.67
3/4	18.85
1/2	13.33
3/8	9.423
1/4	6.680
1/8	4.699
6	3.327
8	2.382
10	1.981
12	1.651
16	1.188
20	0.833
30	0.589
40	0.417
50	0.295
60	0.248
70	0.208
100	0.147
140	0.104
200	0.074
270	0.053
400	0.038

Tabla 2.1 - Tamices utilizados con fines granulométricos

El *peso específico* real varía muy poco de unos cementos a otros, oscilando entre 3.00 y 3.15 g/cm³. La limitación establecida por algunas normas (≥ 3), se cumple prácticamente siempre.

II.2.2.- Características químicas

A pesar de que el cemento portland consiste esencialmente de varios componentes de calcio, los resultados de análisis químicos son reportados en términos de los óxidos de los elementos presentes. Se resumen en la tabla siguiente:

Cal	CaO	65.0
Óxido de silicio	SiO ₂	21.0
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	6.5
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.5
Óxido de fósforo	P ₂ O ₅	2.0
Óxido de magnesio	MgO	2.0
Óxido de sodio	Na ₂ O	0.5
Óxido de potasio	K ₂ O	0.5
Residuo insoluble	R.I.	1.0
Óxido de calcio	CaO	65.0
Óxido de sodio y potasio	Na ₂ O + K ₂ O	1.0

Tabla 2.2 - Óxidos del cemento portland

Los cuatro primeros componentes son los principales del cemento, de carácter básico la cal y de carácter ácido los otros tres y representan más del 90 % en peso, constituyendo las cuatro fases principales del cemento: silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico y fase ferrito. Estos componentes están formados por la combinación de dos o más óxidos principales, los silicatos forman entre el 60 y el 80 % del clíncker. Su descripción se da brevemente a continuación:

- **Silicato tricálcico:** es el componente más importante del cemento, y el responsable de las resistencias obtenidas a temprana edad y continúa aumentándolas paulatinamente desde los 30 días. También es el causante de la liberación de gran cantidad de calor de hidratación ($503 \text{ J/g} = 120 \text{ cal/g}$).
- **Silicato bicálcico:** este componente ayuda al desarrollo de resistencias a edades más avanzadas que el silicato tricálcico, siendo su aportación total tanto o más importante que este último. Una ventaja adicional es que el calor que disipa es de aproximadamente un 50 % del liberado por el silicato tricálcico ($251 \text{ J/g} = 60 \text{ cal/g}$).
- **Aluminato tricálcico:** este compuesto sirve como catalizador en la reacción de los silicatos, su hidratación produce una enorme cantidad de calor ($867 \text{ J/g} = 207 \text{ cal/g}$), de tal forma que se hace necesaria la

incorporación de yeso teniendo cuidado en la dosificación de éste, ya que puede provocar una expansión y consecuente fractura de la pasta.

- **Ferroaluminato tetracálcico:** al igual que el anterior compuesto interviene poco en la evolución de resistencias; puede catalizar la hidratación del cemento y desprende gran cantidad de calor (419 J/g = 100 cal/g).

De estos compuestos y de otros de menor trascendencia, dependerán las características que finalmente posea la pasta tales como el módulo de elasticidad, resistencia, calor de hidratación, etc. En la siguiente tabla se muestran los componentes de más trascendencia del cemento y los minerales que forman.

Nombre	Composición	Mineral
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	AHS
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	BHS
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	AHS
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	CHFS

Tabla 2.3.- Compuestos principales del cemento portland

Los restantes componentes que puede decirse son los indeseables del cemento, se comentan brevemente a continuación:

- **Tríóxido de azufre SO_3** ; el azufre proviene de la adición de piedra de yeso que se hace al clinker durante la molienda para regular su fraguado, pudiendo también provenir del combustible empleado en el horno. Un exceso de SO_3 puede producir el fenómeno de falso fraguado y, en algunos casos impedir el fraguado del cemento. Un contenido en SO_3 inferior al 4 % es aceptable.
- **Oxido cálcico libre CaO** ; si el contenido en CaO libre del cemento es superior al 1.5 o 2 % queda una parte capaz de hidratarse en el transcurso del endurecimiento, lo que puede producir fenómenos expansivos.
- **Oxido magnésico MgO** ; la magnesia puede presentarse en el clinker en estado vítreo (por enfriado energético), o en estado cristalizado (periclasa), siendo esta última forma realmente peligrosa, ya que debido a su lenta hidratación formando hidróxido magnésico $Mg(OH)_2$, puede conducir a un proceso de carácter expansivo. Por ello se limita el contenido de magnesia a menos del 5 %.

- **Pérdida al fuego (PF)**; la pérdida al fuego es una baja de peso que ocurre en un modelo de cemento cuando se expone a una temperatura de entre 900 y 1000 ° C, puede provenir del vapor de agua o del CO₂ presentes en el conglomerado, siendo entonces expresiva de una meteorización del cemento.
- **Residuo insoluble RI**; es generado por la presencia de adiciones de naturaleza silíceas. No debe ser superior al 2.5 - 3 %.
- **Álcalis Na₂ + K₂O**; originadas por lo general, de las materias primas y se volatilizan en buena parte, encontrándose en el polvo de los humos de las fábricas de cementos. No suelen superar el 0.8 %.

II.3.- Hidratación del cemento Portland

En contacto con el agua, este material da lugar a un sólido rígido y prácticamente insoluble aunque se mantenga debajo del agua. Para que pueda producirse este fenómeno, debe ser capaz de reaccionar con el agua para formar partículas que se cohesionen formando un sólido y que éstas sean poco solubles.

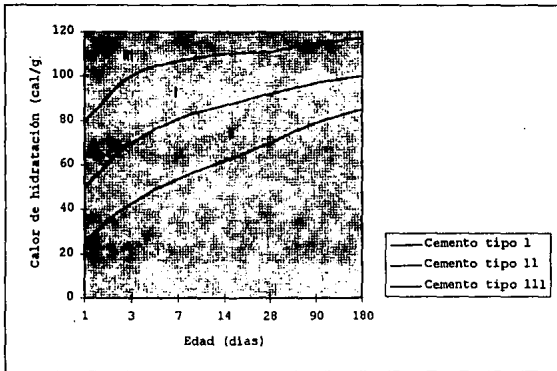


Figura 2.2 - Curva de desprendimiento de calor durante la hidratación del cemento portland.

Los mayores desprendimientos de temperatura en el proceso de hidratación del cemento portland ocurren en los primeros días (50 % entre el primer y tercer día, al séptimo día esta cifra llega al orden del 75 %, como puede observarse en la figura 2.2), en consecuencia, será en este período donde se habrá de tener un cuidado un tanto especial.

En forma breve mencionaremos los dos tipos de reacciones:

- **Hidrólisis**; interacción con el agua de forma tal que el H^+ se asocia con el anión del compuesto y el OH^- lo haga con el catión. Implica solubilidad y disociación iónica.
- **Hidratación**; adición directa de los elementos del agua al compuesto anhidro o parcialmente hidratado. Los cristales del compuesto incluirán a los elementos del agua en su estructura.

El cementante más importante que constituye al cemento portland es el *silicato tricálcico*, que en gran parte reacciona a los 28 días y al cabo de un año habrá reaccionado casi en su totalidad.

El *aluminato tricálcico* reacciona rápidamente con el agua formando un aluminato tricálcico hidratado con escasa capacidad cementante pero que puede causar un fraguado relámpago, a menos que se añada un retardador como el yeso.

Todas las reacciones dependen de determinadas condiciones: composición y finura del cemento, relación agua/cemento, temperatura y proceso de mezcla.

Las reacciones que se producen a través del proceso de hidratación dentro del sistema agua-cemento son muy complejas y no se ahondará más al respecto por no ser el objeto del presente trabajo.

Las resistencias conseguidas por el cemento portland pueden atribuirse:

1. Al pequeño tamaño de las partículas (entre 10 y 100 Å) en forma de fibras alargadas, de sustancias seudomorfas o semiamorfas con capacidad de interacción físico-química.
2. A la formación simultánea de una estructura cristalina de tamaño mayor o igual a una micra, con capacidad de recristalización.

II.4.- Tipos de cemento portland

La necesidad de variar la composición mineralógica del cemento según los requerimientos de las distintas clases de obras, ha dado como resultado una enorme diversidad de tipos de cementos portland e hidráulicos en general.

De acuerdo con la ASTM C 150, el cemento portland incluye las siguientes variedades:

- **Tipo I:** Para usarse en condiciones normales en las que no se requiere ninguna característica especial como las aportadas por las otras clases de cementos. No se imponen límites en los porcentajes de composición a ninguno de los cuatro principales componentes.

- **Tipo IA:** La composición mineralógica es la igual que la del cemento tipo I pero tiene más aire ocluido para casos en los que esta característica es deseada, como en la fabricación de concretos resistentes a heladas.
- **Tipo II:** Para uso general, pero especialmente cuando se necesita una moderada resistencia a la sulfatación y valores de desprendimiento de calor no tan altos. La especificación limita al aluminato tricálcico al 8 %, mientras que la suma de los porcentajes del silicato tricálcico y del aluminato tricálcico tiene un límite máximo del 58 %.
- **Tipo IIA:** La composición es la misma que la del cemento tipo II, pero tiene más aire encerrado para las condiciones que así lo requieran.
- **Tipo III:** Para situaciones en las que se requiere ganar elevadas resistencias a tempranas edades. Posee un alto contenido de silicato tricálcico (70 % como máximo), pero no es este el único responsable de las grandes resistencias, el grado de finura juega un papel tanto o más importante en el desarrollo de estas, pudiendo tomar valores superiores a los 325 m²/kg.
- **Tipo IIIA:** Con las mismas propiedades que el anterior diferenciándose únicamente en que contiene más aire ocluido para cuando esta característica es deseada.

- **Tipo IV:** Utilizado en los casos en los que se necesita un bajo calor de hidratación. Su contenido de silicato tricálcico tiene su límite superior en 35 %, el aluminato tricálcico en 7 % y requiere un mínimo de 40 % de silicato bicálcico.
- **Tipo V:** Usado en los casos en los que se requiere de grandes resistencias a los sulfatos. La especificación señala un límite máximo de 5 % de aluminato tricálcico.

Tabla 2.4.- Compuestos principales de las diferentes clases de cementos

II.5.- Cementos hidráulicos especiales

Los cementos portland no satisfacen todas las necesidades de la industria de la construcción; por esta razón, se han desarrollado cementos especiales que permitan cubrir estos requerimientos. Comparados con los cementos portland, su volumen de producción es pequeño y sus precios son

generalmente altos, pero debido a sus características únicas merecen ser mencionados:

- **Cementos mezclados:** La ASTM 595, especificación estándar de cementos hidráulicos mezclados, incluye cinco clases de cementos, pero comercialmente la producción se limita a dos:
 - 1.- Tipo IS; consiste en una mezcla uniforme de cemento portland y escorias finas de altos hornos, las escorias constituyen entre el 25 y 70 % del peso de la mezcla resultante.
 - 2.- Tipo IP; consiste de una mezcla uniforme de cemento portland (o cemento portland de escorias de altos hornos) y puzolana muy fina en la que el contenido de puzolana oscila entre el 15 y el 40 % del peso total del cemento.
- **Cemento blanco:** es producido por la pulverización de clinker blanco de cemento portland. El color gris que ordinariamente presenta el clinker del cemento portland, se debe a la presencia de hierro; en contraste, en la fabricación del cemento blanco se emplean arcillas y rocas de carbonato libres de hierro y combustibles más limpios como el gas. En consecuencia el precio resultante es tres veces mayor al del cemento portland normal.

- **Cemento de color:** la mayoría se deriva de la adición de pigmentos al cemento blanco, pero algunos son producidos por clinkers que tienen los colores correspondientes.

Capítulo III: Cenizas Volantes

III.1.- Introducción

Dentro de las puzolanas más utilizadas con el fin de sustituir parcialmente al cemento (con el objeto de reducir el calor de hidratación del concreto) y para ajustar la curva de los agregados finos (dándole mayor trabajabilidad a la mezcla), se encuentran ciertas clases de limos inorgánicos, los propios cementos puzolánicos (o de bajo calor de hidratación), las cenizas volantes cementantes y no cementantes, entre otras. En este apartado se hablará únicamente de las cenizas volantes por considerárselas como las más representativas de las puzolanas empleadas en estos tipos de trabajos; cabe hacer la aclaración, que su uso en México ha sido limitado, optándose más por los cementos puzolánicos, sin embargo, al explicarse el comportamiento de las cenizas volantes se entenderá mejor el accionar de los cementos puzolánicos así como el de los limos inorgánicos y otras especies de puzolanas.

Las cenizas volantes son los residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas con carbones pulverizados.

Por lo tanto, son subproductos industriales, con gran volumen de producción (aproximadamente 10 millones de toneladas al año), de la cual únicamente se utiliza el 20 %. Esto significa una importante inversión para su almacenamiento y crea problemas ecológicos graves.

Las cenizas constituyen un tipo de adición activa en el que más claramente se pueden dar de manera simultánea dos tipos de acción: química (puzolánica) y física (dispersante), además de una acción substitutiva o complementaria de finos en el hormigón, cuando estos faltan en las fracciones más pequeñas de los áridos del mismo.

La función de las cenizas volantes adicionadas a la masa de concreto es la de reducir, en la medida de lo posible, el calor de hidratación a cambio de una pérdida de resistencia a tempranas edades, resistencia que se recuperará más adelante. Para que esto sea posible, es necesario hacer un estudio profundo de las características de las cenizas de tal forma que se llegue a una dosificación adecuada en la mezcla.

III.2.- Características físicas

Las características físicas de las cenizas volantes son función del proceso de eficiencia de las centrales térmicas. Las más destacables son:

- **Finura;** el 80 % pasa el tamiz No. 200 (74 micras), quedando retenido en el tamiz No. 5 (300 micras) un porcentaje muy pequeño. Las partículas más gruesas tienden a ser más ricas en cuarzo residual, el cual es inerte en las condiciones ordinarias del hormigón, por lo que actúan más como finos inertes que como componentes activos.

La finura de las partículas influye en la velocidad de resistencias y en los valores relativos de las mismas. Influye también en la forma de desarrollo del calor de hidratación: se adelanta o retrasa el pico de máxima generación de calor. Este parámetro se relaciona, además, con la actividad puzolánica y con la exigencia y retención del agua en el concreto.

- **Superficie específica;** con el permeabilímetro Blaine los valores que se obtienen son entre 1000 y 3000 cm^2/gr para las más gruesas y por encima de 3000 cm^2/gr para el resto.
- **Forma de las cenizas;** las partículas de menor tamaño se enfrían y solidifican rápidamente conservando la forma esférica del estado de fusión. La ubicación de las cenizas de acuerdo con el factor de forma indicará su efecto potencial en el comportamiento fluido de pastas de cemento y concreto.

- **Peso específico;** cuando se utilicen cenizas volantes para sustituir cemento se deberá tener en cuenta que tiene un peso específico menor (de 1.9 a 2.4 g/cm³), esto significará un incremento de volumen del material conglomerante.

III.3.- Características químicas:

Las características químicas de las cenizas dependen principalmente del tipo de carbón de procedencia.

Las puzolanas son materiales sílico-aluminosos, pero es conveniente hacer una distinción entre las partículas gruesas, ricas en cuarzo residual y que por lo tanto actúan más como finos inertes en el hormigón; en tanto que las finas, que presentan un mayor contenido en álcalis tienden a constituir la parte reactiva de las cenizas.

En Europa (Francia y España) se clasifica a las cenizas volantes como sigue:

- **Sílico-aluminosas;** aquellas puzolanas que reaccionan lentamente con la cal y los álcalis. Clase F de la tabla 3.1.
- **Sulfocálcicas;** son aquellas hidráulicamente activas, forman rápidamente aluminato cálcico hidratado. Clase C de la tabla 3.1.

- **Silicocálcicas**; forman etringita, aluminato cálcico hidratado y gehlenita hidratada. Se ubica entre las clases F y C de la tabla 3.1.

Clase F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$
	$\text{SO}_3 < 5\%$ L.O.I. < 6% (hasta 12%) Opcional: Na_2O equivalente < 1.5 % Con propiedades puzolánicas
Clase C	$\text{Si}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$
	$\text{SO}_3 < 5\%$ L.O.I. < 6% Opcional: Na_2O equivalente < 1.5 % Con propiedades puzolánicas

Tabla 3. 1.- Clasificación de las cenizas según la ASTM

Los ensayos mecánicos indican que el efecto de las cenizas volantes en las resistencias de los morteros y concretos elaborados con sus mezclas va a estar muy influenciado por el tipo de cemento que se utilice en las mismas.

III.4.- Hidratación de cementos con cenizas volantes

Las cenizas volantes presentan la misma composición en óxidos que el clinker del cemento portland. Por consiguiente, en la hidratación de conglomerantes elaborados con mezclas de ambos, se originan los mismos productos de hidratación que un cemento puro normal, siendo previsible que tanto los mecanismos de formación como las distintas etapas por las que transcurre el proceso de hidratación sean análogos:

- **Disolución;** etapa en la que se produce la saturación progresiva de la fase líquida.
- **Coloidización;** en la que se produce la precipitación de partículas coloidales. Corresponde al principio de fraguado.
- **Cristalización;** los geles se transforman en agregados cristalinos.

III.5.- Efectos inducidos por las cenizas volantes

Las cenizas son un material activo que reacciona con la cal dando hidratos, contribuyendo de esta forma al aumento del volumen de productos que son responsables del desarrollo de resistencias.

El hecho de introducir cenizas volantes en el conglomerante induce una serie de comportamientos que se pueden considerar en dos grandes grupos:

- **Los de carácter físico - químico;** las cenizas reducen la demanda de agua al ser sus partículas más finas absorbidas o pegadas a los granos de cemento de mayor tamaño que ellas. Manteniendo una trabajabilidad constante, esta reducción de agua para cualquier combinación de áridos, va a ser función del tipo y cantidad de cenizas, y de la clase de cemento. Cuando la cantidad de cenizas añadida excede del 60 % la clase a la que pertenezcan se hace menos importante. El reemplazo de cantidades importantes de cemento por cenizas entraña un riesgo práctico, a menos que las propias cenizas contengan sulfato cálcico disponible rápidamente, el yeso de equilibrio del sistema puede verse afectado, influenciando las respuestas al fraguado y la hidratación inicial.
- **Efectos estructurales;** se produce una formación sobre la superficie de las cenizas de una película de hidróxido cálcico recubierta con una capa dispersa de gel de cal, sílice y agua, recubrimiento similar al que se produce en otros componentes inertes. Se genera una densificación y modificación de esta primera capa formando un recubrimiento bastante impermeable y denso.

III.6.- Diferencias en la hidratación de conglomerantes puros y conglomerantes con cenizas volantes

III.6.1.- Porosidad

La porosidad tiene un papel protagónico en el desarrollo de las resistencias mecánicas de las pastas de cemento. Si la porosidad se reduce se incrementan las resistencias a causa del aumento de los productos de reacción y posterior endurecimiento de los mismos.

Además de los áridos fino y grueso que pueden considerarse constantes para cada mezcla, la fase sólida de los concretos con cenizas consta de:

- **Cemento anhídrido**
- **Productos de hidratación del cemento**
- **Cenizas volantes**
- **Productos de la hidratación puzolánica de las cenizas**
- **Portlandita**
- **El agua retenida en los microporos de los geles**

Con la introducción de cenizas volantes la estructura porosa se alterará por dos factores:

1. Por reducción de la cantidad de agua requerida para mantener una trabajabilidad.
2. El relleno más lento de los huecos por parte de los productos de reacción cenizas - cal.

La reducción de la relación agua/cemento (a/c) en la mixtura tiene como efecto inmediato la disminución de la porosidad total.

La diferencia más llamativa entre el hormigón tradicional y el que posee cenizas es que en el segundo el volumen de poros mayores de 0.01 micras se reduce bruscamente con la edad, mientras que en el convencional el volumen de poros que influye en la porosidad es aún relativamente alto. En ambas clases de concretos, un curado inadecuado inducirá un aumento rápido del volumen de poros que afectan a la permeabilidad, siendo el periodo más crítico el comprendido en los primeros 7 días. Dado que el deterioro del hormigón se produce principalmente por la introducción de sustancias reaccionantes en él, la eliminación de los poros grandes continuos puede relacionarse con la función de vida de la estructura y por ello con su durabilidad.

III.6.2.- Calor de hidratación

La hidratación del hormigón con cenizas volantes es más lenta y, por eso, se reduce la velocidad de generación del calor de hidratación. De hecho, la utilización de cenizas en el hormigón de grandes presas fue, en principio, un intento de reducir el calor de hidratación y con ello las deformaciones térmicas que originan la fracturación.

III.6.3.- A nivel de resistencias

Para una determinada relación agua/cemento, la resistencia del hormigón con cenizas a edades tempranas es menor que la del cemento ordinario. El principal efecto a tener en cuenta en el diseño de hormigones con cenizas es el que producen en la trabajabilidad de la mezcla. Dado que la principal propiedad física de las cenizas es su aptitud para disminuir la demanda de agua sin pérdida de docilidad, el diseñador intentará usar tantas cenizas como le sea posible sin que se produzcan pérdidas de resistencia. Sin embargo, debe tener muy en cuenta que la relación entre la resistencia del hormigón con cenizas y la relación agua/conglomerante es mucho más sensible a los cambios de contenido en agua que el hormigón tradicional de cemento puro. En este sentido hay que señalar que para obtener una resistencia a compresión aceptable con altas sustituciones de cenizas es necesario reducir

la relación a/c a niveles para los que la trabajabilidad es tan reducida que hacen necesario la modificación de los métodos tradicionales de manejo.

Los resultados que se han obtenido indican que a tempranas edades habrá una mayor proporción de superficie inconsolidada (interfase) cuanto más elevada sea la cantidad de cenizas, lo cual inducirá la disminución de las resistencias iniciales. A edades tardías, el efecto anterior se verá atenuado por la consolidación de la interfase. En este periodo los productos de hidratación ya son análogos a los tipos I y III del silicato cálcico hidratado.

III.6.4.- Carbonatación:

Este fenómeno se produce cuando el CO_2 atmosférico penetra en el hormigón y reacciona con Ca(OH)_2 . La velocidad de carbonatación depende de la permeabilidad, por ello, en un hormigón de baja permeabilidad y poros de diámetro pequeño, disminuirá la velocidad de penetración del CO_2 .

El proceso de carbonatación no es fácil de predecir ya que depende no sólo de las propiedades del hormigón, sino también de las condiciones ambientales del hormigón en servicio.

Los factores de los que depende la carbonatación del concreto pueden ser:

- **Factores externos:**

1. Humedad relativa
2. Temperatura
3. Presión

- **Factores internos:**

1. Relación agua/cemento
2. Contenido de cemento
3. Naturaleza y finura de los elementos secundarios
4. Porosidad y permeabilidad del hormigón

Capítulo IV: Concreto tradicional y

concreto rodillado

IV.1.- Introducción

El hormigón como material de construcción es el producto más utilizado en el mundo por varias razones: en primer lugar posee una gran resistencia al agua y a todo tipo de medio ambiente, lo que representa una enorme ventaja contra otros materiales como la madera y el acero; en segundo término se encuentra la facilidad con la que diferentes elementos estructurales pueden ser moldeados en distintas formas y tamaños, esto gracias a que el concreto fresco es de consistencia plástica y le permite al material fluir en una cimbra prefabricada que además se puede reusar algunas horas después ya que el concreto ha endurecido; el tercer motivo de la popularidad del hormigón es que generalmente es el más rentable material de construcción debido a que los ingredientes para su fabricación (tanto del cemento portland como de los agregados), son relativamente baratos y abundantes en todas partes. Además de éstas ventajas, la energía requerida para producir hormigón es considerablemente menor a la necesitada para fabricar otros materiales de construcción y, se puede agregar, que grandes cantidades de desechos

industriales pueden reciclarse utilizándose como sustitutos de materiales cementantes o de agregados en el concreto, lo que convierte al hormigón en un material muy atractivo en estos días y en el futuro.

IV.2.- Componentes del concreto

El concreto es un material que consiste esencialmente de un medio cementante dentro del cual hay fragmentos de agregados empotrados. En los concretos con cemento hidráulico, el cementante está formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua.

Los elementos que constituyen al concreto son los siguientes:

- **Agregado;** son materiales granulares tales como la arena, la grava, piedra triturada o escorias de hierro de altos hornos, usados con un medio cementante para formar concretos de cemento hidráulico o morteros. El término *agregado grueso* se refiere al agregado cuyas partículas son mayores a 4.75 mm (malla No. 4), en tanto que se designa con el nombre de *agregado fino* a las partículas menores a 4.75 mm pero mayores a 75 micromicras (malla No. 200). La grava es el agregado grueso resultado de la desintegración y abrasión natural de rocas o bien, procedentes de conglomerados limitados y poco compactados. El vocablo *arena* es comúnmente utilizado para agregados finos resultantes de la desintegración y abrasión natural de rocas o procedentes de minas de

arena. Estas se subdividen a su vez en gruesas (su tamaño está comprendido entre 2 y 5 mm) y finas (entre 0.08 y 2 mm). Tanto los áridos gruesos como los finos juegan un papel importante en la resistencia del concreto. La *pedra triturada* es el producto resultante del molido industrial de rocas o de minas de material grueso. Las *escorias de los altos hornos* son productos de industrias de hierro que se solidifican bajo condiciones atmosféricas.

Las rocas se clasifican de acuerdo a su origen en tres grandes grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las *rocas ígneas* son aquellas formadas por magma enfriado encima, por debajo o cerca de la superficie terrestre. El grado de cristalinización y el tamaño de los granos de estas rocas varían con la proporción de magma enfriado en el proceso de formación de las rocas. Debe notarse que el tamaño de los granos tienen un efecto significativo pues, aún teniendo la misma composición química, el comportamiento y características de las rocas puede cambiar. Este tipo de rocas se emplean como agregados gruesos y su nivel de resistencia a la compresión representa el límite superior de la resistencia a la compresión que alcanzará el concreto.

Las *rocas sedimentarias* son rocas estratificadas y depositadas por el agua, el viento o por la acción de los hielos. Dentro de los sedimentos

empleados en la ingeniería civil se encuentran las gravas, las arenas, las arcillas y los limos.

- **Mortero;** es una mezcla de arena, cemento y agua. Es básicamente concreto sin agregados gruesos. El mortero es una mezcla de materiales cementantes y agregados, generalmente finos, a la que se le añade suficientes cantidades de agua para que puedan escurrir sin que haya segregación de los constituyentes. Concreto bombeado o lanzado, se refiere a un mortero de hormigón que es neumáticamente transportado a través de una manguera y proyectado hacia una superficie a una gran velocidad.
- **Cemento;** es un material finamente molido que por sí mismo no es cementante, pero si se le añade agua desarrolla propiedades adherentes como resultado de la hidratación o reacción química entre los minerales del cemento y el agua. Un cemento es llamado hidráulico cuando los productos de hidratación son estables en un medio acuoso. El cemento más difundido actualmente es el llamado portland, el cual consiste principalmente de silicatos de calcio hidratados.
- **Agua;** este elemento tiene dos funciones en la hechura del concreto: en primer lugar, es el agente que produce la hidratación del cemento, y con esto inicia la serie de reacciones químicas que dan como resultado las

características de resistencia, impermeabilidad, etc. propias del hormigón. La segunda función del agua en la mixtura, tiene como finalidad darle trabajabilidad a esta cuidando siempre su consistencia y homogeneidad. La relación agua/cemento es uno de los renglones más importantes a cuidar en el proceso de fabricación de concreto (véase la tabla 4.1).

0.38	45
0.45	40
0.55	35
0.65	30
0.75	25
0.80	20

Tabla 4.1.- Resistencia uniaxial del concreto en función de la relación agua/cemento

- **Aditivos;** este quinto componente del concreto es opcional, sin embargo, casi siempre empleados en la práctica moderna. Los aditivos son materiales que se agregan al concreto antes o durante la mezcla. La popularidad en su uso es bien merecida y han brindado enormes beneficios a la industria de la construcción. Existen varias clases de aditivos; por ejemplo, existen algunos que modifican las características de asentamiento y endurecimiento de la mezcla; hay otros que reducen la cantidad de agua necesaria en la mezcla; otros que incrementan la resistencia del concreto a temperaturas extremas; unos más que hacen a la mixtura más impermeable y, algunos otros, que son materiales minerales tales como las puzolanas (materiales que contienen sílice reactivo), que pueden reducir el agrietamiento de la masa de hormigón a través de una reducción del calor de hidratación a tempranas edades de la emulsión.

Los aditivos que se emplean con el hormigón rodillado básicamente cumplen con las siguientes funciones: mejoran la trabajabilidad, retardan el endurecimiento (mayor tiempo de colocación y evitando juntas frías) y aminoran la cantidad de agua necesaria.

IV.3.- Tipos de concreto

Basándose en el peso, el concreto se clasifica de manera general en tres categorías:

- **Normal;** es aquel cuyo peso es de aproximadamente 2400 kg/m^3 ; contiene arena natural y grava o roca triturada. Es el concreto de mayor uso para propósitos estructurales.
- **Liviano;** se nombra así a los concretos cuyo peso oscila alrededor de los 1800 kg/m^3 .
- **Pesado;** son concretos con pesos mayores a los 3200 kg/m^3 , empleados algunas veces para lugares donde existe radiación; está fabricado con agregados de alta densidad.

IV.4.- Características físicas del concreto

- **Durabilidad;** se refiere a la vida útil que bajo ciertas condiciones ambientales puede alcanzar un determinado hormigón.
- **Impermeabilidad;** es la oposición que presenta el concreto a dejar pasar un fluido a través de sí; está íntimamente relacionada con la porosidad de la sustancia, con el proceso de compactación (en el caso del concreto rodillado), y con la relación agua/cemento de la mezcla.

- **Elasticidad;** se refiere a la capacidad de deformación cuando se somete a un esfuerzo.
- **Densidad;** está vinculada a la granulometría y peso de los áridos usados en la mixtura.
- **Resistencia;** es la capacidad que tiene un hormigón para soportar esfuerzos de tensión o compresión, siendo por mucho, las fuerzas de compresión las que más resiste.

Tipo de cemento Portland		Resistencia a la compresión con respecto al cemento tipo I a diferentes edades (en días)			
ASTM	Descripción	1	7	28	90
I	Uso general	100	100	100	100
	Moderado calor de hidratación	75	85	90	100
IV	Alta resistencia inicial	190	120	100	100
	Bajo calor de hidratación	85	85	75	100
V	Alta resistencia a los sulfatos	85	75	85	100

Tabla 4.2 - Resistencia relativa del concreto en función del tipo de cemento

IV.5.- Concreto Compactado con Rodillo (CCR)

IV.5.1.- Generalidades

Una de las preocupaciones de la ingeniería civil ha sido siempre la de optimizar los recursos, sean estos técnicos, económicos, humanos o naturales, sin poner en riesgo las estipulaciones de calidad requeridas. En obras civiles que pueden llegar a ser tan colosales como una presa de gravedad, dichas optimizaciones son aún más importantes, y la constante innovación de técnicas constructivas ha logrado, en gran medida, abatir costos y tiempos.

Un ejemplo de estas mejoras (en la construcción de presas) lo constituye la implementación del concreto rodillado en una gran cantidad de presas en todo el planeta. Los antecedentes que tiene la construcción de presas por medio de esta tecnología los representan los siguientes hechos:

- * El conocimiento que se tenía de que el exceso de cemento producía efectos deletéreos.
- * La necesidad de reducir los tiempos de construcción y los costos.
- * El problema de agrietamiento en la masa de concreto generado por el elevado calor de hidratación del cemento cuando se colocan tongadas gruesas.

- * La necesidad de deshacerse de los residuos industriales (cenizas volantes).

IV.5.2.- Respecto al material

- * **Dosificación;** el hormigón dura y resiste más en cuanto menos poroso es. La porosidad, es decir, el volumen relativo ocupado por el aire y el agua, decrece en tanto que madura, sin embargo la porosidad del hormigón endurecido está muy influida por el valor inicial de la porosidad.
- * **Granulometrías;** existen dos tipos de granulometrías fundamentales: continuas y discontinuas. Conceptualmente las discontinuas son mejores, minimizan el contenido de mortero; sin embargo los problemas de segregación, sobre todo para hormigones secos, las hacen desaconsejables con los medios de fabricación y puesta en obra actuales.

Cualquier granulometría dentro de los límites marcados en la figura 4.1 da lugar a un CCR bueno, mezclable y compactable, con áridos desde basaltos a granitos, pasando por calizas, esquistos y areniscas.

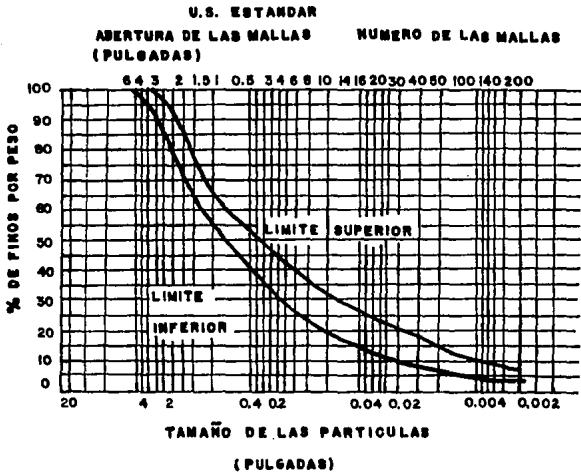


Figura 4.1.- Graduación sugerida de agregados para mezclas de CCR con finos no plásticos menores a la malla No. 200 incluidos.

En cuanto a la granulometría, no existen diferencias significativas entre los hormigones tradicionales y los compactados, pero cabe destacar:

1. El contenido de finos (cemento + cenizas volantes + finos inertes) debe ser del orden del 11%.
2. Se pueden colocar en obra hormigones homogéneos con tamaño máximo del orden de 100 mm.

Norma	Tamaño de Malla (micrometros)
UNE 7030	75
ASTM C 136	150
	300
	600
	1250
	2500
	5000
	10000

Tabla 4.3.- Serie de mallas o tamices más empleados para clasificar a los áridos

- **Consistencia;** el aspecto exterior del CCR es muy diferente al concreto tradicional, no se aprecia la existencia de pasta fluida cuando es extendido. La energía requerida para compactarlo es mucho mayor que la necesaria para otro hormigón. Esta consistencia debe ser capaz de

soportar rodillos vibratorios. De manera general, puede decirse que la humedad del hormigón compactado con rodillo es del orden del 4.5 %. La elección de una clase de consistencia u otra es función de la energía de compactación, del tipo de árido, de la granulometría de los sólidos, del espesor de las tongadas, del lapso entre tongadas (madurez), del tipo de junta que se tenga entre tongadas, de las condiciones ambientales y de la temperatura inicial del hormigón.

IV.5.3.- Acerca del diseño

El diseño de las presas de gravedad viene principalmente condicionado por la cimentación. Históricamente, el modo de fallo de las presas de gravedad ha sido por deslizamiento o erosión de la roca de cimentación. Caso de existir un plano de deslizamiento, normalmente se excava por debajo de este hasta conseguir la suficiente masa para reducir al mínimo posible el potencial de deslizamiento. Los planos de deslizamiento aguas abajo de la presa deben ser evaluados con mucho cuidado.

Las estructuras de gravedad como las presas están diseñadas esencialmente a la estabilidad al vuelco y al deslizamiento. La compresión en sí misma no es normalmente un factor de control.

La existencia de una cimentación de calidad adecuada, una buena limpieza de esta, presentando una superficie rugosa para conseguir una unión del CCR a la roca, puede reducir o llegar a eliminar la existencia de filtraciones.

El esquema estructural de las presas de gravedad de hormigón compactado con rodillo es esencialmente similar al de las presas construidas con hormigón convencional, la sección resistente no varía. Pueden considerarse dos elementos diferentes:

- Eliminación o espaciamiento de las juntas funcionales.
- Cambio de la sección triangular por trapezoidal, en razón de la mejora que se consigue en el sistema de puesta en obra en las zonas superiores de la presa.

Además, existe la tendencia de reducir el número de galerías, siendo en todo caso indispensable mantener la galería perimetral.

Las galerías y accesos en presas de CCR tienen la misma finalidad que en las construidas con concreto tradicional, sin embargo su construcción disminuye en un 15 % el ritmo de trabajo, además producen un aumento de tensiones en esta zona. Los requerimientos de diseño de galerías y accesos son los mismos que para presas de hormigón tradicional.

La concepción de las presas de hormigón compactado con rodillo lleva aparejada la idea de la continuidad en la puesta en obra. De esta manera, se ha pasado de juntas longitudinales y transversales con bloques de 300 m² de superficie y espesores de tongadas entre 1.50 y 2.30 metros, a la situación que ofrece ahora el hormigón compactado con rodillo de superficies que exceden los 2000 m².

La misión de las *juntas funcionales* es la de reducir los efectos de empotramiento de la cimentación y la de controlar las fisuras de la presa.

Las juntas funcionales pueden ser:

- **Junta fría;** exige un lavado y la extensión de una mezcla de unión para un correcto tratamiento.
- **Junta W;** aquella situación que no exige lavado pero sí una mezcla de unión para su correcto tratamiento.
- **Junta caliente;** aquí, la tongada inferior une perfectamente con la superior sin necesidad de ningún tipo de tratamiento.

IV.5.4.- Respecto a la construcción

El ritmo de la construcción lo estiman con anticipación los contratistas de acuerdo a un programa de obra, de tal forma que deberá existir una

sincronización entre la fabricación y la colocación del concreto que permita un avance (en volumen de obra) suficiente para concluir la obra a tiempo. De acuerdo a este programa se sabrán los volúmenes requeridos por día y, por lo tanto, la clase y cantidad de equipo a emplear en la producción y en la colocación del CCR.

En la construcción de presas en México una sola compañía constructora es quien se encarga de todo el proceso constructivo, pudiendo abarcar incluso el proyecto para evitar conflictos y elusión de responsabilidades. Esta constructora podrá a su vez subcontratar a otras en ciertos trabajos, aunque la responsabilidad seguirá en manos de la primera.

Los volúmenes de concreto rodillado que se llegan a colocar en la obra pueden alcanzar los 2000 m³ diarios, empero, estos rendimientos dependen de varios factores como lo son entre otros, el tamaño de la boquilla y las condiciones climatológicas.

Como se verá más adelante, el grueso de las capas o tongadas que se van colocando son de 30 centímetros por día (este grosor se ha estandarizado en casi todo el mundo excepto en Japón donde es mayor). La siguiente capa se unirá a la primera mediante un concreto de liga siempre y cuando el tiempo transcurrido entre la colocación de una tongada y otra sea mayor a seis horas, en caso contrario, no será necesaria dicha liga. Para determinar en que casos

se colocará o no concreto de unión entre dos capas, hay un experto de laboratorio encargado de esta tarea.

- **Amasadoras;** se han utilizado dos clases de amasadoras para la construcción de estas presas:

1. Amasadoras discontinuas de eje horizontal.

2. Amasadoras continuas (pugmill).

- **Transporte;** el transporte del material al tajo, se realiza generalmente con métodos similares a los de construcción de terraplenes, siendo los más comunes:

1. Dumpers; el material se recoge a la salida de la hormigonera, se transporta a la presa, se traspasa a un dumper y se distribuye en la obra. Son eficaces, pudiendo plantear algunos problemas de circulación, acceso al tajo, contaminación, y deterioro de las capas ya compactadas.

2. Cintas o vagón por ladera; evitan en parte los problemas señalados para los dumpers, tienen el inconveniente de que son más proclives a causar la segregación del material, imponen mayor rigidez a la puesta

en obra y causan notables retrasos en caso de un fallo en su funcionamiento.

El sistema de transporte del CCR más empleado en México hasta ahora es el de bandas continuas y camiones, esto debido a su menor costo (comparado con otros sistemas) y al menor tiempo que transcurre entre la salida del hormigón de la planta y su colocación en la obra (el tiempo máximo que debe pasar desde que el concreto sale de la planta hasta su compactación en el sitio no debe ser mayor a 30 minutos, pues el concreto comienza a fraguar y si esto ocurre la calidad se reducirá generando posteriormente otros problemas). Existe un inconveniente que no obstante las precauciones adoptadas en el proceso de transportación, no se ha podido evitar por completo: la segregación de los agregados de mayor tamaño.

- **Extendido;** este debe cumplir con ciertos requisitos: homogeneizar la mezcla o en todo caso no favorecer la segregación; colocar el hormigón con los espesores previstos; dotar a la mixtura de una cierta precompactación; no dañar los encofrados y demás elementos constructivos.

Para la extensión se emplean traillas, bulldozers, extendedoras, etc.

La eficacia de la compactación está íntimamente relacionada con el tamaño de los áridos, recomendándose como límite máximo los 100 mm.

- **Tongadas;** el espesor de las tongadas depende fundamentalmente de la capacidad de producción de la planta de concreto y de la energía de compactación. El espesor más difundido en todo el mundo es de 30 cm.
- **Compactación;** es el medio mecánico a través del cual se acelera la consolidación y por ende se reduce la porosidad. Los parámetros que intervienen en la compactación son:
 1. Material: tamaño máximo, granulometría, humedad de la mezcla, cantidad y tipo de material cementante y aditivos.
 2. Puesta en obra: espesor de tongada, método de puesta en obra, grado de precompactación, tiempo transcurrido entre la fabricación y la compactación (no debe ser mayor a 45 minutos).
 3. Agentes ambientales; temperatura, grado higrométrico.
 4. Compactador: peso por unidad de longitud; con 27 kg/cm se compactan tongadas superiores a 15 cm en tanto que con carga lineal de 20.5 kg/cm se compactan tongadas menores a 15 cm; amplitud de vibración; estas deben variar entre 0.63 y 0.89 mm pues con

amplitudes inferiores no se alcanza la densidad en profundidad de manera económica y con amplitudes superiores se puede dañar la superficie; frecuencia de rodillo; debe ser superior a 28.33 Hz; velocidad durante la compactación; debe ser inferior a 3.2 km/h.

- **Curado**; el hormigón compactado con rodillo es conceptualmente igual que el hormigón tradicional, y por lo tanto el tipo de tratamiento de curado y las razones por las cuales es necesario realizarlo son las mismas. La disipación de calor que se produce durante el curado, es de extrema importancia en esta tipología de presas.
- **Temperatura**; el fenómeno térmico es el generador de los más graves problemas que se plantean en el diseño y construcción de presas de fábrica. La temperatura de una tongada depende de:
 1. Temperatura inicial de la mezcla.
 2. Condiciones ambientales.
 3. Tiempo de colocación entre tongadas.
 4. Tratamiento de curado.
 5. Método de construcción.
 6. Refrigeración posterior.

7. Situación geométrica de la medición de la temperatura.

Los métodos que se usan para reducir las temperaturas máximas alcanzadas son múltiples.

- ⊖ Optimización de la dosificación.
- ⊖ Enfriamiento de áridos por agua o por almacenamiento en épocas frías.
- ⊖ Enfriamiento del agua de amasado o sustitución de la misma por escamas de hielo.
- ⊖ Enfriamiento de la carcasa de la amasadora.
- ⊖ Curado con agua fría.
- ⊖ Hormigonar en época fría.
- ⊖ Reducción del espesor de tongada.
- ⊖ Refrigeración posterior.
- ⊖ Ampliación del tiempo entre colocación de tongadas.

Un concreto tradicional con cemento portland y dosificación no superior a 250 kg de cemento por metro cúbico, sufre un aumento térmico entre 30 y 40 °C. El empleo de serpentines de refrigeración permite limitar tal incremento a

menos de 15 °C; el uso de un conglomerante con un 40 % de cemento portland y un 60 % de cenizas volantes silico-aluminosas, permite rebajar dicho aumento, sin refrigeración, a 17 °C a lo sumo. Lógicamente se trata de valores indicativos, muy condicionados a la puesta en obra y al tipo de materiales utilizados (los áridos llegan a tener tanta o más importancia que el conglomerante cuando el contenido de este en la mezcla es inferior al 10 % en peso del producto final).

IV.5.5.- Propiedades del CCR

IV.5.5.1.- Resistencia

1.- A la compresión

Las mezclas de CCR con un volumen de pasta superior al volumen de huecos dan unas resistencias similares a las de un concreto tradicional de igual relación agua / cemento.

2.- A la tensión

La resistencia a tensión es un porcentaje de la resistencia a compresión (del orden del 7 al 13 %, dependiendo de la calidad del árido, edad, contenido de cemento y resistencia), generalmente es más bajo para el CCR que para el concreto convencional.

3.- Al cortante

Depende de las fuerzas de unión (cohesión) y del ángulo de rozamiento interno. La menor resistencia se da en la construcción de juntas y en la superficie entre capas de CCR.

IV.5.5.2.- Propiedades elásticas

1.- Módulo de elasticidad

Los principales factores que afectan a las propiedades elásticas del CCR son la edad, tipo de árido, resistencia y el contenido de material cementante.

Las mezclas de CCR con áridos similares a los del concreto convencional y con contenidos relativamente altos de cemento más puzolana pueden dar módulos similares a los del concreto tradicional.

2.- Relación de Poisson

Estos valores son parecidos a los de concretos tradicionales, se mueven en un rango entre 0.17 y 0.22. Valores más pequeños se dan a edades muy tempranas o para resistencias bajas.

IV.5.5.3.- Fluencia

La fluencia es la deformación que sufre un sólido por estar sometido a fuerzas permanentes; es función de la granulometría del total de los áridos y del volumen de cemento en la mezcla. Generalmente, áridos con un bajo módulo de elasticidad producen hormigón con una alta fluencia. Mezclas de alta resistencia tienen generalmente una matriz cementicia más rígida y una menor fluencia. Mezclas pobres y aquellas que están hechas con filler inerte, tienen una fluencia mayor de la normal.

IV.5.5.4.- Cambio de volumen

El cambio de volumen por retracción en el CCR está minimizado debido al bajo contenido en agua y en cemento.

IV.5.5.5.- Capacidad de alargamiento

El alargamiento aparece en el concreto cuando se produce un cambio de volumen coaccionado. Cuando el cambio de volumen da como resultado un alargamiento superior al que puede soportar el material, se produce una fisura. El valor de la tensión crítica justo antes de fisurarse es la capacidad de alargamiento del material.

La capacidad al alargamiento del CCR es generalmente baja debido al bajo contenido en cemento y al alto contenido en puzolana respecto a un

hormigón convencional. Como sucede con otros materiales, las capacidades de alargamiento del CCR pueden variar con el amplio rango de diseño de mezclas y los áridos utilizados.

IV.5.5.6.- Permeabilidad

Depende fundamentalmente del aire ocluido y de la porosidad de la pasta de cemento hidratada y por lo tanto está completamente controlada por las proporciones de la mezcla, el control de calidad y el grado de compactación. Cuando hay suficiente pasta, control de la distribución de finos para minimizar los huecos y compactación total, el CCR es relativamente impermeable. Los valores comunes de permeabilidad son similares a los del concreto convencional (del orden de $1.5 \text{ a } 150 \times 10^{-12} \text{ m/s}$).

Las filtraciones que se puedan llegar a presentar se dan principalmente a lo largo de las juntas horizontales entre capas, y no a través de la masa compactada. Estas filtraciones decrecen de forma importante con el tiempo.

IV.5.5.7.- Durabilidad

La experiencia que se ha tenido en México y en el extranjero muestra que el deterioro de las estructuras de CCR es análogo al que se tiene con el uso de concreto convencional.

IV.5.5.8.- Peso unitario

El peso unitario del CCR es igual o sensiblemente superior al de un hormigón convencional realizado con el mismo tipo de áridos. El CCR tiene un bajo contenido de aire (del 1 al 2 %) y un bajo contenido inicial de agua, ocupando los sólidos este volumen. El incremento de densidad es del orden del 1 al 3 %.

Capítulo V: Presas de México

construidas con concreto rodillado

V.1.- Generalidades

La construcción de presas ha ido evolucionando a la par de los adelantos tecnológicos en varios ramos de la ciencia. Desde hace aproximadamente 30 años se ha venido trabajando y estudiando una técnica que involucra menores recursos económicos y temporales, y cuya implementación en obra es muy similar al trabajo llevado a cabo para movimientos de tierra; esta técnica es llamada de **concreto compactado con rodillo**, pues el concreto utilizado contiene volúmenes muy bajos de agua, que lo convierte en un elemento ideal para emplear métodos propios de movimientos de tierra donde la compactación se lleva a cabo (entre otras formas) por medio de rodillos, de donde la técnica toma nombre.

En México se ha venido empleando esta técnica desde inicios de los años 80's, siendo la Comisión Nacional del Agua (CNA) la encargada de las investigaciones pertinentes en nuestro país, aunque en sus principios, la técnica es extranjera.

En todo el mundo se cuenta ya con una basta experiencia en la construcción de presas de CCR y tanto los procedimientos como los materiales empleados en cada lugar pueden variar; así se tiene que mientras en el extranjero lo más común es utilizar en la fabricación del CCR cenizas volantes de tipo cementante, principalmente para sustituir de manera importante al cemento, reduciendo con esto el calor de hidratación y ajustando la curva de los agregados finos; en México se han empleado generalmente cementos puzolánicos de bajo calor de hidratación, y en menor escala cenizas volantes **no cementantes** y limos inorgánicos (estos dos últimos con el principal objeto de ajustar la curva de los agregados finos).

V.2.- Presas construidas en México con concreto compactado con rodillo

A continuación se darán las características más importantes de las presas terminadas hasta el momento en nuestro país:

1.- Manzanilla

Está localizada en el estado de Guanajuato sobre el río Ibarilla, su objetivo principal es el control de avenidas. Fue la primera presa de México construida con CCR (se terminó en 1986).

Volumen	Cantidad
Volumen	500
Volumen	1000

Tabla 5.1.- Datos técnicos más sobresalientes de la presa
manzanilla

2.- Trígomiil

Situada en el estado de Jalisco, sus objetivos serán el control de avenidas y el abastecimiento de agua para riego, es la mayor presa de CCR construida hasta ahora en México (1994).

Concepto	Cantidad	Unidad
CCA	361500	m ³
Concreto armado	43400	m ³
Concreto reforzado	10500	m ³
Acero de refuerzo	146500	kg
Operaciones para limpiar y desplantar	34000	m ³
Piezas prefabricadas de concreto	25000	piezas

Tabla 5.2.- Cantidades estimadas de la presa Trigomil

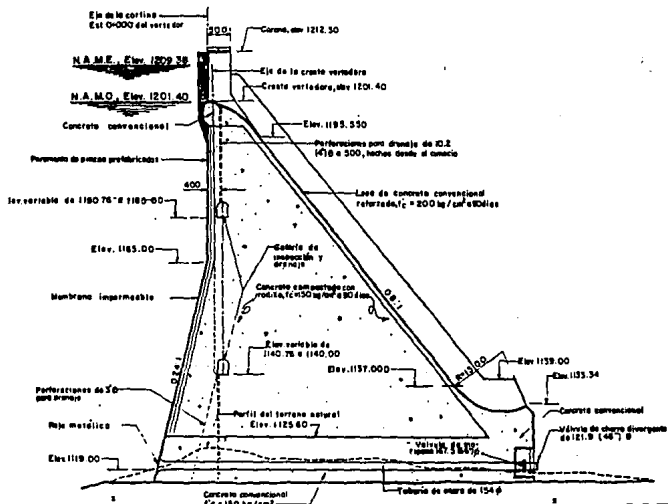


Figura 5.1.- Perfil de la sección vertedora y obra de toma provisional de la presa Triquimil

Concepto	Cantidad	Unidad
Capacidad total	25000000	m ³
Capacidad de conservación	25000000	m ³
Capacidad de superalmacenamiento	74000000	m ³
Capacidad de azolves	25000000	m ³
Elevación de la corona	1212.30	m
Elevación del NAME	1209.36	m
Elevación de la cresta vertedora	1201.40	m
Elevación del nivel mínimo de operación	1164.20	m
Elevación del umbral de la toma	1151.50	m
Longitud de la cresta vertedora	75.00	m
Gasto máximo de entrada	4600.00	m ³ /s
Gasto de diseño del vertedor	3655.00	m ³ /s
Gasto de diseño de la obra de toma	30.00	m ³ /s
Gasto de diseño de la obra de presa	15.00	m ³ /s

Tabla 5.3 - Datos de proyecto de la presa Trigomil

3.- Vinoramas

Se encuentra en el estado de Sinaloa sobre el arroyo del Bredal y tiene como función el control de avenidas y servir como obra de riego.

Concepto	Cantidad	Unidad
Capacidad total de almacenamiento	102.00	Millones de m ³
Capacidad total de control	47.00	Millones de m ³
Capacidad para el control de conservación	65.00	Millones de m ³
Capacidad de control	38.50	Millones de m ³
Capacidad útil para riego	15.00	Millones de m ³
Capacidad de azoives	3.50	Millones de m ³
Elevación corona cortina	178.30	msnm
Elevación del nivel de aguas máximas	176.28	msnm
Elevación de la cresta vertedora	168.50	msnm
Elevación del umbral de la escotadura	158.65	msnm
Elevación del ancho del cauce	135.00	msnm
Longitud de la cresta vertedora	15.00	m
Ancho de la escotadura	2.00	m
Carga de diseño del vertedor	7.78	m/s
Carga normal para la obra de toma	1.60	m/s
Gasto máximo del vertedor	854.00	m ³ /s
Gasto máximo de la escotadura	214.87	m ³ /s

Tabla 5.4.- Datos de proyecto de la presa Vinoramas

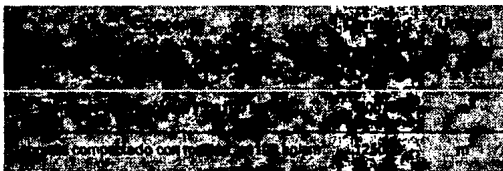


Tabla 5.5 - Cantidades estimadas de la presa Vinoramas

4.- San Lázaro

Ubicada en el estado de Baja California Sur cumplirá como obra de control de avenidas y servirá también como recargador de acuíferos.

Concepto	Cantidad	Unidad
Máximo Probable (T _r =10000 años)	3600	m ³ /s
Capacidad total	10.7	hm ³
Capacidad muerta	2.25	hm ³
Capacidad de azolves	3.0	hm ³
Capacidad útil	2.0	hm ³
Capacidad de regulación	5.7	hm ³
Nivel máximo extraordinario del agua	305.68	m
Nivel de conservación	299.10	m
Nivel de azolves	295.40	m
Nivel mínimo de operación	295.85	m
Cresta vertedora	299.10	m
Umbral de la obra de desagüe	293.40	m
Longitud de cresta vertedora	75.00	m
Descarga máxima del vertedor	2560.00	m ³ /s
Capacidad de la obra de desagüe	1.0	m ³ /s

Tabla 5.6.- Datos técnicos más importantes de la presa San Lázaro

Concepto	Cantidad	Unidad
Excavación		m ³
Concreto de f' c= 100 kg/cm ²	8905	m ³
Concreto de f' c= 200 kg/cm ²	100	m ³
CCR	239300	m ³
Acero de refuerzo	19560	kg
Acero de refuerzo	81400	kg
Concreto de f' c= 200 kg/cm ²		m ³
Acero de refuerzo	81400	kg
Concreto de f' c= 100 kg/cm ²	990	m ³
Concreto de f' c= 200 kg/cm ²	67	m ³
Acero de refuerzo	2770	kg
Acero estructural	260	kg
Realizarse con sus mecanismos		Plata

Tabla 5.7 - Cantidades estimadas de la presa San Lázaro

V.3.- Análisis de las ventajas y desventajas del uso de concreto rodillado en presas mexicanas

Los beneficios que se obtienen con la utilización de la técnica del concreto compactado con rodillo al que se le ha adicionado cenizas volantes, cementos puzolánicos (de bajo calor de hidratación) u otro tipo de puzolana en su fabricación los podemos considerar en varios grupos:

- **Técnicos:** algunos provechos que se alcanzan con la dosificación del hormigón con cementos puzolánicos, cenizas volantes u otros tipos de puzolanas, es el sensible aumento de la impermeabilidad, esto como resultado de evitar el fenómeno químico llamado *lixiviación del concreto*, que se produce cuando alguno de los compuestos de calcio existentes en el cemento se disuelve en el agua adicionada, de tal forma que se generan espacios vacíos en los sitios antes ocupados por los mencionados compuestos, es decir, se disminuye el tamaño de los poros de la mixtura.

El verdadero motivo del agrietamiento del concreto es la diferencia de temperaturas existentes entre el exterior y el interior de la mezcla; si este gradiente de temperaturas es mayor a 10 °C provocará fisuramiento, de tal manera que mediante el uso de cementos puzolánicos se puede regular, en cierta medida, el desprendimiento de calor interno (del 50 - 60

% inferior), y con esto se evitan gradientes mayores a los soportables por el concreto. Menor expansividad; menor grado de carbonatación; la caída de la tendencia a la segregación y a la exudación; acepta vertidos en la fase de construcción; comprobación y auscultación análogas a otras presas de fábrica; las mismas posibilidades de corrección que en otras presas de fábrica, tanto en la propia fábrica como en el cemento.

- **Económicos:** el hecho de sustituir al cemento por un material de deshecho constituye un ahorro que en obras de gran envergadura puede llegar a ser muy significativo; es obvio que la disminución de los tiempos de construcción cuando se tiene un control eficiente de obra, implica una merma en la necesidad de horas - hombre, esta reducción de tiempos implica que los financiamientos económicos se vean aminorados.
- **Sociales:** la puesta en marcha de la presa en un lapso menor beneficia a las zonas aledañas y a aquellas que recibirán energía; asimismo, el posible desarrollo más inmediato de actividades tales como la pesca, el riego de campos cercanos e incluso la implementación de acciones recreativas.
- **Ambientales:** las cenizas volantes son escorias industriales que generan en primera instancia problemas de almacenamiento y, posteriormente,

causan un nocivo impacto ambiental, su reutilización (cuando se opta por ellas) mengua, en la medida de su empleo, este problema.

Por otra parte existen algunas desventajas en la utilización del sistema del concreto compactado con rodillo:

- **Técnicas:** Las resistencias alcanzadas en los primeros 28 días son algo menores que las que se obtienen con hormigones convencionales; sin embargo, esta desventaja desaparece cuando la mixtura arriba a los 90 días de edad, e incluso, dichas resistencias llegan a ser mayores; otro aspecto desfavorable es la menor resistencia a las heladas, aunque esto puede obviarse con el empleo de aditivos aireantes.

En México, un problema más se ha añadido a esta lista, la dificultad para conseguir la puzolana substitutiva del cemento en virtud de que las fábricas que producen los residuos puzolánicos no han estado hasta ahora cerca de los lugares donde éstos se han utilizado, teniendo como secuela que el transportarlos al sitio requerido eleve en demasía su costo, perdiendo el atributo principal de su empleo. Esto, sin embargo, se ha resuelto usando cementos puzolánicos e incluso algunos limos inorgánicos; cuando se ha recurrido al uso de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento se ha tenido el problema de que su manejo es difícil debido a su pequeño tamaño, esto es, tanto su transporte como

su posterior almacenamiento tienen que ser absolutamente herméticos, pues de no ser así se corre el riesgo de que las cenizas, una vez llegadas a la obra, se esparzan por el aire y dada su naturaleza abrasiva pueda dañar la maquinaria existente en el lugar.

La puesta en marcha de la obra tiene ciertas dificultades dado que al inicio es difícil poner a trabajar la revolvedora continua de material. El problema que con más frecuencia se presenta en las obras con CCR es la segregación del agregado grueso de 3" o mayor (para el caso de las presas de México el mayor tamaño de agregado grueso utilizado ha sido 3 ").

V.4.- Perspectivas

Entre las dificultades más frecuentes en las presas cualquiera que sea su clase se tiene el agrietamiento (lo que las hace menos impermeables) y el hundimiento del terreno; empero hasta ahora, no se ha tenido ninguna dificultad con las presas elaboradas en México con CCR; aún en Trigomil en donde el terreno presenta algunas discontinuidades geológicas como cavidades de hasta 12 metros en el desplante. Por este motivo, y dado que los resultados obtenidos hasta el momento con el uso del método de CCR son positivos tanto en el aspecto técnico como en el económico, existen planes futuros para construir nuevas presas bajo este mismo criterio.

Entre los proyectos que se ya se tienen contemplados se encuentran:

1.- Coyotes; ubicada en la entidad de Sinaloa sobre el arroyo Coyotes.

Será una presa que tendrá por objetivos el riego y suministro de agua a las zonas aledañas.

2.- Francisco I. Madero; se localizará en el estado de Chihuahua sobre el río San Pedro y sus funciones serán el control de avenidas y riego.

Capítulo VI: Conclusiones

El mundo de las presas ha cambiado desde las construidas por los romanos hasta nuestros días, teniendo siempre como premisas tres factores fundamentales: durabilidad, impermeabilidad y economía. En este siglo, en la década de los sesenta, surge una nueva tecnología nacida bajo los auspicios de una construcción más rápida y económica de presas de fábrica, que desemboca en la técnica denominada "Roller Compacted Concrete" o Concreto Compactado con Rodillo.

La selección del tipo de presa que se construirá en un lugar específico, está influenciado por diferentes clases de factores técnicos como pueden ser el tamaño de la boquilla, la magnitud y propósito de la obra, la existencia de las materias primas adecuadas cerca del sitio de la construcción (esto en el caso de optarse por una presa de materiales graduados) y, principalmente, la clase de terreno de la zona. Efectivamente, es este el elemento que realmente determina la elección del tipo de presa, pues si el estudio geológico indica que el suelo es deformable de ninguna manera se podrá construir ahí una presa de gravedad, tendrá que ser una de materiales graduados en razón de las tensiones adicionales que tales hundimientos provocarían sobre la masa de concreto. En el caso de que el área sea firme existirá la posibilidad de elegir,

en cuyo caso hay una inclinación hacia las presas de gravedad como consecuencia de las ventajas que ofrece trabajar concreto en comparación a los materiales graduados.

Cuando las cantidades de concreto requerido en una obra civil son considerables, se genera un gran calor de hidratación que produce esfuerzos tensionantes mayores a los soportables por el concreto, originándose fisuras que hacen menos impermeable la masa de hormigón, efecto por demás indeseable sobre todo en aquellas estructuras en las que la baja permeabilidad es un requisito fundamental como es el caso de las presas. Esta dificultad se ha resuelto de varias maneras, como ejemplos se encuentran las siguientes soluciones: preenfriamiento de los áridos; el uso de hielo en el amasado de la mezcla; empleo de serpentines ahogados en el concreto a través de los cuales circula agua fría; realizar los trabajos en periodos invernales; colocando tongadas más delgadas que permiten mayor disipación de calor; la utilización de cementos de bajo calor de hidratación; la sustitución de cemento por puzolanas artificiales (cenizas volantes); etc.

Los propósitos fundamentales del uso de puzolanas como las cenizas volantes son:

- Reemplazar parcialmente al cemento y disminuir la generación de calor.

- Reducir tiempos y costos de construcción.
- Aumentar la cantidad de finos y dar mayor trabajabilidad.

La resistencia del hormigón va a depender de:

- Calidad de los áridos.
- Grado de compactación.
- Proporciones de cemento, puzolana y agua.

En las presas construidas hasta el momento en México con concreto seco no se han empleado cenizas volantes cementantes sino cemento puzolánico y cuando se ha recurrido a las cenizas volantes no cementantes ha sido con un doble objeto: ajustar la curva de los agregados finos (dando con esto mayor trabajabilidad a la mixtura) y sustituir parcialmente al cemento en la tarea de llenar espacios pequeños (impidiendo de paso el fenómeno de la lixiviación del concreto y haciendo menos permeable a la cortina). El motivo de este hecho no es a causa de que el cemento puzolánico sea en primera instancia más barato, sino que el transporte de las cenizas desde el lugar de su producción hasta el sitio de su uso hace que el producto eleve su costo por encima del cemento. En el proceso de elaboración del concreto también se ha utilizado un género de limo inorgánico con los mismos fines que los de las cenizas volantes no cementantes.

La diferencia principal que la técnica del CCR ha tenido en nuestro país con relación al resto del mundo, la constituye el hecho del mayor ahorro de cemento en el extranjero al obtenido actualmente en México: mientras en Europa, Japón y Estados Unidos la sustitución de cemento por puzolanas llega a alcanzar un 35 %, en México la cifra oscila alrededor del 5 %, siendo la razón de esto la equivalencia de precios entre las cenizas y el cemento puzolánico por los motivos anteriormente expuestos.

A edades por encima de los 28 días decrece la diferencia en la resistencia con distintos materiales. Con los cementantes de desarrollo de resistencias más lentos se consigue al final las mayores resistencias.

Es deseable el uso de menores cantidades de cemento y la máxima cantidad de puzolana posible, cumpliendo las resistencias exigidas, para disminuir el calor generado. La efectividad de las puzolanas en la reducción de generación de calor depende de la resistencia requerida y de la facultad de la puzolana en reducir el agua necesaria así como el contenido de cemento.

En lo que respecta a los áridos, se recomienda no emplear tamaños mayores a 76 mm por problemas de segregación, debe sopesarse la ganancia de resistencias y la minimización de la segregación. Con capas de más de tres veces el tamaño del árido no existe gran influencia de este en la compactación, la segregación es mínima, utilizándose compactadores vibratorios grandes.

Cuando se usan compactadores más pequeños en la cercanía de las estructuras y es necesaria una mayor densidad y resistencia, se debe reducir el tamaño máximo así como el espesor de la tongada. Con tamaños mayores de 38 mm debe prestarse atención a la segregación en el transporte y extendido. La cantidad de áridos finos influye fuertemente sobre la pasta requerida y la compactabilidad del concreto rodillado, pues puede llegar a conseguir el número mínimo de pasadas para una consolidación total de un espesor de capa dado. También afecta a la cantidad de agua y cemento necesaria para rellenar y envolver los áridos.

El volumen de agua se ajusta para conseguir una compactación satisfactoria. El nivel de humedad necesario viene limitado por el obligado tránsito de la maquinaria (por encima) y el evitar la segregación del hormigón (muy seco), además, existe un límite para el aumento de resistencias dada la reducción del agua.

La compactación del concreto rodillado debe realizarse lo antes posible después del extendido, especialmente cuando el tiempo es caluroso. Como norma el tiempo disponible para la compactación es de unos 10 minutos después del extendido o de 40 minutos desde que el hormigón sale de la planta.

Los resultados que se han obtenido en la construcción de presas con el sistema del concreto compactado con rodillo son alentadores tanto en el sentido técnico como en el económico, en consecuencia, las perspectivas del CCR en México son amplias y por el momento ya se contemplan al menos dos proyectos auspiciados por este método constructivo.

Bibliografía:

1.- Mehta, P.K. :

" Concrete "

Prentice - Hall; New Jersey, 1992

2.- Grupo de trabajo de hormigón compactado con rodillo de la Universidad de Cantabria:

" Estudios sobre presas de hormigón compactado con rodillo "

Universidad de Cantabria; Santander

3.- Grupo de trabajo de hormigón compactado con rodillo de la Universidad de Cantabria:

" Presas de hormigón compactado con rodillo "

Universidad de Cantabria; Santander

4.- Grupo de trabajo de hormigón compactado con rodillo de la Universidad de Cantabria:

" Influencia del tipo de conglomerante en su proceso de hidratación "

Universidad de Cantabria; Santander

5.- Salmones Hernández, Luis M. :

" Modelización del comportamiento técnico del hormigón en masa "

Universidad de Cantabria; Santander 1993

6.- Juárez Badillo - Rico Rodríguez:

" Mecánica de suelos " tomo I " Fundamentos de la mecánica de suelos "

Editorial LIMUSA; México D.F. 1989