



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

**CONCRETO COMPACTADO
CON RODILLOS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA
SILVANO CASTAÑEDA ZAVALA

MEXICO, D. F.

FALLA DE ORIGEN

1989



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.

INDICE

Introducción	1
Capítulo I	4
1.1 Que es el concreto compactado con rodillos?	5
1.2 Resistencia a la compresión del concreto compactado con rodillos.	14
1.3 Resistencia a la tensión del concreto compactado con rodillos	19
1.4 Esfuerzo de adherencia en juntas horizontales para el RCC	22
1.4.1 Estado de la superficie en el concreto compactado con rodillos.	24
1.5 Moldeabilidad de la capa de recubrimiento.	28
1.6 Durabilidad del concreto rodillado.	31
1.6.1 Resistencia al congelamiento	31
1.6.2 Permeabilidad	31
1.7 Función de la ceniza volante en el concreto rodillado	34
1.8 Control de calidad en el concreto rodillado	36
Capítulo II	37
2.1 Ventajas del concreto compactado con rodillos con respecto al concreto convencional	38
2.2 Ejemplos de obras construídas con concreto compactado con rodillos	43
2.3 Consideraciones económicas para el diseño de cortinas con concreto rodillado	45
Capítulo III	49
3.1 Uso del concreto rodillado en presas	50

Capítulo IV	60
4.1 Presa La Manzanilla	61
4.2 Bordo de prueba para la presa La Manzanilla	69
4.2.1 Procedimiento de construcción del bordo de prueba para la presa La Manzanilla	70
4.3 Presa Trigomil	82
4.3.1 Generalidades del proyecto	82
4.3.2 Datos generales de la presa Trigomil	84
4.3.3 Planación de la obra	85
4.3.4 Organización de la obra	87
4.3.5 Control de calidad en Trigomil	89
4.3.6 Trascendencia social en Trigomil	92
Capítulo V	96
5.1 Aplicación del concreto compactado con rodillos en pavimentos	97
5.2 Comparación entre pavimento con concreto compactado con rodillos y bases estabilizadas con cemento	107
5.3 Diferencias entre el concreto rodillado para pavimentos y el concreto rodillado para presas	108
5.4 Ejemplos de aplicaciones del concreto rodillado en pavimentos	108
5.4.1 Uso del concreto rodillado en aeropuertos	113
5.5 Durabilidad de pavimentos con concreto compactado con rodillos	114
5.6 Altos esfuerzos resistentes en el concreto rodillado en pavimentos	114
Conclusiones y bibliografía	116

INTRODUCCION

INTRODUCCION

El presente trabajo es un estudio bibliográfico acerca de las características y cualidades del concreto compactado con rodillos, tomadas de muchos artículos referentes a este tema.

En esta recopilación de información se trata de hacer notar que este nuevo concreto puede tener muchas y muy prácticas aplicaciones tanto en la construcción de presas, como en la creación de pavimentos.

El concreto compactado con rodillos es un material nuevo y económico que se ha desarrollado en años recientes. Es similar en cuanto a su concepto, a la tierra estabilizada con cemento, excepto que contiene agregados grandes y se endurece a formar un concreto real.

Sus propiedades a largo plazo (de 90 días a un año y más) son muy parecidas a las del concreto macizo colado en obra utilizado en la construcción de presas.

Se utilizaron materiales semejantes al concreto compactado con rodillos (RCC) para plantillas de carreteras y algunos proyectos aislados en el pasado, pero a estas aplicaciones les faltaba el diseño y el control de calidad que tienen los productos en la actualidad.

El RCC debe tratarse como concreto real ya que tiene propiedades similares al, endurecerse al concreto convencional.

Al igual que el concreto colado en obra, el RCC también debe someterse a un control de calidad, especialmente al mezclarlo, manejarlo y colocarlo.

La economía del RCC estriba principalmente en los procedimientos de colocación, pero también influye considerablemente su mezclado, manejo y transporte.

Nota: RCC = Roller Compacted Concrete, que son las siglas en inglés del concreto compactado con rodillos. En el presente trabajo se usarán éstas letras (RCC), para referirse al concreto rodillado.

CAPITULO I

1.1 Que es el concreto compactado con rodillos?

Este material conocido también como rolacreto o concreto compactado con rodillos (CCR), se define como la mezcla formada por grava de tamaño máximo de 3 pulgadas, cemento, cenizas volantes, arena sin finos plásticos y agua. Este concreto es colocado con maquinaria pesada, y después es compactado mediante vibración externa para ello se utiliza un rodillo liso. El revenimiento de éste concreto es nulo.

Cuando se endurece tiene aspecto y propiedades físicas semejantes a las del concreto convencional. Su resistencia varía entre los rangos bajo y medio.

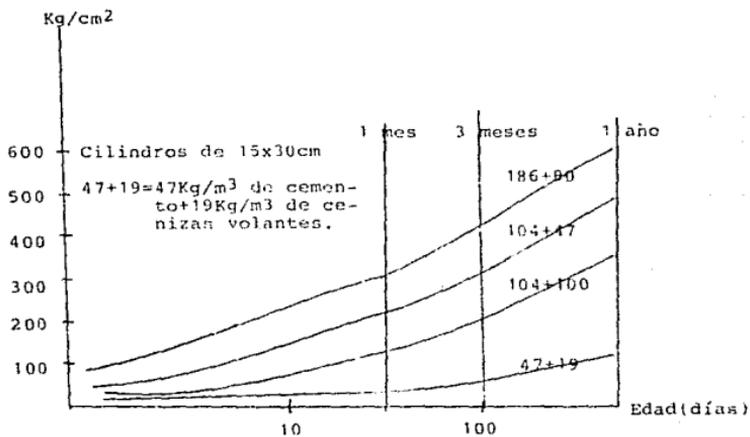
Las relaciones agua-cemento y grava-arena, no influyen para determinar el diseño de las mezclas en el concreto compactado con rodillos, como sucede en el caso del concreto convencional.

El contenido del cemento en el CCR varía del orden del 4 al 7 % del peso total del agregado, porcentajes que corresponden a consumos aproximados de 85 Kg/m^3 a 170 Kg/m^3 .

Figura 1

Relación edad-resistencia
de cilindros de RCC de la
presa Willow Creek.

Resistencia a la compresión



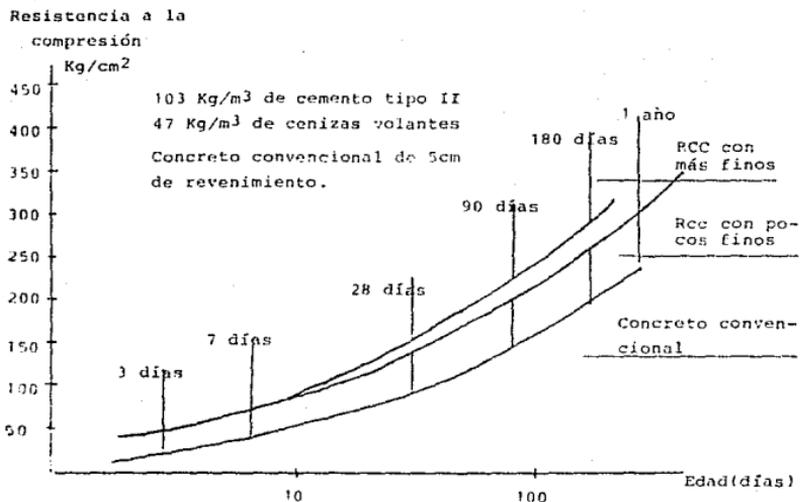
Para elaborar el concreto compactado con rodillos se puede utilizar diferentes tipos de agregados como:

- Agregados para concreto convencional
- Grava clasificada y dosificada para lograr una buena graduación
- Roca triturada para obtener tamaños de agregado con una graduación aceptable

En el CCR el control de la graduación es más riguroso que en el concreto convencional y, en ciertos casos no será necesario lavar el material para retirar las partículas que pasan la malla número 200, siempre y cuando estas no sean plásticas.

En algunas obras se pudo observar que el conservar los finos resulto ser benéfico tanto para lograr una buena compactabilidad en la mezcla como para obtener la resistencia adecuada.

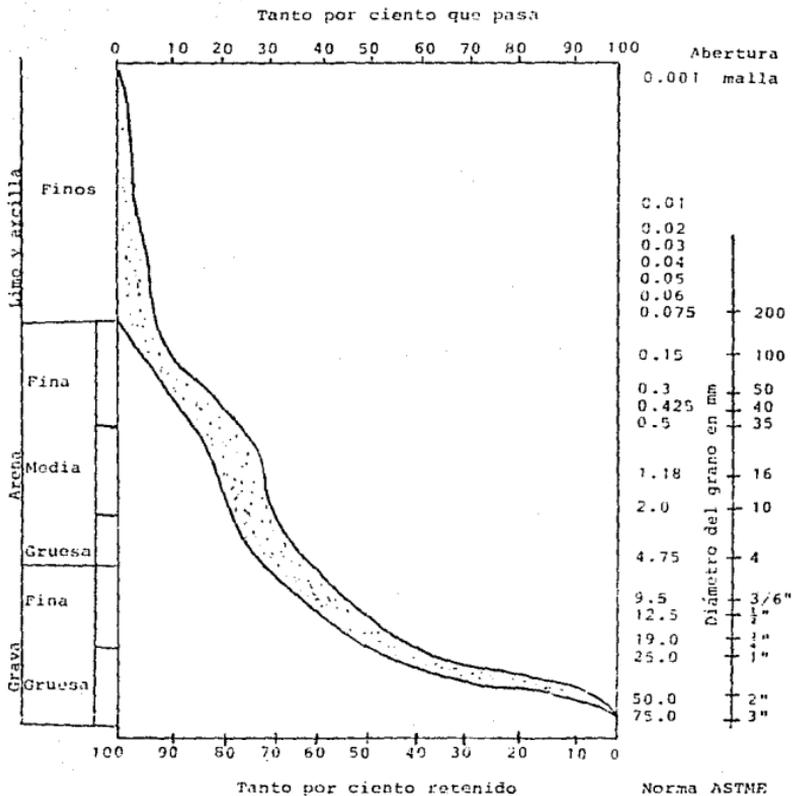
Figura 2 Edad-resistencia del concreto convencional y de RCC.



Envolvente de la curva granulométrica de la presa Willow Creek

Figura A

Figura 3



La cantidad permitida de finos puede variar del 4 al 10% del peso total del agregado, si estos no son plásticos.

Los finos plásticos no son recomendables por aceptar cambios de forma y volumétricos apreciables.

Para obtener la granulometría de proyecto de una obra con concreto compactado con rodillos es necesario almacenar gravas y arenas clasificadas, separandolas de tal manera que no se mezclen entre sí. Los agregados usados en el concreto compactado con rodillos son materiales petreos clasificados como gravas, arenas y cenizas volantes. Estos pueden ser producto de la explotación en los cauces de ríos o de depósitos naturales, o bien ser producto de la trituración en canteras de roca.

La cantidad permitida de cenizas volantes es un porcentaje máximo, del 6% con respecto al peso de la grava y arena, y generalmente es un sustituto del cemento cuando se usan cementos puzolánicos.

Las cenizas volantes es el subproducto de la utilización del carbón mineral no coquizable en las plantas carbóelectricas.

Las mezclas de CCR se pueden hacer con equipo convencional o por medio de una planta de mezclado continuo. El peso del concreto se dosifica para cada batchada.

Los resultados de las pruebas de laboratorio y los obtenidos en los bordes de prueba servirán para saber la proporción en que se dosifica cada elemento de una mezcla de CCR.

La mezcla se transporta hasta el sitio de colocación por medio de camiones de volteo, motoscrapas, bandas, etc.

Se colocan señalamientos e indicadores para el control y la identificación de concretos, la mezcla se extiende con ayuda de maquinaria pesada y después se compacta con un rodillo liso vibratorio.

El concreto se debe colocar dentro de los treinta minutos siguientes al mezclado. Cuando se construye una cortina de CCR, éste se coloca en franjas traslapadas entre sí de 40 cm, en forma continua, empleando el menor tiempo, para impedir la pérdida de agua o que se formen juntas triás.

Una vez que el concreto haya salido de la mezcladora no se permite añadir agua, cemento o agregados a la mezcla. La superficie del concreto debe de estar limpia y, en caso de lluvia debe suspenderse la colocación del concreto.

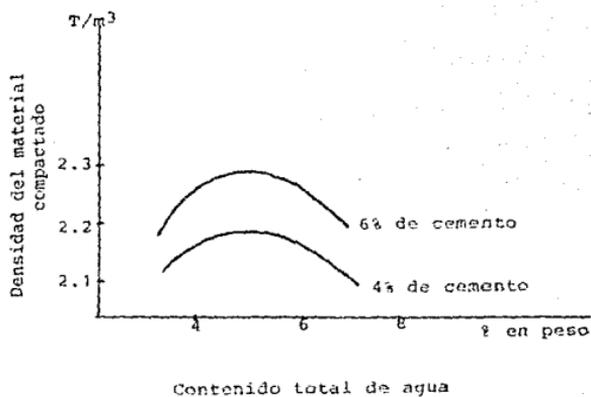
El menor contenido de agua de mezclado en el concreto rodillado que en el concreto convencional ocasiona que los cambios volumétricos potenciales debido a la pérdida de humedad o el acortamiento por secado sean significativamente menores.

Los cambios volumétricos ocurridos por la disipación del calor de hidratación en el CCR son poco importantes, debido a que contiene menos cemento que el concreto normal y tal vez al método de colocación ya que el concreto convencional se coloca en hiladas de 45 a 60 cm, mientras que el concreto rodillado se coloca en capas sucesivas y uniformes, cuyo espesor puede variar entre 20 y 30 cm.

Las capas delgadas permiten una mejor disipación del calor.

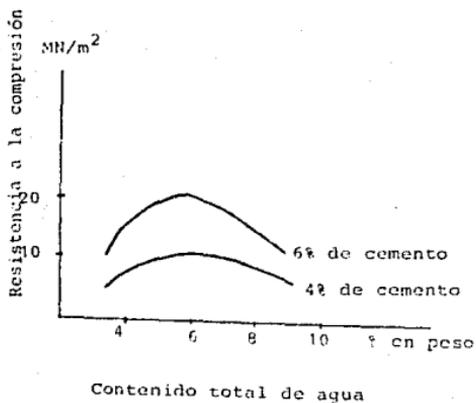
Densidad y resistencia en relación con el contenido de agua

Figura 4



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

Figura 5



1.2 Resistencia a la compresión del concreto compactado con rodillos

Para el concreto convencional se ha descubierto que las resistencias varían inversamente a las relaciones agua-cemento. Esto no parece ser cierto con el concreto rodillado de relaciones agua-material aglutinante muy elevados.

La relación agua-cemento no es una función de la resistencia en el CCR, ya que las resistencias se incrementan con el aumento en el contenido de agua. Este fenómeno se explica por efecto de las cavidades por aire atrapado en la masa de concreto.

La cantidad aglutinante de una mezcla dada se mantiene relativamente constante en cualquier trabajo de dosificación.

Las variaciones de resistencia del concreto sólido son sobre todo un reflejo de los cambios en la demanda de agua.

Sin embargo, el contenido de aire o de cavidades afectan la resistencia en el concreto compactado.

Se puede esperar una pérdida mínima de resistencia de 5% por cada 1% de incremento en las cavidades. Este efecto se observa en el concreto convencional, por la diferencia de resistencia en concretos con ó sin aire incluido, para una relación agua-cemento dado.

En la fig 6 se ha extrapolado a la información de resistencia promedio a los 28 días, para los cilindros abisonados de 15 X 30 cm de la presa.

Willowv Creek, los datos de resistencia contra la relación agua-cemento del ACI. En esta gráfica se puede notar que se requiere un gran cambio en la relación agua-cemento para tener un impacto significativo sobre la resistencia del concreto interior de la presa Willowv Creek.

Para ejemplificar lo anterior diremos que para ocupar 1% de las cavidades formadas por aire atrapado en 0.76 m^3 de concreto se necesitan aproximadamente 7.7 litros de agua.

El concreto interior de la presa Willowv Creek tuvo una resistencia promedio a los 28 días de 82 Kg/cm^2 .

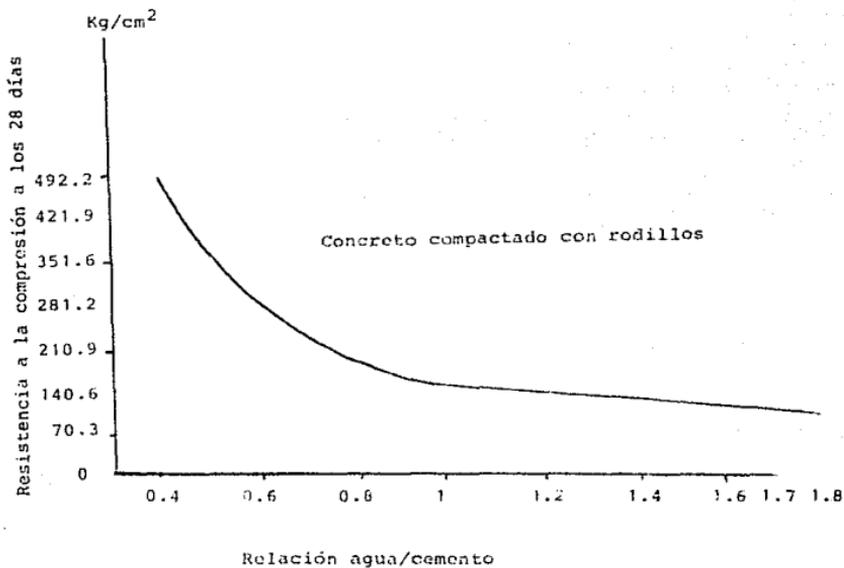
Si se emplea una relación de 5 a 1, un incremento de 1% en las cavidades formadas por aire atrapado reduciría la resistencia en unos 4.2 Kg/cm^2 . Sin embargo si añadimos 7.7 litros de agua para compensar el incremento en cavidades la pérdida de resistencia sería solo de 2.8 Kg/cm^2 .

Esto da como resultado un aumento de 1.4 Kg/cm^2 , con la adición de 7.7 litros de agua a la mezcla.

De la curva de la figura 6.10 anterior parecería cierto para cualquier mezcla con relación agua-cemento mayor de uno por pequeñas relaciones agua-cemento inferiores, la pendiente indicaría resistencias crecientes con contenidos decrecientes de agua. A pesar del incremento correspondiente en cavidades.

La siguiente gráfica muestra la resistencia a la compresión simple a los 28 días de cilindros de prueba apisonados de 15 por 30cm, de la presa Willow Creek, contra la relación agua-cemento.

Figura 6



Curva de compactación y resistencia a la compresión para mezclas de rolacreto.

Figura 7

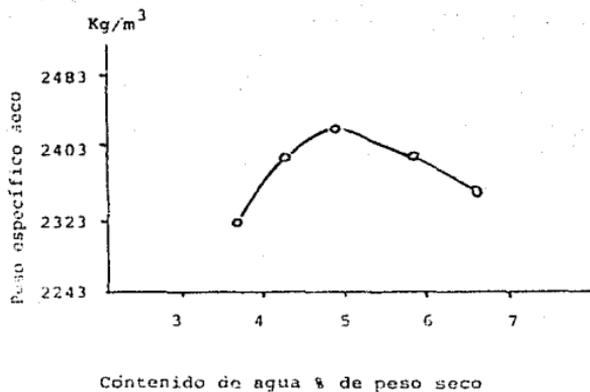
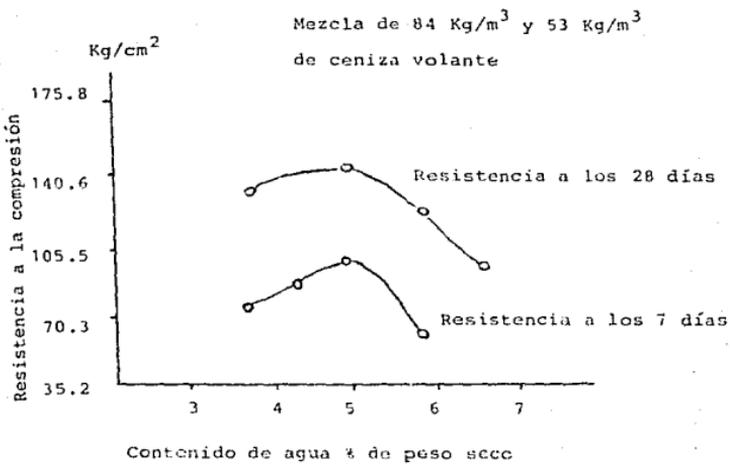


Figura 8



1.3 Resistencia a la tensión en el concreto compactado con rodillos

Los datos de prueba recabados nos indican que la resistencia a la tensión de corazones horizontales de colados de concreto rodillado superan la resistencia a la tensión de corazones verticales del mismo colado hasta en un 20 %. por tanto, al comparar datos de prueba, es importante considerar la orientación del espécimen de prueba respecto al tipo de ensayo.

Una prueba de tensión directa de un corazón vertical probaría la resistencia a la tensión en el plano horizontal, en tanto que la misma prueba pero en un corazón horizontal probaría la resistencia en el plano vertical. Si se comparan las propiedades de tensión como función de la resistencia a la compresión, es importante recordar que dicha relación varía con la resistencia a la compresión. La relación también recibe influencia del método de prueba.

La fig 9 es una representación gráfica de datos de prueba de resistencia a la tensión-compresión de corazones tomados de diferentes construcciones. En la gráfica los corazones representan la resistencia a la tensión en el plano horizontal.

La curva de $1.2\sqrt{f'_c}$ parece ser lo mas adecuado para los datos del concreto rodillado.

Tomando $1.6\sqrt{f'_c}$ como la curva que más se ajusta al concreto convencional, se puede apreciar que la resistencia a la ten-

sión en el plano horizontal del concreto rodillado es alrededor del 75 % de la del concreto convencional con la misma resistencia a la compresión. En el plano vertical puede esperarse que la resistencia de ambos concreto (convencional y rodillado) sean aproximados una con respecto de la otra.

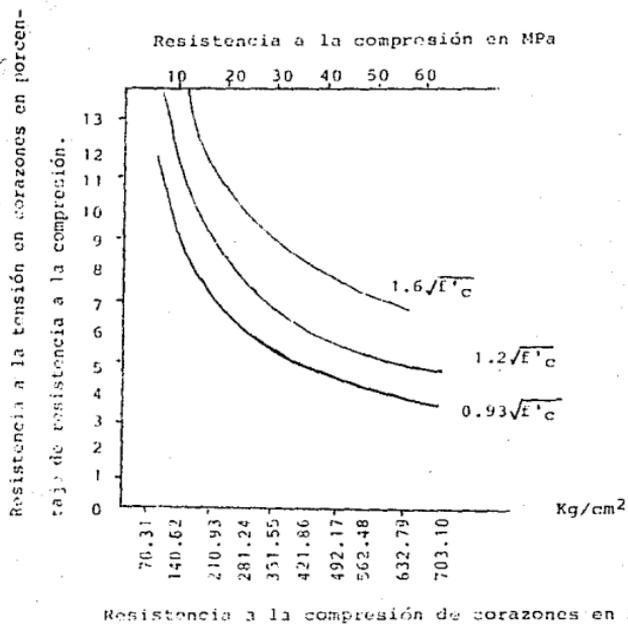
Si se nos presenta una reducción en la relación de resistencias a la tensión-compresión, esto puede atribuirse a una mala adherencia del agregado debido al incremento en el área superficial de éste y a una reducción en el volumen de pasta.

Para el concreto compactado con rodillos se deduce que incluso un volumen menor de cementante combinado con un incremento de cavidades hará decrecerán más las propiedades del material a la tensión.

Corazones verticales:

Resistencia a la tensión contra resistencia a la compresión

Figura 9



1.4 Esfuerzo de adherencia en juntas horizontales para el concreto compactado con rodillos

Los principales factores que controlan la adherencia de un colado o capa de concreto con la siguiente capa son:

- a) Las condiciones de la superficie por adherirse
- b) La moldeabilidad de la capa de concreto subsecuente o de recubrimiento
- c) La magnitud del trabajo aplicado para compactar la capa de concreto subsecuente o de recubrimiento

Existen muchos conceptos erróneos respecto a la obtención de adherencia en la construcción con concreto compactado con rodillos, que han conducido a los investigadores a buscar una solución única.

Un resumen de datos de pruebas, sobre la adherencia de corazones verticales se presentan en la figura 10.

Figura 10

	Juntas de construcción				Juntas de colado		
	Junta	Edad (días)	Tamaño máximo de agregado	Número de corazones	Adheridos (%)	Esfuerzo de adherencia	Número
	1	76	12	75	12	12	100
	7	38	12	92		24	100
TVA	1	38	3	25			
	1	38	4	100	10.8	17	76
	7	38	8	13	0		
	1	38	12	50	20.4		
	2	76	11	0		11	100
WES		114				10	100
	1	38	20	85	12.7	20	65
	1	76	22	14	8.8	22	91
	1	76	6	100	7.0	6	50
LC	1	76	6	50	7.7	6	33
	1	38	20	60	21.8		
		76				20	55
	1	19	11	91	17.2		
	1	76	11	9		22	27
	1	38	4	0			
	1	38	12	0			
WES	1	38	12	58	4.2		
	1	19	12	92	8.4		
	1	38	6	100	15.8		
	5	38	12	8			
	6	38	12	0			
	1	38	92	79	16.5		
CIRIA	3	28	12	100	9.8		
	1	38	59	95			

TVA = Autoridad del valle de Tennessee

WES = Waterways Experiment Station

RC = Rellenos de prueba de Lost Creek

CIRIA = Construction Industry Research Association, Londres Inglaterra.

1.4.1 Estado de la superficie en el concreto compactado con rodillos

La experiencia en construcción con concreto convencional indicaba que para obtener una adherencia adecuada debía de removerse la lechosidad en la superficie del colado. También demostró que si no había presencia de lechada no había necesidad de darle un tratamiento a la junta.

Esto fué un concepto erróneo en la construcción con concreto rodillado, ya que las pruebas en diferentes colados indican claramente que las juntas frías no dependen de la presencia de lechosidad.

El porcentaje de juntas adheridas de la fig. 10, se muestra gráficamente en la fig. 11, contra el tiempo de exposición.

Si se define como una junta fría al porcentaje de falla del 90% o más, se pueden esperar que en cualquier momento ocurran juntas frías después del fraguado final del concreto.

El tamaño máximo del agregado afecta claramente la adherencia en el concreto compactado con rodillos. Si se proyectan a cero las curvas de la fig. 11, la adherencia indicaría que el tamaño del agregado influye sobre el tiempo crítico para la formación de juntas frías, pero parece que no hay fundamento lógico para ello.

Se tienen pruebas de que las condiciones ambientales de climas frescos y húmedos pueden prolongar el tiempo de formación de una junta fría, después del fraguado final.

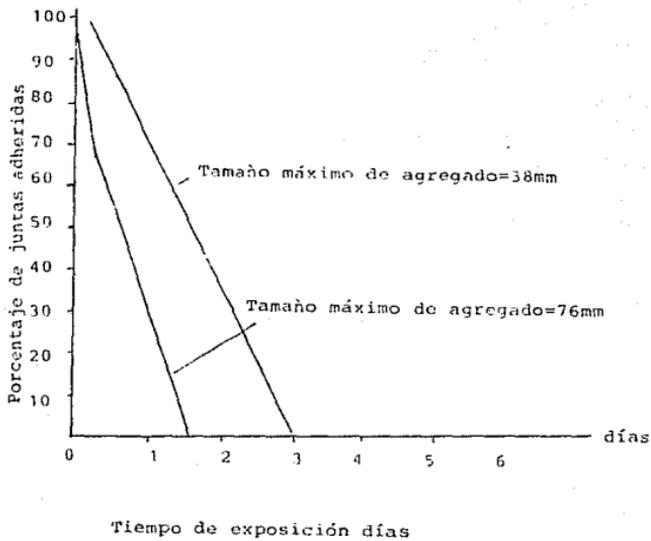
Por ejemplo en la presa Tims Ford E.U ,el lapso de tiempo entre colados fue de 17 a 18 horas.

Por su ubicación, el colado fue protegido del sol durante su exposición.

No se aplicó curado con agua, y la superficie no mostró evidencia de secado antes de cubrirla con la siguiente capa.

Figura 11

Efecto del tiempo de exposición sobre el porcentaje de juntas adheridas.



El tratamiento de juntas frías parece tener poca influencia sobre la adherencia de colados de concreto rodillado.

Los datos de prueba indican que la capa de concreto que cubre una junta fría debe tener una consistencia con cierto revenimiento para lograr una buena adherencia.

Las pruebas también indican que saturar la junta con agua antes de su recubrimiento con otra capa puede resultar negativo al desarrollo de la adherencia.

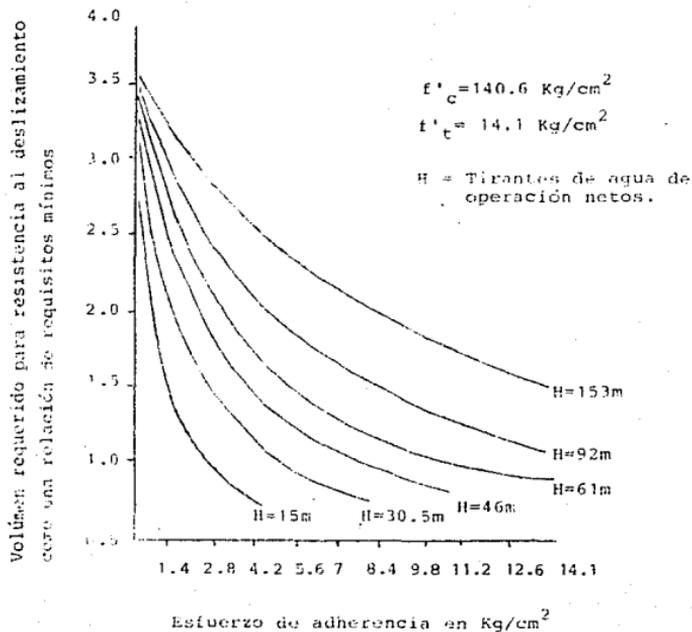
1.5 Moldeabilidad de la capa de recubrimiento.

La textura de la superficie, la forma y volumen del agregado grueso y la fluidez del mortero son factores que influyen en la moldeabilidad del concreto y en la capacidad de éste para adherirse a una superficie. Una vez que la capa inferior del concreto rodillado se ha endurecido, la adherencia depende del trabado de la pasta de recubrimiento con la estructura porosa de la pasta sólida del colado inferior. Cuando la superficie inferior no se ha endurecido por completo, la adherencia se incrementará, de tal manera que la pasta del colado inferior se moldea y combina de nuevo con la pasta de recubrimiento.

Es necesario el empleo de una mezcla adherente con revenimiento para lograr un buen entrelazado en juntas frías.

La siguiente figura muestra el efecto del esfuerzo de adherencia sobre el volumen requerido.

Figura 12



En el diseño de presas, la importancia del esfuerzo de adherencia puede verse en una gráfica de los requisitos de esfuerzo de adherencia contra la diferencia en requerimientos de volumen, para determinar las dimensiones de la cortina, de acuerdo con su estabilidad contra volteo. (Ver figura de la página anterior).

De la figura anterior podemos deducir que a medida que se incrementa el esfuerzo de adherencia, el tamaño de la presa estará regido por requisitos de sección mínima para cualquier tirante en operación.

1.6 Durabilidad del concreto rodillado

1.6.1 Resistencia al congelamiento.

El concreto compactado con rodillos esta sujeto a descascaramiento de la superficie bajo exposición a ciclos de congelamiento y descongelamiento, a menos que esté protegido por una capa aislante de concreto resistente a congelamiento. Sin esta capa de protección, la profundidad del descascaramiento será mayor en las partes de la presa donde no haya drenes y donde haya problemas de permeabilidad.

1.6.2 Permeabilidad.

La principal fuente de filtración en el concreto compactado con rodillos serán las juntas de construcción horizontales.

Cuando haya un elevado porcentaje de filtración y el aglutinante adherente es bajo, existe la posibilidad de que al final se pierda todo el cementante de la junta.

La fricción en la junta es afectada por condiciones de sub-presión a lo largo de toda ella. Sin embargo, existe un considerable intervalo de tiempo para juntas adheridas y los cambios en carga hidrostática y las modificaciones de sub-presión, dependiendo del porcentaje de agua infiltrada.

Si el entrelazado en una junta es muy bueno, el lapso

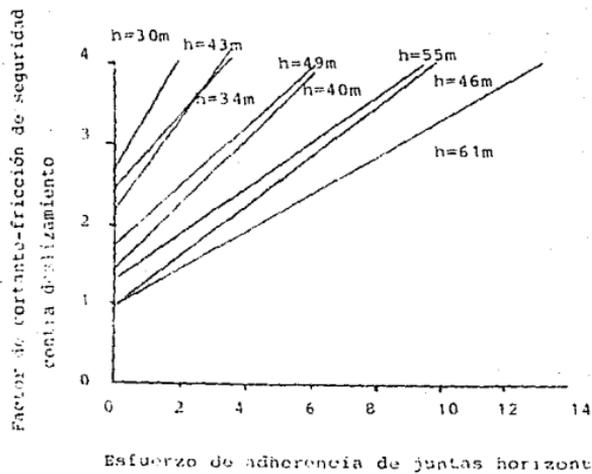
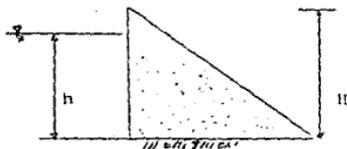
puede ser de semanas o meses, en tanto que la subpresión en una junta no cementada con alta infiltración, puede ajustarse en pocas horas.

La siguiente figura muestra el efecto de la carga hidrostática de diseño sobre el factor de seguridad contra deslizamiento.

De la siguiente figura podemos deducir que a medida que incrementamos la carga hidrostática sobre la cortina, el factor de cortante-fricción de seguridad contra deslizamiento disminuye, sin importar el valor de adherencia de juntas horizontales. También en la figura siguiente podemos notar que el factor de fricción-cortante de seguridad contra deslizamiento aumenta a medida que se incrementa el valor del esfuerzo de adherencia de juntas horizontales, sin que la carga hidrostática altere el resultado.

Efecto del tirante de agua de diseño y de la resistencia de juntas sobre el factor de cortante-fricción de seguridad.

Figura 13



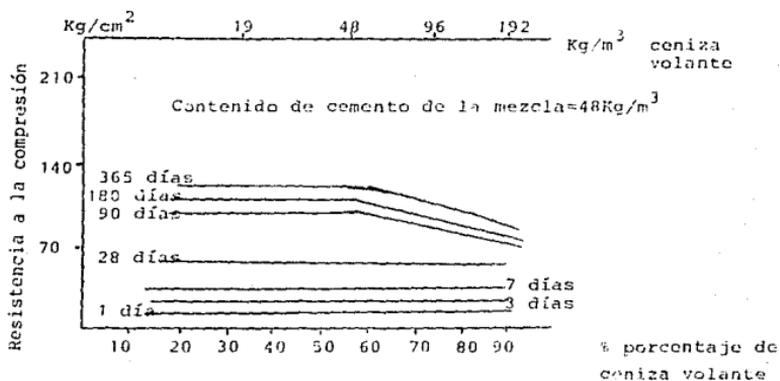
1.7 Función de la ceniza volante en el concreto rodillado.

La función principal de la ceniza volante en el concreto compactado con rodillos no es su contribución a largo plazo de resistencia puzolánica, sino la de incrementar el volumen de la capa aglutinante adherente para cubrir todas las partículas del agregado y rellenar todas sus cavidades, reduciendo con ello sus características generadoras de calor. Este material no requiere almacenamiento a largo plazo ni pruebas sofisticadas de control de calidad.

Si observamos la gráfica de la siguiente página podemos notar que ha edades tempranas de la mezcla no se visualiza ningún cambio con el incremento y el porcentaje de la ceniza volante, sin embargo después que la mezcla ha alcanzado su resistencia última se puede notar que el incremento de ceniza resulta perjudicial a la resistencia a la compresión simple de la mezcla.

La siguiente figura muestra el efecto del incremento de la ceniza volante contra la resistencia a la compresión, de la mezcla del interior de la presa Willow Creek.

Figura 14



1.8 Control de calidad en el concreto rodillado.

Las pruebas y el control de calidad son diferentes a las utilizadas en los proyectos de concreto convencional.

Dichas pruebas no son válidas en el concreto rodillado y por lo tanto no deben de realizarse. La trabajabilidad será determinada por observación de las mezclas bajo el rodillo vibratorio. Las pruebas de cilindros compactados en una mesa vibratoria servirán solamente para información histórica, Los cilindros no deben ser usados como prueba de aceptación.

Las pruebas de rutina que nos proporcionaran la información sobre la calidad del proyecto con concreto rodillado serán:

- 1) Pruebas de densidad nuclear, para conocer el peso específico del material compactado.
- 2) Contenido de humedad.
- 3) Contenido de agua y cemento de las mezclas frescas.

CAPITULO II

2.1 Ventajas del concreto compactado con rodillos con respecto al concreto convencional.

1) Las operaciones de producción y procesamiento de los agregados del concreto convencional son costosas y tardadas. En general se tiene que instalar una planta para lavar, tamizar, triturar si fuera necesario y mezclar las materias primas. El RCC normalmente usa las gravas disponibles con un procesamiento mínimo. Sin embargo si así se desea, se pueden usar los agregados procesados existentes para el concreto convencional.

2) El RCC se coloca muy rápidamente por el uso de equipo pesado con lo cual hay un ahorro considerable en el tiempo de ejecución del proyecto. Para dar una idea de este ahorro citaremos que durante la ejecución de la presa Willow Creek en los Estados Unidos se colocaron 331 mil metros cúbicos de RCC en menos de 5 meses, trabajando 6 días a la semana, y 16 horas diarias, es decir dos turnos de 8 horas al día. Lo anterior nos da un promedio de 1460 metros cúbicos diarios, que es un valor alto con respecto al concreto convencional. La ventaja de este procedimiento es que nos permite construir y terminar una presa con un año o más de anticipación, si se compara con sus similares de enrocamiento y concreto convencional.

3) El RCC sufre pequeñas contracciones y posee bajo calor de hidratación, debido a las bajas cantidades de agua y de cemento que contiene.

4) El RCC alcanza mayores resistencias que el concreto convencional con el mismo contenido de cemento, por lo cual este procedimiento resulta atractivo desde el punto de vista económico.

5) En la construcción de presas el RCC no necesita cimbra y el concreto convencional si la requiere, utilizando el RCC tendríamos un ahorro significativo por no utilizar cimbra.

6) El mezclado en el RCC resulta más práctico que en el concreto convencional, ya que el RCC puede mezclarse en varias formas, dependiendo del equipo disponible. Se puede revolver por peso como en el caso del concreto tradicional y se puede mezclar en una revolvedora estándar. Se puede revolver volumétricamente y mezclar por mezclado continuo en una salaxadora, similar a los sistemas que se usan para concreto asfáltico. O se puede tomar directamente de la fuente de grava sin controlar su carga y se puede mezclar con cemento y agua haciendo que los tres ingredientes caigan verticalmente através de una serie de deflectores.

Las técnicas de procesamiento, carga y mezclado de agregados varían considerablemente. Depende, principalmente, de la calidad de los agregados disponibles, de la calidad requerida por el producto final.

El diseñador debe saber que se puede obtener un material macizo de buena calidad sin los controles restrictivos del concreto convencional.

7) La movilización del concreto convencional al área de colocación requiere de camiones especializados con capacidad

des limitadas (generalmente de 6 a 8 metros cúbicos), o camiones de plataforma que transportan botes de concreto macizo (típicamente 12 metros cúbicos por camión). El RCC se puede transportar en camiones de volteo inferior, como los que comunmente se usan para colocar grava y terracería. La capacidad de estos camiones es de 10 a 30 metros cúbicos. Se han usado con éxito los camiones de volteo trasero, pero requieren un control más cuidadoso debido a la segregación potencial de los materiales cuando se vacían.

Después de vaciarlos, los materiales se dispersan con una conformadora o pala mecánica estándar.

Se puede minimizar la segregación causada al vaciarlos mezclándolos durante las operaciones de dispersión. Si fuera necesario colocar los materiales contra cimbras o entibados, se puede necesitar equipo más pequeño. El equipo de dispersión de la compactación inicial, deposita el material en capas uniformes de 22.5 cm de espesor (9 pulgadas).

8) Después de dispersar el material, se tiene que consolidar compactar en una masa apretada que tenga un mínimo de vacíos. Con el concreto convencional, esto se logra con vibración interna que es laboriosa, tardada y cara, además de requerir supervisión estrecha así como control de calidad.

En el caso del RCC la consolidación se hace mecánica - mente utilizando equipo rolado vibratorio. Esto aumenta la producción, reduce la mano de obra requerida y facilita el control de calidad.

En las áreas estrechas, por ejemplo junto a las cimbras, el tamaño del equipo estará limitado sólo por el espacio disponible para la maquinaria. En los lugares donde se ha construido con RCC nos reportan que han tenido éxito al colocarlo y compactarlo en áreas confinadas y contra cimbras en condiciones de campo. Se puede usar el mismo tipo de equipo para compactar la tierra contra los muros de retención que para el RCC en dichas condiciones. El esfuerzo de compactación requerido es una función de la profundidad y nivelación de las capas, pero básicamente requiere un trabajo semejante al que se necesita para terracerías selectas. El control de campo implica verificar la densidad cuando ya está colocado, o especificando un número mínimo de pasadas para diferentes tipos y tamaños de rodillos vibratorios.

Probablemente las juntas entre las capas necesiten una atención especial, dependiendo del grado de hidratación de las capas contiguas y del tamaño máximo de los agregados.

Se recomienda que si la hidratación no ha producido un fraguado inicial rápido y rígido en la capa previamente colocada las colocaciones posteriores no requieren ningún tratamiento especial. Si transcurre un tiempo prolongado entre la colocación de las capas sucesivas, digamos de 6 a 24 horas, puede necesitarse una capa de agregados de $\frac{1}{2}$ ó $\frac{3}{4}$ de pulgada como máximo antes de poner las mezclas de mayor tamaño. Un procedimiento alternativo consistiría en escarificar la superficie. Se deben de hacer pruebas de campo a escala completa para determinar las técnicas necesarias.

para obtener un producto con la calidad requerida para la mezcla dada y el equipo disponible.

9) Después de colocar el RCC, se debe obtener el curado y protección correctos para que el concreto pueda obtener su resistencia máxima sin sufrir las consecuencias de la contracción nociva debida a un secado precoz o cualquier otra reacción adversa. Quizás no sea necesario curar el RCC macizo si el material de la superficie externa del gran volumen es crítico para la integridad estructural general. La superficie externa se puede considerar como sacrificial. Si el pie (30 cm) externo, más o menos, de una presa de 300 pies de espesor no está curado, no hará que la presa falle.

El diseño inicial no tiene dimensiones tan precisas.

Esta capa externa, si no se cura y protege, tendrá muy pobre calidad estructural, pero su presencia impedirá pérdidas de humedad de la masa interior y la protegerá de las rápidas fluctuaciones de la temperatura cotidiana. Este razonamiento justifica la eliminación del curado deliberado aplicando humedad a membranas. Si fuera necesario se podría utilizar el curado húmedo, pero se tendrían que aplicar con sumo cuidado para que no deslave el cemento del RCC no hidratado. Quizás sea difícil aplicar las membranas que se rocían sobre la superficie áspera del RCC y normalmente no se recomendarían. En cuanto al control de calidad del RCC, se usan diferentes técnicas para alcanzar los mismos objetivos que para el concreto convencional. Los cilindros^a de compresión no son la solución puesto que son difíciles de

preparar con la mezcla seca y no se pueden considerar como representativos, del material de la estructura.

En algunos casos los cilindros no pueden hidratarse al punto en que se puedan probar sino hasta después que se haya completado la estructura. Se pueden hacer cilindros para contar con datos históricos utilizando una sobre carga y algo de compactación, pero de ninguna manera deben considerarse como el único medio de control.

los núcleos son mejores como fuentes de datos históricos pero, como los cilindros, quizás no se puedan probar sino hasta después de haber completado la estructura.

Se puede lograr un mejor control en el campo si se verifica la densidad, la humedad y los factores de cemento ya colocado.

Si son correctos y se usan las fuentes de agregados y cemento designados, las resistencias posteriores deben ser exactamente iguales a las que se diseñaron en un principio y en este caso las pruebas de compresión resultarán reducidas.

La densidad y la humedad se pueden determinar con exactitud con densímetros nucleares utilizados para la colocación de tierra.

4.2 Ejemplos de obras construidas con concreto compactado con rodillos.

Este método de construcción con concreto rodillado ha tenido diversas aplicaciones destacando:

- + En Paquistán, se utilizó en la reparación de la presa Tarbela.
- + En Gran Bretaña se construyeron algunas carreteras.
- + En los Estados Unidos se han construido actualmente 7 presas y 3 más están en proyecto, incluyendo la presa Willow Creek que fue la primera presa en el mundo en construirse enteramente con concreto rodillado.
- + En Japón se han construido presas con concreto rodillado que alcanzan una altura hasta de 100 m.
- + Otras aplicaciones del concreto rodillado podrían ser :
 - Cimentaciones masivas para diversas estructuras.
 - Revestimiento de canales.
 - Construcción de bordes.
 - Construcción de diques.
 - Aeropistas.
 - Vertederos.
 - Tanques de amortiguación.
 - Estructuras terminales de obras de excedencias.
 - Etc.

2.3 Consideraciones económicas para el diseño de cortinas con concreto rodillado.

Se tomará como ejemplo la presa Willow Creek.

Originalmente esta presa fue diseñada como una estructura de enrocamiento, con un canal vertedor separado de la cortina. Sin embargo el vertedor era tan grande y las condiciones de su construcción eran muy severas ya que se tenía que excavar en un macizo rocoso. Por lo tanto se necesitaba un diseño más económico. Se pensó en una cortina de concreto tipo gravedad, la cual permitía colocar el vertedor en la misma cortina y así se podría ahorrar la excavación del canal vertedor, pero una gran desventaja de este tipo de cortina es el alto costo de colocación del concreto.

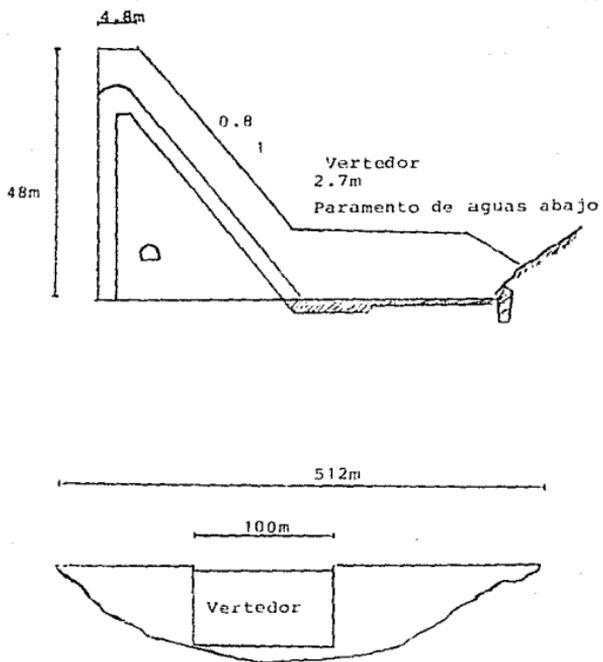
El concepto de construcción con concreto compactado con rodillos fue subsiguientemente propuesto. Con este método se eliminaba el canal lateral para verter las aguas sobrantes, el volumen de material requerido se reducía en un 75 % comparado con la cortina de enrocamiento, el tiempo de construcción se reducía, el diseño resultante era el de una estructura no erosionable, los otros requerimientos de construcción decrecieron porque hubo un notable decremento del tamaño de la presa.

El costo de colocación del concreto rodillado en promedio fue de :

	Vertedor	Paramento aguas abajo	Paramento aguas arriba	Mezcla del interior de la cortina
Tamaño máximo de agregado	38 mm	76 mm	76 mm	76 mm
Densidad	2466 kg/m ³	2483 kg/m ³	2483 kg/m ³	2466 kg/m ³
Resistencia a la compresión a los 90 días	312 kg/cm ²	200 kg/cm ²	162 kg/cm ²	74 kg/cm ²
Resistencia a la compresión a un año	431 "	319 "	256 "	118 "

Sección típica de la presa Willow Creek

Figura 15



25 dolares por metro cúbico.

La estimación del costo del concreto convencional fue de 85.5 dolares por metro cúbico, como se puede apreciar hubo una reducción del 70 % en el precio utilizando el concreto rodillado. Comparado con la estructura original del enrocamiento, el concreto compactado ahorró alrededor de 11 millones de dolares. También dicho método permitió terminar la presa en un año, aventajando el proyecto original que suponía terminar el proyecto en dos o tres años.

Otra modificación al proyecto la propuso el contratista y consistió en construir el paramento de aguas arriba verticalmente, esto trajo un gran ahorro adicional de 600,000 dolares.

La siguiente tabla muestra las mezclas y las propiedades del material usadas en la construcción de la presa Willow Creek.

Proporciones de la mezcla y propiedades del material:

	Vertedor	Paramento aguas abajo	Paramento aguas arriba	Mezclas del interior de la cortina
Cemento	186kg/m ³	104 kg/m ³	104 kg/m ³	47 kg/m ³
Ceniza volante	80 "	47 "	0 "	19 "
Agua	118 "	109 "	109 "	107 "

CAPITULO III

3.1 Uso del concreto rodillado en presas.

El tipo de materiales a utilizar y el método más adecuado para emprender la obra, son las decisiones más importantes para determinar el diseño y la construcción de una presa.

La experiencia en construcciones pasadas a base de concreto convencional y materiales graduados nos han indicado cuales son las ventajas e inconvenientes de estos materiales. En ambos casos dichos materiales poseen virtudes y defectos en porcentajes similares. En cambio la utilización del concreto compactado con rodillos reúne las características óptimas tanto del concreto convencional como los materiales graduados, reduce los costos de construcción y aumenta la funcionalidad y eficiencia de las presas sin detrimento de la seguridad.

Las cualidades del concreto rodillado se exponen a continuación, al mismo tiempo que algunos estudios de interés, los cuales han resultado útiles para elaborar las especificaciones de construcción con este nuevo material, así como el diseño de la sección y los lineamientos que deben seguirse para tener un control de calidad adecuado durante la obra.

Se tienen que tomar en cuenta los aspectos topográficos hidrológicos con el fin de analizar la disponibilidad de materiales y elegir el tipo de cortina más recomendada para las condiciones de una boquilla para presa.

Esto determinará las características y el diseño de toda la obra.

En nuestro país las cortinas de materiales graduados han sido predominantemente elegidas, sobre todo por su adaptabilidad a un amplio rango de condiciones geotécnicas de la boquilla.

Cuando el sitio elegido permite construir tanto una cortina de gravedad como una de materiales graduados; el costo de construcción es el factor determinante en la elección. Sin embargo, algunas veces el tamaño y la localización de otras estructuras tales como el vertedor, podrían darnos la pauta para elegir la cortina de concreto, siempre y cuando el incremento en el costo final fuera aceptable.

Si analizamos la evolución de la construcción de cortinas de concreto podremos observar que los métodos de diseño han mejorado notablemente con el paso del tiempo, sin embargo los procedimientos constructivos permanecen igual que en el pasado.

Se siguen teniendo demoras por la inestabilidad dimensional del concreto masivo provocado por el proceso de hidratación del cemento, esto impone grandes limitaciones en la velocidad de colado y en el tamaño de los monolitos.

La necesidad de proporcionar juntas de contracción, cimbras en las caras transversales del colado y a menudo sistemas de enfriamiento para evitar la contracción nociva y el secado precoz de la masa de concreto, causa demoras en la construcción.

El problema ha disminuido un poco al utilizar cementos puzolánicos o con moderado calor de hidratación; pero la construcción sigue siendo una actividad semi-continua que necesita gran cantidad de mano de obra.

Para mejorar la eficiencia del procedimiento constructivo se han utilizado clasificadoras de gran tamaño, pero el resultado sigue siendo el mismo, ya que la colocación y compactación del concreto, así como la fabricación de cimbras impiden obtener el procedimiento deseado.

La baja eficiencia del proceso constructivo ha traído como consecuencia que en la actualidad los costos del concreto masivo sean bastante considerables, tanto en términos absolutos como en relación con los costos de cortinas de materiales graduados.

Por otro lado, los adelantos tecnológicos que han desarrollado equipos de construcción más potentes y los avances en el diseño, logrados por el desarrollo de los métodos numéricos, han hecho posible la construcción de cortinas de materiales de graduados de gran tamaño. Teóricamente el mejor procedimiento constructivo se obtendrá, al más bajo costo, cuando se logren conjuntar las ventajas que ofrece la construcción de ambos tipos de cortina, de concreto y materiales graduados.

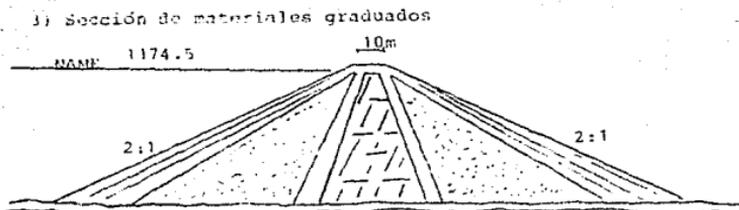
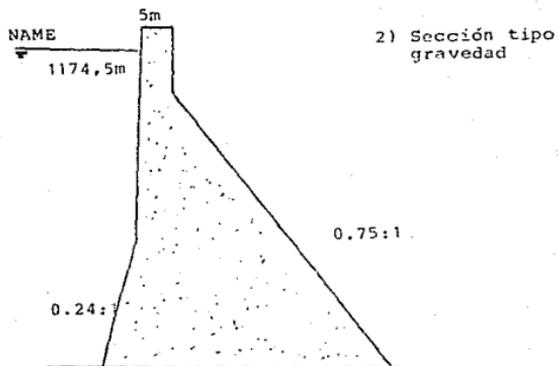
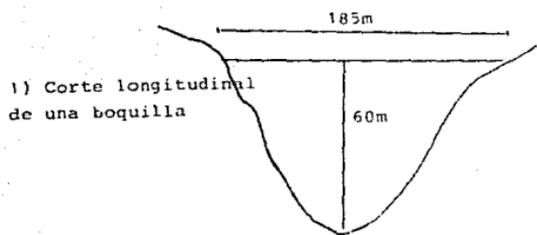
Actualmente el uso del concreto rodillado reúne tales ventajas.

Para ilustrar mejor lo anterior, a continuación se enuncian las ventajas y desventajas en la construcción de una

cortina de concreto, materiales graduados y concreto rodado.

Para ello se supone una boquilla de 60 m de altura y una longitud de corona de 185 m.

Figura 16



Cortinas de concreto:

Ventajas :

- Requiere menor volumen por colocar (95500 metros cúbicos).
- El material es homogéneo.
- Los materiales para la fabricación del concreto son fáciles de almacenar.
- El vertedor se halla en el cuerpo de la cortina.
- Las propiedades del concreto son controlables.
- El concreto resiste al desbordamiento.

Desventajas:

- La temperatura y el secado ocasionan cambios volumétricos.
- El proceso de construcción es semi-continuo.
- La estructura, por ser rígida, admite deformaciones mínimas en la cimentación.

Cortinas de materiales graduados :

Ventajas :

- Mayor eficiencia por el empleo constante de maquinaria pesada.
- Operación continua.
- Estructura flexible.

Desventajas :

- Mayor volumen de material por colocar (666,000) metros cúbicos.
- Se necesitan diferentes equipos de compactación para los distintos materiales que forman la cortina.
- Es difícil encontrar los materiales idóneos.
- No se conoce con exactitud la interacción de los materiales.

Cortinas de concreto rodillado :

Ventajas :

- Rápida colocación por el empleo de maquinaria.
- Las mezclas tienen un bajo contenido de cemento de 2.5 al 7 % en peso.
- Este concreto es tan seco que podría considerarse como granular, esto trae una buena consistencia durante su colocación.
- Ahorro por la colocación de concreto con este método es del 66 % comparado con el concreto convencional.
- Usa en promedio el RCC 40 % menos agua que el concreto convencional y 30 % menos de cemento para lograr una misma resistencia.
- Alta resistencia a la compresión, la cual es sorprendente para el concreto convencional con el mismo contenido de cemento.
- Los cambios de volumen y la contracción por secado son insignificantes en el RCC, debido a que contiene menos cemento y agua.

Sus mezclas:

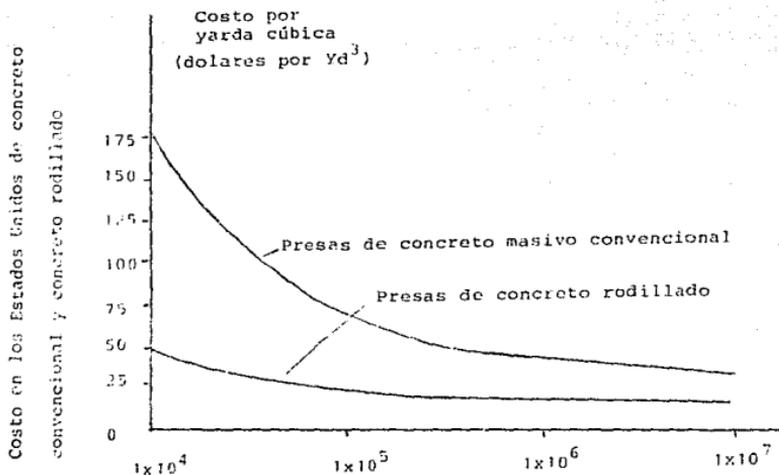
- Se puede trabajar normalmente con RCC en climas calurosos sin un notable incremento en la demanda de agua.
- Algunos Institutos han observado que el fenomeno de "creep" es directamente proporcional al volumen de la pasta de cemento en una unidad del volumen de concreto. Consecuente - mente el creep es mucho menor en una mezcla de RCC.
- Entradas de aire, asentamientos y reducciones de agua son reducidas por el equipo vibratorio. Esto hace que se tenga una buena consolidación en el RCC.

Desventajas :

- Mayor volumen por colocar que el concreto convencional.
- Debe ponerse especial cuidado en los contenidos de agua y cemento de las mezclas de RCC. Ya que si la mezcla esta muy seca no soportaría el peso del equipo vibratorio, por el contrario si la mezcla contiene mucha agua provocaría que el equipo se atascará.

Comparación de costos entre el concreto compactado con rodillos y el concreto masivo.

Figura 17



Cantidad de concreto masivo y concreto compactado con rodillos por yarda cúbica.

1 yarda cúbica \approx aproximadamente a 0.76 metros cúbicos

De la gráfica anterior podemos observar que para cantidades pequeñas de concreto, la diferencia de costo entre el concreto rodillado y el concreto convencional es muy grande.

Pero a medida que la cantidad de concreto por colocar en una obra aumenta, la diferencia de costo disminuye considerablemente. De esto podemos concluir que si incrementamos excesivamente la cantidad de concreto por colocar, para una cantidad infinita tendremos que el costo entre el concreto convencional y el concreto compactado con rodillos será el mismo.

CAPITULO IV

4.1 Presa La Manzanilla

Cuando se va a construir una cortina de concreto rodillado es de vital importancia conocer el comportamiento del material ,así como sus características después de terminada la obra. Toda esta información es recabada mediante pruebas de laboratorio, las cuales permiten conocer los parámetros de diseño, las características y propiedades de la mezcla. Además de los ensayos de laboratorio, los resultados son verificados mediante la construcción de un borde de prueba, el cual nos dará una información más real de lo que puede pasar durante la construcción.

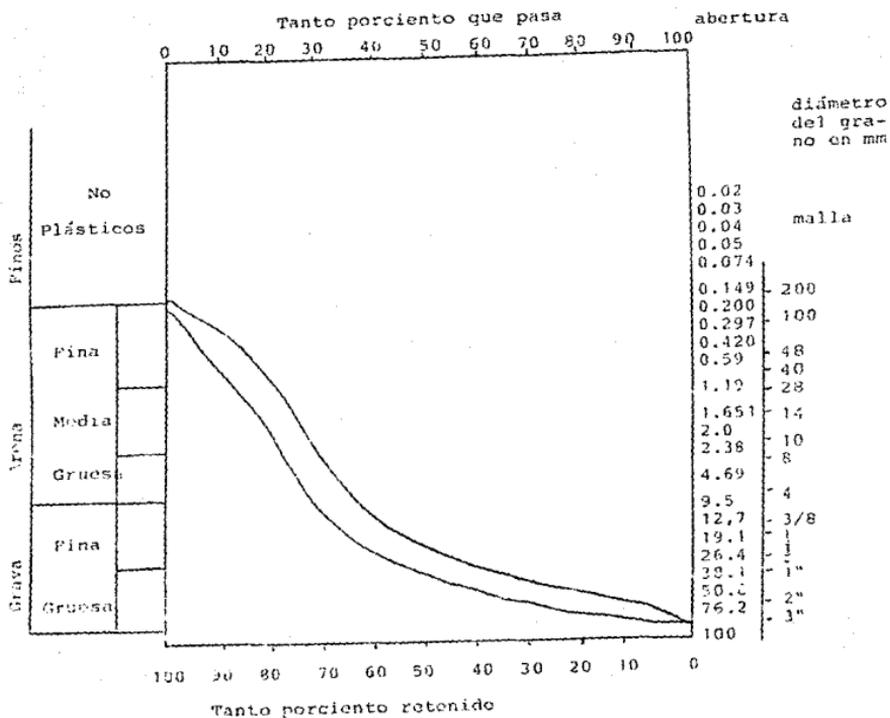
A continuación se enuncian las principales características de la mezcla, estudiadas en el laboratorio.

- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la tensión
- Resistencia al esfuerzo cortante de pruebas triaxiales
- Módulo de elasticidad
- Relación de Poisson
- Resistencia al esfuerzo cortante entre capas
- Densidad
- Permeabilidad
- Durabilidad
- Estabilidad dimensional

En el caso específico de la presa La Manzanilla, Guanajuato México, la grava fué tomada del banco de roca La Manzanilla y la arena se tomó del cauce del río Ibarrilla.

Granulometría de agregados para concreto rodillado de la presa La Manzanilla.

Figura 18



Se les hicieron pruebas a dichos agregados y fueron determinadas sus granulometrías, desificándolas de tal manera para obtener una curva granulométrica que estuviera comprendida dentro de los límites fijados por la envolvente de diseño.

Las pruebas de clasificación y de calidad realizadas a los agregados dieron los siguientes resultados:

Grava:

- Peso específico relativo	2.40
- Absorción	3.5%
- Peso volumétrico suelto	1190kg/m ³
- Peso volumétrico compactado	1301kg/m ³
- Abrasión en máquina Los Angeles	
Pérdida de material a 100 revoluciones	5.0%
Pérdida de material a 500 revoluciones	25.1%
- Intemperismo acelerado	
Pérdida de material	5.8%
Reactividad álcali-agregado	Potencialmente deletéreo
Clasificación petrográfica	toba vitro - cristalina

Arena :

-Peso específico relativo	2.56
-Absorción	3.5%
-Peso volumétrico suelto	1440 kg/m ³
-Peso volumétrico compactado	1557 kg/m ³
-Pérdida por lavado	2.67 %
-Materia orgánica (prueba de color)	en el límite
-Modulo de finura	3.13

Las mezclas para la granulometría de la presa La Manzani-
lla fueron las siguientes:

Mezcla 1 6% de cemento y 6% de agua

Mezcla 2 8% de cemento y 6% de agua

Los porcentajes son referidos al peso de los agregados

El cuadro 1 presenta los resultados obtenidos en la re-
sistencia .

Cuadro 1 .Características de la mezcla de grava triturada

Contenido de cemento*	6	6	6	8	8	8
Contenido de agua*	6	6	6	6	6	6
Dimensión espécimen (cm)	15x30	30x30 x30	30x30 x30	15x30	30x30 x30	30x30 x30
Tamaño máximo de agre- gado (pulgadas)	1 1/2	3	3	1 1/2	3	3
Edad (días)	7	28	90	7	28	90
Peso volumétrico (Kg/cm ²)	2311	2207	2218	2282	2296	2280
Resistencia (Kg/cm ²)	65-72	89	105	59-66	102	118

* El contenido de cemento y agua es en base al porcentaje en
peso respecto al de agregados.

De los resultados anteriores, se obtuvieron los siguientes parámetros para la elección en el diseño de la sección de la cortina.

Resistencia a la compresión	
28 días	190 kg/cm ²
90 días	120 kg/cm ²
Peso volumétrico	2280 kg/ m ³
Módulo de elasticidad	114 600 kg/cm ²
Relación de Poisson	0.14

Debemos recalcar que los resultados de las pruebas de laboratorio sólo nos servirán como información para el diseño preliminar y de guía durante la construcción de la presa. Estos resultados se deben verificar con los obtenidos en los bordos de prueba.

La construcción del bordo de prueba nos sirve para obtener:

- 1) Densidad y resistencia
- 2) Procedimiento para asegurar la adherencia entre capas
- 3) Tratamiento de paramentos y definición de la geometría de la sección.
- 4) Adherencia del concreto rodillado con la cimentación y los empotramientos.

- 1) Densidad y resistencia

Para lograr una calidad del concreto rodillado adecuada es necesario definir el número mínimo de pasadas del equipo de compactación, así como el efecto que tiene el espesor de cada capa.

Lo anterior se logra de observar el comportamiento del equipo de compactación ante mezclas con diferente contenido de agua y cemento, con base a pruebas preliminares de laboratorio.

Es de gran importancia seleccionar el óptimo contenido de agua. El exceso traerá como consecuencia que la mezcla se adhiera al equipo o provocar que éste se atasque. Por el contrario si el contenido de agua es bajo ocasionará que se presenten fallas locales por cortante en la mezcla debido al peso del rodillo, o el cemento no podrá hidratarse por completo.

2) Procedimiento para asegurar la adherencia entre capas

Las capas se colocarán uniformemente, poniendo especial cuidado en la unión entre ellas. De antemano se debe definir cual será el óptimo tratamiento que se le dará a la capa inferior del concreto rodillado cuando se interrumpa el colado por uno o más días.

3) Tratamiento de paramentos y definición de la geometría de la sección.

Si se ha elegido para el paramento de aguas arriba una sección vertical o casi vertical, se debe de utilizar un sistema de soporte o cimbra para dicho paramento. Si no se elige un paramento vertical se deben de realizar pruebas para definir el talud permisible para evitar desprendimientos de material. En este caso no se utiliza cimbra.

4) Adherencia del concreto rodillado a la cimentación y los empotramientos.

Para comprobar la adherencia a todo lo largo de la roca basal de cimentación y la primera capa de concreto rodillado se obtendrán núcleos, se evaluarán y se determinará si la adherencia obtenida fue la adecuada. Debido a la gran importancia que tiene la homogeneidad en el material, se debe de poner especial cuidado al seleccionar el método y el equipo de compactación en las zonas donde no pueda llegar el rodillo vibratorio.

4.2 Bordo de prueba para la presa la Manzanilla.

El bordo de prueba para la presa la Manzanilla se construyó entre las ciudades de León y Silao Guanajuato y tuvo las siguientes dimensiones.

Longitud	12 m
Ancho	4.1 m
Altura	1.5 m
Talud	0.75 : 1

Los agregados que se usaron para la construcción fueron grava triturada del banco la Manzanilla y arena del río Ibarra.

El equipo utilizado en la construcción del bordo fue el siguiente:

Dosificadora de bandas

Revolvedora de 1 $\frac{1}{2}$ sacos de cemento

Camiones de volteo para transportar el concreto

Motoconformadora con cuchilla para extender el concreto

Rodillo liso vibratorio de 10 toneladas de peso

Bailarinas con motor de gasolina

4.2.1 Procedimiento de construcción del bordo de prueba para la presa la Manzanilla

- 1) El bordo se dividió en tres zonas longitudinalmente
- 2) Dichas zonas se compactaron con dos, cuatro y seis pasadas con rodillo liso vibratorio de diez toneladas
- 3) El concreto se elaboro de acuerdo con la granulometría de la presa la Manzanilla
- 4) El concreto se dosificó con porcentajes variables de cemento entre 4 y 6 %
- 5) El material se colocó sobre una base de concreto normal
- 6) El concreto se extendió en capas de 10cm de espesor por medio de una motoneconformadora con cuchilla e inmediatamente fue compactado con el rodillo liso vibratorio con cuatro, ocho y doce pasadas
- 7) Cuando el terraplén se hubo terminado, su corona fue protegida con arena húmeda para evitar la pérdida de agua en el concreto rodillado
- 8) Después se removió la protección con el objeto de extraer muestras del concreto
- 9) El paso anterior se repitió días después para obtener muestras de mediana edad

Los ensayos de resistencia, permeabilidad y resistencias corregidas para 6% de cemento y 5% de agua se presentan en los cuadros 2 y 3 respectivamente

Cuadro 2. Pruebas de resistencia

Cemento	Agua	Dimensiones	Tamaño	Edad	Resistencia	Peso
%	%	espécimen	máx. a-	(días)	(kg/cm ²)	Volumétrico
		(cm)	gregado			(kg/m ³)
			(pulg)			
4	4	15X30	1 1/2	7	12	2040
				28	22-23	2053
4	4	15X30	3	7	18	2254
				28	19-20	2085
4	4	30X60	3	28	14	2123
4	6	15X30	1 1/2	7	17-19	2129
				14	24-25	2098
				28	28-36	2140
6	4	15X30	1 1/2	7	32	2102
				28	53	2211
6	4	15X30	3	7	35	2161
				28	51-58	2184
6	4	30X60	3	28	41	2231
8	4	15X30	1 1/2	7	37	2093
				28	38-40	2084
8	4	15X30	3	7	48	2147
				28	45-54	2129
8	4	30X60	3	28	49	2260
4	6	30X60	3	28	23	2254

Cuadro 3

Permeabilidades y resistencias corregidas

	(cm/seg.)
A = 4 pasadas	2.4×10^{-3}
b = 8 pasadas	3.86×10^{-3}
	4.29×10^{-3}
c = 12 pasadas	2.87×10^{-3}
	3.53×10^{-3}

Resultados de resistencias corregidas

(6% de cemento y 5% de agua)

	Resistencia (Kg/cm ²)	Peso volumétrico (Kg/m ³)
A= 4 pasadas	64-78	1895
B= 8 pasadas	59-79	1992
C= 12 pasadas	76-79	2279

Nota: Resistencias tomadas a una edad de 35 a 40 días

Los resultados de los cuadros 2y3 indican condiciones preocupantes, debido a las bajas resistencias obtenidas. Sin embargo puntualizaremos que ésta obra fue la primera experiencia que se tuvo en México, la cual permitió conocer con mayor detalle los problemas que se tienen al construir con concreto compactado con rodillos.

Además el bordo de prueba nos ayudó a identificar dificultades que surgen tales como:

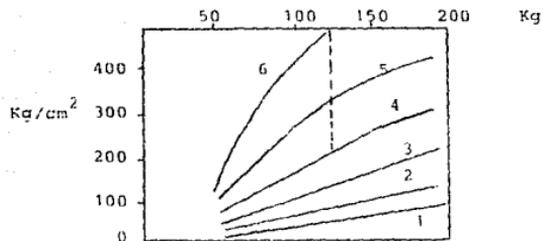
- Acondicionamiento del sitio
- Preparación de bancos de materiales
- Clasificación de agregados
- El almacenamiento
- Transportación de la mezcla al sitio
- Control de calidad durante la construcción

La construcción de cortinas de gravedad son normalmente diseñadas con consumos de cemento de 250 Kg/m³ a 300 Kg/m³ para obtener resistencias que varían entre 100 Kg/cm² y 140 Kg/cm².

Si analizamos las curvas de la figura 10, veremos la relación del contenido de cemento con la resistencia a la compresión del concreto rodillado. En dichas curvas se puede observar que para un contenido de cemento de aproximadamente 125 Kg/m³ tenemos resistencias a la compresión de 210 Kg/cm² a los 90 días, lo que implica una reducción hasta del 60% en el consumo de cemento.

Relación del material cementante/resistencia

Figura 19



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

Edad de prueba

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

Por lo tanto resulta bastante rentable construir con concreto compactado con rodillos en lo que se refiere a a consumo de cemento.

Otra cualidad del RCC es que debido a que utiliza poco cemento en la elaboración de sus mezclas, la contracción, hidratación y cambios volumétricos importantes en cortinas de concreto convencional, carece prácticamente de significado en presas de concreto rodillado.

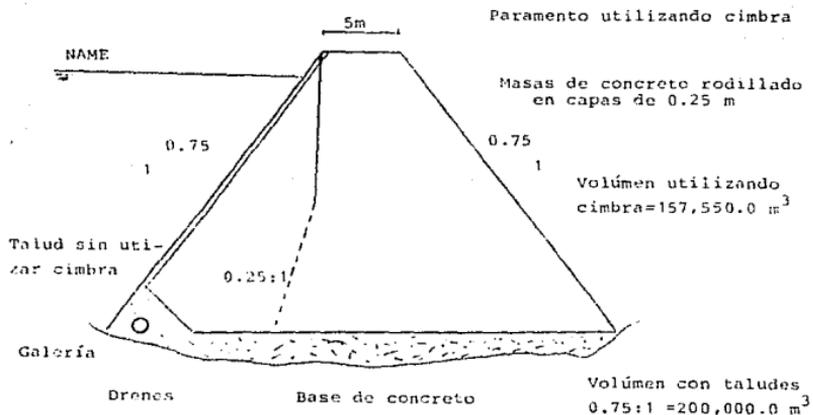
Otro aspecto importante es la resistencia, ya que ésta es función del consumo de cemento en el concreto convencional, mientras que en el concreto rodillado depende de la densidad que se quiere lograr.

Las cimbras son indispensables en la construcción de cortinas con concreto normal, en tanto que estas no son necesarias al construir con concreto compactado con rodillos. Esto implica un ahorro adicional en el costo.

Sin embargo, se puede decir que solamente através de un estudio económico nos podremos dar cuenta de la factibilidad de construir una u otra cortina, ya que el volumen de concreto por colocar es mayor en una cortina de concreto rodillado.

Opciones para presas de concreto rodillado:

Figura 20



Presa La Manzanilla, Guanajuato

Figura 21

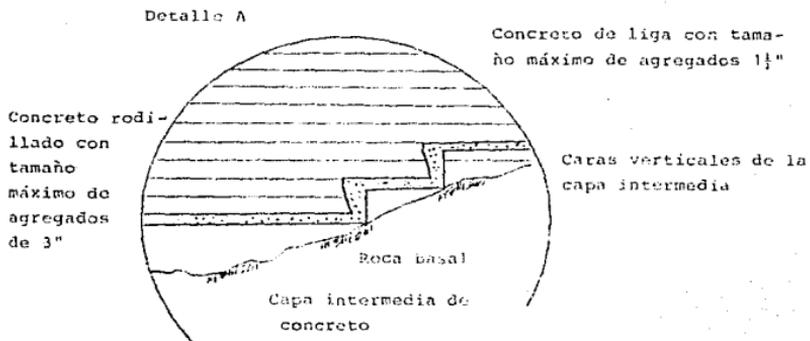
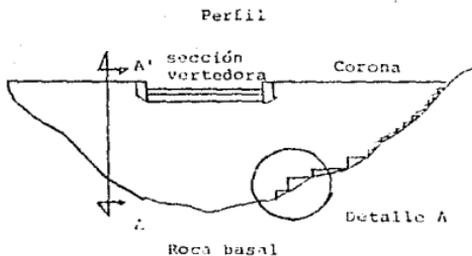
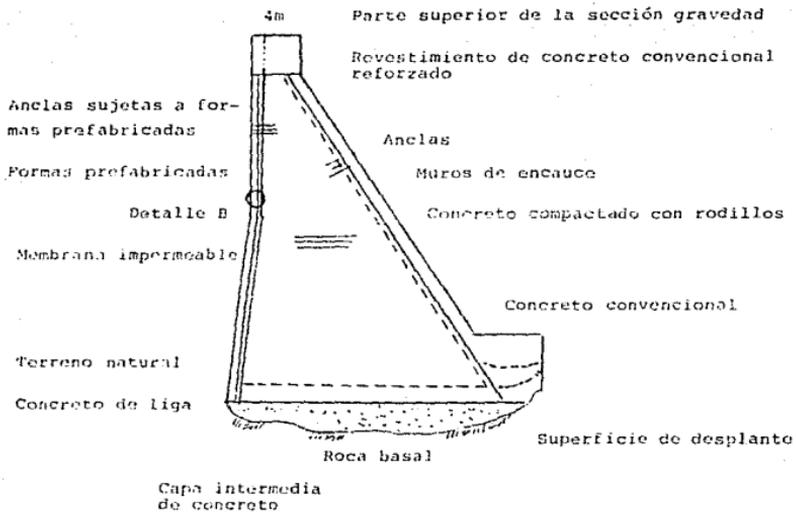


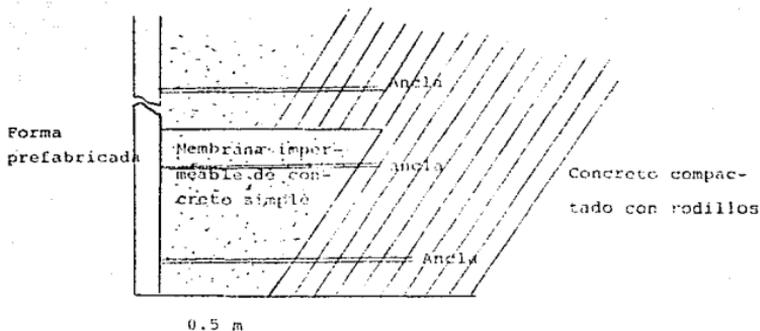
Figura 22



Dresa La Manzanilla corte A - A'

Presa La Manzanilla (Detalle B)

Figura 23



La construcción de estructuras de concreto rodillado mejorará con la experiencia. Al mismo tiempo, podrán adecuarse las herramientas analíticas que se emplean para el diseño clásico de presas de gravedad.

Actualmente es posible ensayar variantes que en la geometría clásica de las cortinas de gravedad gracias a la aparición del concreto compactado con rodillos y de los métodos de diseño para determinar el estado de esfuerzos y deformaciones en cualquier punto de una estructura y su interacción con la roca basal. Lo anterior implica que ahora se puedan construir cortinas en un tiempo menor y a un costo más bajo, pero siendo seguras, eficientes y funcionales.

Los estudios geotécnicos en el sitio de construcción son indispensables para que el proyectista pueda contar con los elementos necesarios para lograr un diseño adecuado de las estructuras .

Dichos estudios determinarán los parámetros mecánicos necesarios para el proyecto como son:

- Módulo de elasticidad
- Relación de Poisson
- Resistencia al esfuerzo cortante

Los parámetros anteriores se deberán obtener preferentemente en campo, con procedimientos tales como:

- Ensayes de placa
- El gato Goodman
- Corte directo

Se deben efectuar estudios para conocer la calidad de los materiales que se van a utilizar en la construcción, de tal manera de poder elegir aquellos que cumplan con los requisitos de calidad del proyecto, y al mismo tiempo conduzcan a la solución económica más adecuada.

Quando se hayan elegido los materiales, se debe de proceder a la construcción de bordos de prueba para conocer el comportamiento, características y cualidades en condiciones de campo de dichos materiales. Todo esto es con la finalidad de obtener especímenes para determinar:

- Peso volumétrico óptimo
- Resistencia al esfuerzo cortante
- Módulo de elasticidad
- Relación de Poisson

Con la información tanto de laboratorio como de campo se podrá verificar el diseño preliminar y será posible definir la sección de la cortina con el factor de seguridad deseado.

Con los análisis anteriores se podrá elaborar las especificaciones de construcción así mismo se establecerá el control de calidad adecuado para asegurar que la construcción de la cortina este conforme al diseño considerado.

De la información del diseño se pueden conocer las zonas críticas tanto estructural como geotécnicamente, de tal manera de poder establecer un programa tendiente a evaluar las especificaciones realizadas en el proyecto, durante la construcción y en la fase de operación.

4.3 Presa Trigomil

4.3.1 Generalidades del proyecto

En el estado de Jalisco se encuentra la cuenca del río Ayuquila, y en ésta se localiza la obra de mayor importancia que es la presa de almacenamiento Tacotán y la derivadora El Corcavado. Con estas Presas se dominan aproximadamente 9389 Has, las cuales se encuentran en operación en el distrito de riego Autlán - El Grullo. Con la construcción de la Presa de almacenamiento " Trigomil " sobre el mismo río, se pretende incorporar al riego 8636 Has, más dentro de los municipios de Autlán, El Grullo y El Limón.

La localización del sitio de la presa Trigomil se encuentra aproximadamente a $102^{\circ} 22'$ de latitud Norte y $19^{\circ} 58'$ longitud Oeste y a 15 km aguas abajo del vaso Tacotán.

Los cultivos adecuados en esta zona por las condiciones climáticas y agrológicas son : Maíz, frijol, melón, jitomate, sandía, hortalizas, sorgo, garbanzo, cártamo, arroz, perennes, caña de azúcar, alfalfa y frutales (mango, aguacate, limón, lima).

La construcción de la Presa Trigomil garantizará en su totalidad el riego para las 9389 Has, las cuales operan deficientemente por falta de agua.

Además mejorará los mantos freáticos que se abaten por una sobre explotación desmedida y, como se dijo con anterioridad se incorporarán al riego 8636 Has más.

La cortina de la presa Trigomil se proyectó para construirse de concreto compactado con rodillos, que es en resumen cuentas un concreto con revenimiento nulo, el cual es transportado, colocado y compactado utilizando el equipo de construcción que se usa normalmente para terracerías.

Las propiedades del concreto rodillado al endurecerse son similares a las del concreto convencional, pero con un importante ahorro de cemento, además tiene la ventaja que su colocación es muy rápida, ya que es continua capa tras capa.

Otra ventaja es no requerir cimbra, por tanto la ejecución de esta obra con este nuevo procedimiento revoluciona la construcción de Presas, ya que se puede realizarse en menor tiempo y a más bajo costo.

4.3.2 Datos generales de la Presa Trigomil

- Cortina de concreto rodillado con una altura aproximada desde el lecho del río hasta la corona de 97.00 m.
 - Longitud transversal de 250 m.
 - Ancho de corona 5 m
 - Sección vertedora 75 m, para descargar 3655 m³/seg
 - Obra de toma provisional para proporcionar el gasto de riego comprometido actualmente de 15 m³/seg.
 - Obra de desvío que consiste en tres conductos, dos de 4.75 m y uno de 4.5 m por 8 m de altura.
 - Seis galerías de inspección y drenaje.
 - Obra de toma definitiva para un gasto de 30 m³/seg en la margen izquierda.
- | | |
|--|----------------------------|
| - Capacidad total | 324,000,000 m ³ |
| - Capacidad de conservación | 250,000,000 m ³ |
| - Capacidad de super almacenamiento | 74,000,000 m ³ |
| - Capacidad de azolves | 25,000,000 m ³ |
| - Elevación de la corona | 1,212.30 m |
| - Elevación del NAME | 1,209.36 m |
| - Elevación de la cresta vertedora | 1,201.40 m |
| - Elevación del nivel mínimo de operación | 1,164.20 m |
| - Elevación del umbral de la toma definitiva | 1,151.50 m |

4.3.3 Planeación de la obra

Para ubicar el sitio de la obra, bancos de materiales, accesos y sitios para instalaciones (campamentos, oficinas, talleres, etc), se efectuaron recorridos de reconocimiento de la zona, los cuales se complementaron con estudios topográficos.

Cuando se ubieron terminado estos primeros trabajos, se realizaron levantamientos topográficos del sitio de la obra para definir al proyecto y diseño de las instalaciones requeridas para manejar los diferentes volúmenes de materiales a utilizar, tratando que el equipo esté balanceado.

Una vez localizados los sitios de las instalaciones, se pasó al diseño y selección del equipo que deberá utilizarse en la producción de agregados y sus caminos de acceso, también se diseñaron las plantas dosificadoras para la producción de concretos, patios para la fabricación de formas prefabricadas que se utilizaran en la cortina aguas arriba, patios para almacenamiento de materiales.

Para la producción de materiales triturados que son los principales en esta obra se instaló una trituradora marca TELESMITH con capacidad de 220 ton.

Dicha trituradora alimentará a la planta de concreto por medio de una banda de 42 pulgadas y una tubería de 24 " de diámetro.

Las tolvas de la planta de concreto se diseñaron para tener alimentación continua durante un mínimo de dos horas.

La planta de concreto fue marca ROSS con una capacidad nominal de 220 m³/hr. El concreto rodillado será transportado de la planta a la cortina mediante una tubería de 24 pulgadas de diámetro, inclinada sobre la ladera izquierda con un amortiguador en su extremo final donde se repartirá por medio de una tolva, una banda y canalones a los diferentes sitios de colado de la cortina.

Cuando se analizaron las granulometrías de los materiales triturados se observó que era pobre en arena, por lo cual se tuvo que instalar dos cribas aguas arriba de la cortina para obtener este material que se requería por especificación.

4.3.4 Organización de la obra

Esta es en base al manual de organización que la Dirección General de Irrigación y drenaje tiene estudiado y autorizado y consta de:

1) Residencia General del Proyecto, auxiliada por tres residencias especializadas:

a) Residencia especializada de promoción y tenencia de la tierra, la cual se divide en:

- Residencia de obra de avalúos
- Residencia de obra de promoción
- Residencia de obra de reacomodo y tenencia de la tierra

Las cuales tienen encomendados todos los trabajos de la tenencia de la tierra y aspecto social.

b) Residencia especializada de construcción

Se auxilia con tantas residencias de obra se requirieran, en este caso:

- Residencia de obra cortina y vertedor
- Residencia de obra galerías y obra de toma

Esta residencia tiene encomendado los trabajos propios de la construcción, tales como: trazos, nivelaciones, levantamientos de secciones, obtención de datos para avances de obra y su pago, elaboración de programas constructivos etc.

c) Residencia especializada de Investigación y Desarrollo Experimental.

Tiene como objetivo supervisar todos los trabajos en cuanto a investigación se refiere para obtener óptimos resultados

en la construcción de la obra.

d) Delegación Administrativa

Que se encarga de suministrar y controlar los recursos humanos, materiales, financiamiento, lleva el control de almacenes y campamentos, así mismo realiza los trámites para la adquisición del equipo que requiera la Residencia General.

4.3.5 Control de calidad en Trigomil

1) Localización de bancos de materiales

Para satisfacer las necesidades requeridas de la obra, se tiene que garantizar la calidad de los agregados a usarse, para ello se hacen pruebas tales como:

Peso específico, densidad, textura, rugosidad, forma, dureza, clasificación petrográfica, granulometría, contenido de humedad, etc.

2) Terraplenes y revestimiento de caminos

Se efectúan pruebas físicas en campo para la obtención de calas y recuperación de muestras para verificar la compactación de diseño.

3) Estructuras de drenaje en caminos de acceso

Como dichas estructuras son de concreto hay que supervisar y verificar que la calidad satisfaga las normas establecidas para ello se muestrea el material colocado en obra, así como en su fabricación, manejo y colocación.

4) Diseño de mezclas para la elaboración de concretos.

Se deben de apegar a las especificaciones de diseño, poniendo especial cuidado en los contenidos de agua y de cemento, también se deben de elaborar testigos de las mezclas, los cuales nos indicarán con los resultados obtenidos, la aplicación de dichos diseños.

5) Control de calidad de los concretos y los materiales ya elaborados

Se deben recuperar muestras de los materiales ya colocados

para verificar si su calidad se apega a las especificaciones de diseño.

6) Supervisión para la colocación adecuada de los concretos en la obra

Primero se deben observar que la cimbra cumpla con los requisitos para lo cual fue proyectada, troquelada correctamente limpia la zona de contacto.

Vigilar que el concreto no tenga una caída libre mayor de 1.5 m, que sea correctamente vibrado, colocado en capas y cuando haya una interrupción del colado debe de humedecerse la superficie de contacto en forma adecuada, sin excesos, todo esto para evitar la formación de juntas frías.

Como tratamiento final a un colado se debe supervisar que éste curado con agua en forma correcta durante el tiempo necesario.

7) Supervisión de las actividades geomecánicas y de geotecnia

Las primeras se inician con la preparación de los nichos y superficies en las galerías, para realizar las pruebas de gato plano, gato goodman y roseta.

Lo anterior nos indica el índice de calidad de la roca, el esfuerzo - deformación, y recuperación de muestras.

Los trabajos a realizar en las actividades de geotecnia son: levantamiento geológico para el diseño del tapete de consolidación que sirve para evitar las posibles filtraciones. Los datos que se obtienen del levantamiento son: rumbo, inclinación, orientación y profundidad de las fracturas para así poder diseñar el tipo de mezclas a inyectar para impermeabilizar el terreno.

4.3.6 Trascendencia social de Trigomil

Beneficios que se obtendrán con la construcción de la Presa Trigomil y sus obras complementarias.

- 1) Genera una gran cantidad de empleos predominando los de carácter técnico y artesanal, con esto se beneficia económicamente las poblaciones cercanas al lugar de construcción.
- 2) Al mismo tiempo que la construcción de la Presa, se llevan a cabo los trabajos previos al trámite de las indemnizaciones de los terrenos y bienes accesorios que serán ocupados por el embalse.

Actualmente en el vaso de la presa se encuentran 13 poblados con un total de 102 casas habitación, de las cuales 76 están habitadas. Dichas viviendas se indemnizarán en especie y el resto en efectivo.

Los terrenos que ocupan las obras se expropiarán y serán indemnizados conforme a los valores que fije la Comisión de Avalúos de Bienes Nacionales.

- 3) El camino que se ha construido y que va de la carretera federal No. 80 al lugar donde se construye la Presa, beneficia a varias rancharías.
- 4) El volumen de agua que almacenará la Presa servirá para que se establezca un cultivo de pez, de tal manera de producir una cantidad suficiente para exportarlo a ciudades circunvecinas, mejorando con ello la economía de la región e incrementando la alimentación de sus pobladores.

- 5) La vegetación mejorará en los terrenos contiguos al embalse por lo cual la ganadería de la región se incrementará.
- 6) Como el objetivo principal de esta Presa es el almacenamiento de agua para uso agrícola, se beneficiará una extensión de 8626 Has, para cultivar caña, jitomate, melón, sandía de exportación, sorgo, maíz, etc.
- 7) Con el agua de la presa se beneficiarán directamente para regar sus terrenos 1185 familias de régimen ejidal y 121 propiedad privada.
- 8) Además del beneficio directo que trae consigo la obra, los habitantes de la región se verán favorecidos por el amplio número de empleos que generan los cultivos, que consiste desde la preparación del suelo hasta el empaque de los productos que lo requieran.
- 9) Con lo anterior se puede observar que la inmigración a ese lugar se incrementará. Además con esta obra se evita que los pobladores de la región emigren a otras ciudades o al extranjero.

Figura 24

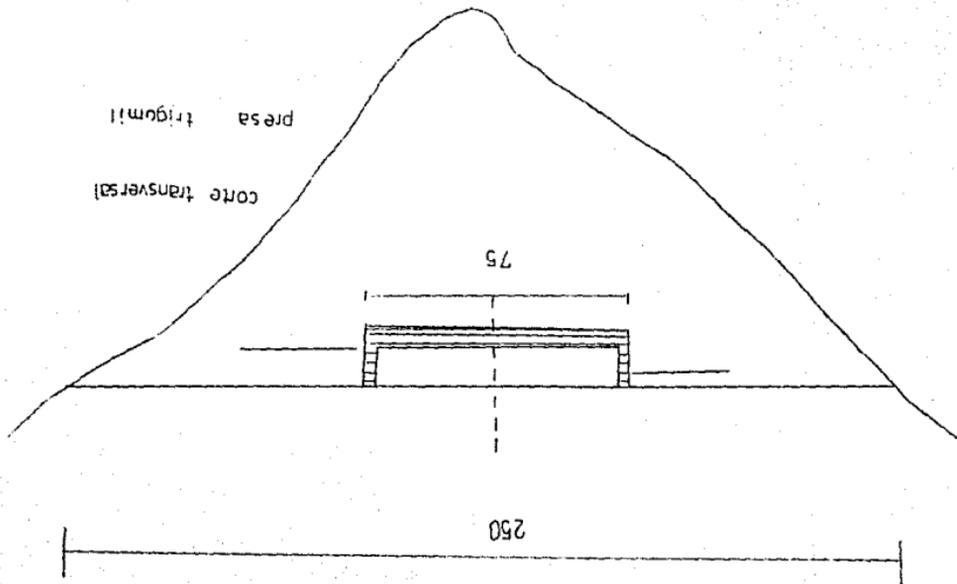
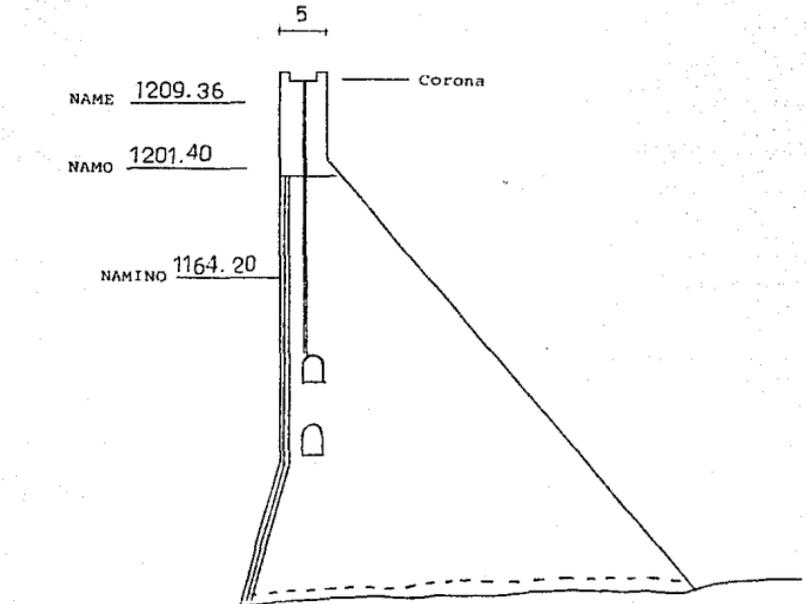


Figura 25



corte longitudinal

presa trigomil

CAPITULO V

5.1 Aplicación del concreto compactado con rodillos en pavimentos

El concreto compactado con rodillos se ha convertido en una técnica económica de diseño y de construcción para pavimentos de trabajo pesado. Las economías se logran por la rapidez de la construcción la reducción de juntas y costos menores de materiales.

El concreto rodillado no debe estar limitado a patios de carga, instalaciones para acarreo de troncos y aplicaciones similares que fueron lo común de sus primeros usos en pavimentación. Puede ser utilizado, y de hecho lo ha sido, en aeropuertos y en carreteras.

Aunque algunas aplicaciones pueden requerir o justificar resistencias elevadas y superficies lisas, una resistencia elevada no necesariamente resulta en una economía o una vida de servicios mejores.

Por el contrario, una resistencia más elevada puede resultar en mayor costo, mayor contracción, mayor fragilidad (módulo de elasticidad), mayores exigencias por juntas y controles de construcción más restringidos. Los propietarios, los contratistas y los diseñadores deben darse cuenta de las condiciones inherentes a una resistencia más elevada. Los diseñadores deben considerar colectivamente la construcción (técnica, equipo y programa), las propiedades de los materiales (fatiga, fluencia, contracción, comportamiento térmico, módulo elástico y resistencia a la flexión), los requisitos de la superficie (rodamiento, textura y durabili-

dad), requisitos de la base, rizamiento, materiales disponibles (agregados, cemento y ceniza volante) y después el espesor de diseño.

Es fácil lograr un concreto rodillado de resistencia elevada en el laboratorio o durante colados de prueba y después confiar en esta resistencia para la base de diseño sin prestarle mucha atención a los otros factores pertinentes que afectan una obra.

Ejemplo cuando se quiere lograr una resistencia de flexión en viga de 600 psi, ésta requiere una mezcla que tiene 100 psi de esfuerzo adicional de contracción, esto no es mejor que una mezcla de 500 psi de resistencia a la flexión, sin el esfuerzo de contracción adicional.

Indudablemente, la mezcla con 600 psi tendrá más material aglutinante, agregados más caros y un costo más elevado y, sin embargo, no es mejor.

Existe un gran número de ejemplos posibles, algunos de los que pueden justificar mezclas de concreto rodillado de resistencia elevada pero no mostrarán, en su mayoría, un rendimiento negativo a la inversión. La misma situación se presenta en pavimentos de concreto convencional, pero el punto de " viraje " se alcanza comunmente a niveles inferiores de resistencia en el concreto rodillado. Consecuentemente, depender de experiencias pasadas y emplear juicios de concreto convencional para el concreto compactado con rodillos, puede resultar en diseños menos que óptimos.

Puesto que el costo de mezclas de concreto colado convencionalmente es mayor que el de mezclas eficientes de concreto rodillado, usualmente es menos costoso incrementar la resistencia para pavimentos convencionales que incrementar el espesor para una condición de carga dada. En algunos trabajos en aeropuertos se dedica mucho tiempo y gastos a mejorar y a tratar el sub-firme o la base. Con mezclas eficientes de concreto rodillado el costo de la base puede estar muy cercano al costo de este concreto, por lo que sencillamente incrementar el espesor del concreto compactado puede ser una opción muy económica.

Un beneficio adicional muy importante de los pavimentos más gruesos de concreto rodillado es el de menor rizamiento y menores esfuerzos de rizado.

Cuando se emplea una sección más gruesa debido a su resistencia menor (resultando en una economía global debido al contenido reducido de cemento), ocurrirá menor contracción y por tanto menos juntas y menos grietas. Esto significa menos mantenimiento y menos área donde puede desarrollarse el rizado.

Las interrelaciones de todo el sistema de pavimentos han comenzado a hacerse evidentes en este examen. Ahora también, deben hacerse a un lado las ideas antiguas. El sistema de concreto rodillado debe ser completamente diseñado empleando todas las propiedades y ventajas que posee, no empleando conceptos y prácticas basadas en años de experiencia con el concreto convencional.

Otra preocupación es el acabado de la superficie. Un aspecto es la calidad de rodaje y otro es lograr una superficie " cerrada " sin hendiduras o agrietamiento en la superficie que puedan contribuir a la intemperización o deterioro con el tiempo. Ambos aspectos son realmente preocupantes y han resultado en el empleo de granulometrías más finas en el concreto rodillado, agregados más costosos, contenido aglutinante más elevado (con su correspondiente costo y contracción) y controles de construcción más difíciles en algunos de los proyectos de pavimentación con concreto compactado con rodillos. Como enfoque alternativo podría emplearse una mezcla más económica con menos contracción y requisitos más tolerables de acabado de la superficie. El ahorro podría aplicarse entonces, en un pavimento más grueso y/o en una delgada capa de revestimiento de asfalto que proporcionaría un rodaje más uniforme, curado y protección a largo plazo contra la intemperie. Una superficie de asfalto también reduce al mínimo el choque térmico en la parte superior del concreto rodillado y evita ciclos rápidos de mojadura y secado.

Puesto que el asfalto tiene un apoyo rígido y es delgado, puede emplearse una mezcla fina con aceite menos viscoso y más capacidad de puntear las grietas. Los problemas de surcos y de flujo que a veces impiden el empleo de este tipo de mezcla en pavimentos gruesos de asfalto, no son aplicables en este caso.

Existe gran diversidad de ejemplos que pueden utilizarse para demostrar que espesores grandes de pavimento con concreto rodillado resultan más económicos y mejores. Existen también algunas situaciones en las que no podemos aplicar este método, como cuando las pendientes existentes no lo permiten. Las situaciones hipotéticas siguientes se emplean para ilustrar mejor este concepto.

Aplicación	- Pista de rodaje en aeropuertos
Cargas	- Boeing 727
Vida de diseño	- 20 años
Despegues anuales	- 4000
Sub-firme	- $K=35.23 \text{ Kg/cm}^2$
Tamaño del proyecto	- 125,419 metros cuadrados

	Caso I RCC	Caso II RCC	Caso III Concreto convencional
Cemento (Kg/m^2)	133.8	285.4	339
Ceniza volante (Kg/m^3)	0	71	77
$f'c$ a 90 días (Kg/cm^2)	212	353	494
Agua (Kg/m^3)	113	155	190
Mor a 90 días (Kg/cm^2)	32	49.4	54
Contracción 1 año al 50% RH (millonésimas)	260	400	650
Módulo elástico sostenido + (millones de Kg/cm^2)	0.113	0.27	0.30

	Caso I RCC	Caso II RCC	Caso III concreto convencional
Coef.de expansión (millonésimas/grado F)	3.9	4.0	4.1
Esfuerzo de contracción + a 1 año (Kg/cm)	21	107	193
Relación de esfuerzo-fatiga	0.53	0.53	0.60

+ Incluye fluencia.La contracción comienza a los 14 días

Empleando las recomendaciones de la PCA para vida de fatiga resultan los siguientes espesores de diseño y probable agrietamiento-junteo.También se muestra el número probable de juntas transversales y su movimiento después de tomar en cuenta la fricción por deslizamiento, la fluencia y la deformación elástica.En el ejemplo se utilizaron tanto la contracción por secado en campo como la contracción térmica para 40°F. Los esfuerzos de rizado se calcularon considerando que existía un diferencial de 30¢ en la contracción por secado entre la parte superior y la inferior de las losas y también ocurrieron diferenciales de temperatura de 15,13 y 12 °F entre la parte superior y la inferior del grosor del pavimento en los casos I,II,III, respectivamente.

El área de 125,419 metros cuadrados estaba siendo considerada para dos pistas de rodaje de cuatro carriles cada una.

La práctica normal ha consistido en colar los pavimentos de concreto rodillado sin espigas de fijación,ondentados, - juntas aserradas y sellador.

Esto ha sido razonablemente exitoso pero, por conservadurismo, esta estimación presupone el empleo de juntas transversales aserradas con sellador en el concreto rodillado. Es posible que una mezcla de concreto compactado de menor resistencia que la empleada en el ejemplo desarrolle muchas grietas finas que son totalmente puenteadas por una capa de recubrimiento de asfalto y que aparecen en la superficie. En este caso puede ser posible construir el concreto rodillado sin juntas de contracción. Siguiendo la práctica estándar en el pavimento de concreto convencional se emplean juntas transversales aserradas con espigas de fijación, sellador y varillas de amarre en las juntas longitudinales.

	Caso I	Caso II	Caso III
	RCC	RCC	Concreto Convencional
Espesor (cm)	38	30.5	26
Espaciado de juntas (m)	61	37	12
Abertura de juntas (cm)	1	1.6	1
Esfuerzo de rizado en esquina (kg/cm)	15	35	52
Número de esquinas	784	1300	3872
Número de juntas transversales	192	321	964

Se desarrollaron los siguientes costos comparativos que se consideraron razonables y comunes. Gastos indirectos, utilidades e imprevistos han sido distribuidos en cada punto sobre la misma base para poder presentar costos al propietario o a la dependencia que contrate la obra. Cada situación debe evaluarse individualmente. El resultado depende de las condiciones específicas en la obra y de los materiales disponibles. Para el ejemplo se consideró que la mezcla II estaba hecha con ceniza volante, cemento, arena ASTM, y agregados ASTM de 1/2 pulgadas. Se consideró que en la mezcla I se empleó cemento, pero no se empleó ceniza volante, y un agregado " all in " (todo junto), consistente en un firme de camino disponible, con tamaño máximo de 1 1/4 de pulgada. La mezcla I no requiere la misma planta de mezclado que la mezcla II (sin silo para ceniza, un solo agregado, sin aditivos). Idealmente, una fuente de firme de camino que fue rechazado por tener demasiados finos no plásticos, estaría disponible y los costos serían todavía menores.

Se asumió que las tolerancias de la superficie para el caso II eran de 1/4 de pulgada en 3 metros, requiriéndose una construcción de dos cursos (7 y 5 pulgadas). En el caso I se empleó un solo curso con una variabilidad permitida de 1/2 pulgada en 4.5 metros para el concreto rodillado y de 1/4 de pulgada en 4.5 metros para el recubrimiento de cemento asfáltico.

Costo por metro cuadrado

	Caso I	Caso II	Caso III
Cemento	5.68	9.69	10.06
Ceniza volante	0	1.94	1.85
Aditivo	0	0.08	0.08
Agregado	1.36	4.3	4.25
Mezclado	1.33	1.72	2.39
Entrega	0.83	0.89	1.65
Primera colada	1.44	0.71	2.74
Segunda colada	0	0.71	0
Trabajo remedial en superficie	0	0.41	0.41
Curado	0.24	1.76	0.48
Juntas	0.08	0.13	1.56
Pavimentación con asfalto	2.25	0	0
Total	\$15.21/m ²	\$22.33/m ²	\$25.49/m ²

Nota: El precio esta en dolares por metro cuadrado.

Los costos para las mezclas básicas de concreto (ingredientes más el mezclado) son de \$27.2,\$58.2,\$69.9 por metro cúbico para los casos I, II y III respectivamente.

Como se muestra en el ejemplo, un pavimento de concreto rodillado de mayor grosor, empleando resistencias menores puede ser más económico que un pavimento delgado de concreto compactado con rodillos con resistencia más elevada. Tal vez de mayor importancia: las mezclas de menor resistencia requieren menos juntas y presentarán menos agrietamiento, tendrán menos esfuerzos de rizado y deben requerir menos mantenimiento. Cuando se emplea un recubrimiento delgado de asfalto, las mezclas de concreto rodillado de menor resistencia pueden terminar con mejor calidad de rodaje empleando controles menos restrictivos de construcción y de equipo. Además, el asfalto proporciona al concreto compactado protección contra ciclos rápidos de mojado-secado así como contra cambios rápidos de temperatura de la superficie. También actúa como agente de curado a largo plazo y reduce el resecaimiento de la superficie que conduce a esfuerzos de rizado y al agrietamiento de la superficie.

5.2 Comparación entre pavimento con concreto compactado con rodillos y bases estabilizadas con cemento.

El uso del concreto compactado con rodillos en pavimentos evolucionó a partir del uso del suelo cemento y de las bases estabilizadas con cemento. Aunque el equipo utilizado es el mismo que se usa en la estabilización de una base, el concreto rodillado requiere un mejor control de calidad y más cuidado en el proporcionamiento.

La maquinaria usada en la construcción de una base estabilizada o un suelo cemento es generalmente menos sofisticada que la utilizada en la colocación y terminado de un pavimento con concreto rodillado. Las mezclas de concreto rodillado para pavimentos tienen más material cementante que una base estabilizada, y difiere del suelo cemento en que contiene agregado ordinario.

La principal y más importante diferencia entre el concreto compactado con rodillos usado en pavimentos y la base estabilizada con cemento o suelo-cemento, es que el concreto rodillado es diseñado para ser un verdadero pavimento de concreto utilizando cemento portland, considerando esfuerzos estructurales y todas las características que pudiera tener un concreto convencional. Los pavimentos con concreto rodillado son diseñados para resistir la abrasión del tráfico, durabilidad cuando este expuesto a climas extremos y una superficie satisfactoria para los requerimientos usuales del tráfico.

5.3 Diferencias entre el concreto rodillado para pavimentos y el concreto rodillado para presas.

El concreto rodillado en pavimentos difiere significativamente del concreto rodillado para presas, éste último es simplemente una mezcla con un contenido bajo de cemento sin revenimiento, usado para construcción de estructuras masivas. Las mezclas de concreto compactado con rodillos para pavimentos tienen mucho más cemento y material cementante así como ordinarios agregados pequeños.

Típicamente el contenido de material cementante varía de 300 a 330 kilogramos por metro cúbico, y un agregado máximo de 19 milímetros, para las mezclas de concreto rodillado usadas en pavimentos. Estos factores permiten que la mezcla para pavimentos sea más trabajable que la mezcla usada en presas, aunque la mezcla para pavimentos es sin revenimiento, debe de estar lo suficientemente rígida para soportar el peso del rodillo vibratorio.

5.4 Ejemplos de aplicaciones del concreto rodillado en pavimentos.

Aunque en los Estados Unidos se estaban haciendo lentos progresos con el concreto rodillado para presas en la década de los setentas, solamente una pequeña sección de concreto rodillado para pavimentos de 4 X 30 metros fue instalada en un centro de investigación para su estudio en 1975. Sin embargo los ingenieros y contratistas en Columbia Británica, Canadá han tenido excelentes resultados con el empleo del concreto compac-

tado con rodillos en pavimentos, colocando una delgada capa de concreto asfáltico en la superficie del concreto rodillado. Esto ha sido usado en la construcción de patios de carga. El primer patio de carga construido con este método en Columbia Británica fue un patio para la industria de productos forestales en Cayuse, el patio se construyó en 1976 e incluyó 16000 metros cuadrados de pavimento con concreto rodillado, con un espesor de 14 pulgadas (30cm). Dos hectáreas más fueron agregadas en 1979. En este proyecto se utilizó un máximo agregado de 19mm. La primera capa fue de 6 pulgadas tuvo un contenido de cemento de 12% en peso y la segunda capa fue de 8 pulgadas y tuvo 8% de cemento en peso. La mezcla fue hecha en una planta de mezclado para concreto rodillado. Esta planta es similar a las que se usan para la dosificación del concreto asfáltico. La mezcla fue llevada al sitio mediante camiones, una vez ahí la mezcla se compactó y durante los 14 días siguientes el pavimento fue curado con una pipa con sistema de irrigación.

Las cargas de servicio de este patio oscilan entre 120 toneladas, sin embargo no hay ningún problema estructural y la superficie está en excelentes condiciones hasta la fecha.

Otra aplicación de pavimentos con concreto rodillado en Canadá fue la construcción de una carretera para cargas pesadas. Esta carretera se construyó en 1983 en un clima verdaderamente frío. El espesor de la carretera fue de 6 1/2 pulgadas de concreto rodillado y una pulgada de recubrimiento de asfalto. La mezcla de concreto rodillado tuvo 12% de material cementante. Se aplicó un curado inmediato con agua y después

el pavimento fue curado con una emulsión asfáltica.

Des años mas tarde algunos investigadores inspeccionaron la carretera para conocer su durabilidad en un clima severo, encontrando que la superficie de asfalto estaba considerablemente deteriorada, pero el concreto rodillado se encontraba en buenas condiciones.

Las cargas de servicio de la carretera oscilan alrededor de 80 toneladas. Lo anterior nos da una clara idea de las ventajas que puede tener el concreto rodillado en pavimentos, ya que éste material es durable en climas fríos soportando considerables cargas.

El primer proyecto significativo de concreto compactado con rodillos en pavimentos en los Estados Unidos, fue la construcción de un estacionamiento para trailers en Texas en Agosto de 1984.

El espesor del pavimento fue de 10 pulgadas y el costo de colocación fue de 76 dolares por metro cúbico.

La mezcla de concreto rodillado tuvo 136 kg de cemento portland y 73 kg de ceniza volante. El tamaño máximo de agregados fue de una pulgada y media. Este tamaño de agregado tuvo algunos problemas.

Había una tendencia a la segregación durante su manejo y el acabado de la superficie no fue muy bueno que el obtenido con agregados más pequeños.

El clima fue otro problema en el proyecto, ya que cuando estaba muy caluroso y con viento, hacía que la superficie del pavimento se secase rápidamente.

Otra aplicación del concreto rodillado usado en carreteras en los Estados Unidos, fue la construcción de un pequeño tramo de camino para investigación. Esta prueba fue realizada en Fort Lewis, Washington. Las características de la prueba fueron las siguientes:

Ancho 6.9 m
Largo 210 m
Espesor 6.5 pulgadas

Las mezclas usadas en esta prueba se presentan en la siguiente tabla:

Mezclas para la prueba de carretera de Fort Lewis por metro cúbico.

Material	Mezcla A	Mezcla B
Cemento Portland	210 kg	312 kg
Ceniza volante	108 kg	-
Agregado	1161 kg	2100 kg
	3/4 pulg. grava	5/8 pulg. grava
Arena	936 kg	-

Material	Mezcla A	Mezcla B
Agua	100 litros	120 litros
Esfuerzo de fluencia a los 28 días	42.3 kg/cm ²	56 kg/cm ²
Esfuerzo de fluencia a los 90 días	48.3 kg/cm ²	67.2 kg/cm ²

La conclusión de la tabla anterior es que la mezcla B tiene de 30 a 40 % más resistencia que la mezcla A.

Otra aplicación de éste método de construcción fue el Puerto de Tacoma en Washington.

Dicho proyecto se empezó a construir en Abril de 1985. El área de pavimentación fue de 41,000 metros cuadrados. El espesor del concreto rodillado osciló entre 12 y 17 pulgadas. Las mezclas fueron diseñadas con:

Cemento Portland	270 kg/m ³
Ceniza volante	60 kg/m ³
Agregado	tamaño máximo 5/8 de pulgada de grava triturada

Para la primera etapa del proyecto, el costo de la pavimentación con concreto compactado con rodillos fue de 1,764,000 dolares contra 2,275,000 dolares que fue el precio que arrojó la opción de construir el proyecto con concreto convencional.

5.4.1 Uso del concreto rodillado en aeropuertos.

En 1985, en Oregon Estados Unidos se construyó un estacionamiento para aviones jumbo 747. Dicha área de estacionamiento fue de más de 3 hectáreas. Las alternativas de construcción fueron el concreto asfáltico y el concreto rodillado, siendo éste último la alternativa más económica, ya que arrojó un costo de 25 % menor que el concreto asfáltico. El costo total del concreto rodillado fue de 53.6 dolares por metro cúbico colocado.

El espesor del pavimento fue de 14 pulgadas.

La mezcla consistió en:

Cemento	297 kg/m ³	
Ceniza volante	71.4 kg/m ³	
Agua	156 kg/m ³	
Tamaño máximo de agregado de 3/4 de pulgada		1954 kg/m ³
Curado de 24 hrs, durante 7 días con vapor de agua.		

5.5 Durabilidad de pavimentos con concreto compactado con rodillos.

Una cualidad del concreto rodillado usado en pavimentos, es su durabilidad en climas fríos. Esto fue comprobado con los pavimentos construidos en Canada, los cuales estan expuestos a ciclos de congelamiento muy severos, sin embargo los pavimentos no muestran ningun problema con el frío durante su servicio.

Actualmente se esta investigando cuales son las características intrínsecas del concreto rodillado, las cuales lo protegen del frío intenso. Se ha especulado diciendo que la durabilidad de éste material se debe al aire atrapado durante su colocación, pero esto aún no ha sido comprobado y solo continuando con la investigación del concreto rodillado se podrán conocer sus características.

5.6 Altos esfuerzos resistentes en el concreto rodillado, en pavimentos.

El diseño estructural del concreto rodillado en pavimentos es similar al usado en pavimentos convencionales. El concreto compactado tiende generalmente a tener más altos esfuerzos de fluencia que los pavimentos de concreto convencional con el mismo contenido de cemento. Lo anterior pueda ser por la baja relación agua-cemento y por la alta consolidación en el concreto rodillado.

Originalmente el concreto rodillado fue considerado que serviría solamente para pavimentos en los cuales las velocidades fueran bajas, para estacionamientos y patios de carga.

Sin embargo los usos recientes indican que también puede usarse con alta calidad en autopistas, las cuales presentan velocidades de rodaje muy altas.

CONCLUSIONES

El concreto compactado con rodillos es una alternativa económica en la sustitución de presas de concreto convencional, enrocamiento y materiales graduados. En general el concreto masivo puede realizarse a un ritmo de producción alto y bajo costo, si se utiliza éste método de construcción.

Con la información recabada hasta ahora, se puede decir que una de las ventajas del concreto rodillado se deriva de un consumo de cemento bajo la elaboración de sus mezclas, así como la maniobrabilidad y rapidez de su colocación en comparación con las estructuras construidas con concreto convencional.

Los estudios geológicos para el diseño de la cimentación, localización de bancos de materiales así como la calidad de éstos, son análogos a los que se realizan para el diseño de una presa tipo gravedad.

Los diseñadores de este material deben investigar a fondo las peculiaridades y características del concreto construido con métodos de compactación vibratoria, a fin de obtener un diseño adecuado de mezclas económicas y seguras para la construcción de estructuras masivas.

En México, el diseño de mezclas de concreto rodillado se encuentra en una etapa inicial. Por ello es necesario investigar, ensayar en el campo y en el laboratorio combinaciones de mezclas que nos lleven a conocer los parámetros significativos que condicionan su comportamiento, tanto al elaborarse como cuando se han endurecido.

Lo anterior no es una limitación al nuevo material, sino al contrario es un reto a la creatividad, inventiva e imaginación

del ingeniero que diseñará, proyectará y ejecutará esta clase de proyectos.

Es necesario seguir investigando acerca de la preparación de la superficie de desplante, la adherencia entre capas, el problema de las juntas frías, el número mínimo y máximo de pasadas del equipo vibratorio, la colocación en empotramientos, el tiro, tendido y compactación del concreto, la construcción de paramentos impermeables, la colocación de cimbras o formas prefabricadas cuando se requieran paramentos verticales y sobre todo el equipo más adecuado para la construcción.

Al mismo tiempo del desarrollo de las técnicas de diseño y construcción del concreto rodillado, se deberán preparar los procedimientos para el control de calidad, ya que es necesario supervisar que la obra se ejecute conforme a lo planeado.

Las estructuras construidas con concreto rodillado deberán instrumentarse de tal manera que podamos conocer su comportamiento ante las sollicitaciones externas e internas que la afecten.

Con este conocimiento podremos en el futuro proyectar obras hidráulicas de mayor tamaño.

El presente trabajo no desea presentar el concepto de concreto rodillado como algo inmaduro y que aún no ha sido investigado a fondo, sino como una alternativa económica para la ejecución de proyectos de ingeniería, que ha sido usada con éxito en otros países y que, en el nuestro, puede competir con ventaja con las construcciones tradicionales de obras de infraestructura hidráulica tales como cortinas de gravedad o materiales graduados.

BIBLIOGRAFIA

Roller Compacted Concrete

Ernest K. Schrader

Portland Cement Association

Old Orchard Road Skokie, IL 60076

Presas de concreto rodillado

Antonio Mosqueda Tinoco

Ingeniería hidráulica en México, Septiembre-Diciembre de 1985

What is Roller Compacted Concrete?

Concrete Construction

Septiembre de 1982

El concreto compactado con rodillos y el rolacreto
en las presas.

Robert W. Cannon

Revista IMCYC, Vol. 24, Num. 183, Agosto de 1986

The first concrete gravity dam designed and built for roller
compacted construction methods.

Ernest K. Schrader

Concrete International, Octubre de 1982

The rolled dry lean concrete gravity dam.
Moffatt A.I.B and price A.C. Water power and dam
construction, July 1987

Roller Compacted Concrete

Developments in the USA

K.D Hansen

Water Power and Dam Construction, enero de 1986

Paving with roller compacted concrete

Oswin Kelfer Jr.

Concrete Construction, marzo de 1986

Pavimentación con losas de concreto compactado con rodillos.

Ernest K. Schrader

Curso que se impartió en el INCYC en septiembre de 1987

Presa de almacenamiento Trigomil

SARH Dirección General de Irrigación y Drenaje