

# XIV CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA CIVIL

## DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACION DE SUELOS

Ing. Miriam R. Escalaya Advíncula <sup>1</sup>  
Dr. Jorge E. Alva Hurtado <sup>2</sup>

### 1.0 INTRODUCCIÓN

El Concreto Compactado con Rodillo (CCR) es probablemente el más importante desarrollo en la tecnología de presas en los últimos años, ganando aceptación alrededor del mundo en un relativo corto tiempo debido a su bajo costo, el cual es derivado en parte por su rápido modo de construcción. El método de CCR se desarrolló no sólo a partir del esfuerzo de algunos diseñadores de presas de concreto, sino también del trabajo de ingenieros geotécnicos, quienes tradicionalmente han diseñado terraplenes de tierra y enrocado. Esta combinación de esfuerzos ha originado la construcción de presas de concreto por métodos usualmente asociados con la construcción de presas de tierra. El producto es una presa menos costosa con la misma inherente seguridad de una presa de concreto convencional.

El Concreto Compactado con Rodillo, se suele usar también en la construcción de pavimentos y áreas de almacenamiento. La rapidez de la puesta en obra, el relativamente bajo contenido de cemento y la utilización de aditivos minerales (cenizas volátiles, filler calizo, residuos mineros, etc.), explican el motivo por el cual este material es económicamente interesante para la industria de la construcción.

El presente trabajo muestra los principales aspectos teóricos del desarrollo de esta técnica y las posibilidades del empleo del diseño de mezclas haciendo uso del Concepto de Compactación de Suelos que permita la optimización del CCR, utilizando la energía necesaria para la puesta en obra de este tipo de material. Estos conceptos son necesarios para una segunda fase experimental a realizarse en los Laboratorios del Cismid, UNI, que consistirá en un diseño preliminar de mezclas basado en los procedimientos geotécnicos y determinar varias propiedades del CCR.

### 2.0 CONCEPTO

El Concreto Compactado con Rodillo se define como "Un concreto de consistencia seca, asiento nulo, que se coloca de forma continua y su compactación se realiza con un rodillo normalmente vibrante".

De esta manera el CCR difiere del concreto convencional principalmente en su consistencia requerida. Para la consolidación efectiva, la mezcla de concreto debe ser lo suficientemente seca para

---

(1) Postgrado en Ingeniería Geotécnica

(2) Profesor Postgrado, Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Nacional de Ingeniería

prevenir el hundimiento de los equipos de rodillo vibratorio, pero lo suficientemente húmeda para permitir la adecuada distribución del mortero conglomerante en el concreto durante el mezclado y la operación de la compactación vibratoria. (Ref. 1)

Actualmente, las presas de Concreto Compactado con Rodillo han sido diseñadas y construidas en muchos países en todas partes del mundo. El interés por este tipo de presas se ha incrementado, debido a la creciente aceptación de su empleo como concreto masivo en la construcción de presas, a la velocidad de construcción, a su bajo contenido de cemento y su condición de asentamiento nulo. Así también, un avance reciente es el empleo cada vez mayor del CCR como material durable de pavimentación que soporta cargas pesadas.

### **3.0 FILOSOFÍAS DE DISEÑO**

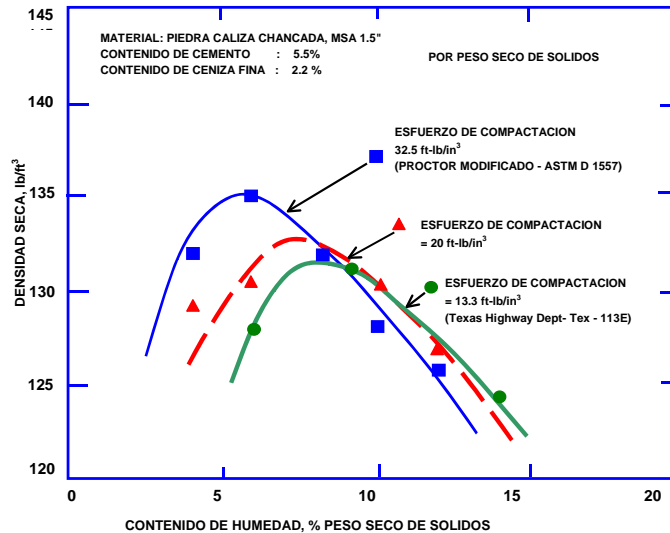
En el desarrollo de la Tecnología del Concreto Compactado con Rodillo (CCR), han surgido dos filosofías o aproximaciones con respecto a los métodos de diseño de mezclas del CCR. Ellas pueden ser calificadas como la Filosofía de Suelos o Geotecnia y la Filosofía de Concreto (Ref 2). Las aproximaciones de dosificación de mezclas se diferencian significativamente dependiendo de la filosofía del tratamiento del agregado, ya sea como agregado de concreto convencional o como agregado utilizado en el vaciado de terraplenes estabilizados.

Las mezclas de CCR producidas usando métodos de diseño de concreto tienen una consistencia más fluida que las mezclas con aproximación a suelos debido a que hay más pasta en la mezcla que áridos.

#### **3.1 LA FILOSOFÍA DE SUELOS**

La filosofía de suelos considera al CCR como un suelo procesado o agregado enriquecido con cemento, cuyo diseño de mezcla está basado en la relación humedad-densidad. Para un agregado específico y un contenido de material cementante, el objetivo es determinar un contenido óptimo de humedad para un esfuerzo de compactación de laboratorio que corresponde al esfuerzo o densidad aplicable por los rodillos en el campo. En la aproximación a suelos, la pasta (cemento, puzolana, agua) no rellena generalmente todos los vacíos en los agregados después de la compactación.

Los principios de compactación desarrollados por Proctor en los inicios de 1930, son aplicados a las proporciones de mezclas de CCR con aproximación a suelos. Proctor determinó que para un esfuerzo de compactación dado existe un “óptimo contenido de humedad” que produce una máxima densidad seca. Incrementando el esfuerzo de compactación resulta una mayor máxima densidad seca y un menor óptimo contenido de humedad. Por ejemplo, en la Figura N° 1 se muestran curvas de compactación para tres esfuerzos de compactación en un agregado de roca caliza de Austin, Texas, siendo el mayor el correspondiente al Proctor Modificado (ASTM D 1557).



**Fig N° 1. Curvas de Laboratorio para RCC humedad-densidad sujeta a varias energías de compactación.**

En base a principios de compactación, la densidad seca es usada como el índice de diseño en la aproximación a suelos. La densidad seca es definida como el peso seco de sólidos por unidad de volumen del material, independientemente del contenido de agua. Estos pueden calcularse de la densidad húmeda y viceversa por la fórmula:

$$P_d = \frac{P_w}{1 + w}$$

donde  $P_d$  = densidad seca  $\text{Kg/m}^3$  ( $\text{lb/ft}^3$ )

$P_w$  = densidad húmeda  $\text{Kg/m}^3$  ( $\text{lb/ft}^3$ )

$w$  = contenido de humedad de la mezcla total, expresado como un decimal.

Si se usa un óptimo contenido de humedad correspondiente al esfuerzo de compactación alcanzado por los rodillos en el campo, se producirá un material en su máxima densidad seca. Para un esfuerzo de compactación dado (constante), el contenido de agua debajo o encima del óptimo puede producir una disminución de la densidad seca y consecuentemente una reducción de la resistencia a la compresión. En concordancia, una reducción de la resistencia a la compresión puede ser esperada de una mezcla que recibe menor esfuerzo de compactación del que fue usado para determinar el óptimo contenido de humedad.

### 3.2 LA FILOSOFÍA DE CONCRETO

Para la filosofía del concreto se considera que la mezcla de CCR es un verdadero concreto cuya resistencia y otras propiedades siguen la relación agua-cemento establecida por Abrams en 1918. Es decir, suponiendo agregados resistentes y limpios, la resistencia del concreto completamente consolidado es inversamente proporcional a la proporción agua-cemento. Usando menos agua con una constante cantidad de cemento se produce un concreto con mayor resistencia a la compresión y propiedades relacionadas.

Para la aproximación a concreto el contenido de agua de la mezcla es determinado usando una mesa vibradora (equipo Vebe) para alcanzar el tiempo deseado en el que la pasta empiece a aparecer en la superficie de la mezcla del CCR.(Figura N° 2)

El enfoque de concreto está basado en el concepto que existe suficiente pasta en la mezcla CCR que rellena todos los vacíos en el agregado, haciendo que la mezcla se compacte completamente produciéndose un concreto con asentamiento nulo. Sin embargo, la mezcla CCR no debe contener un exceso de pasta que sea llevado a la superficie con sólo unas pocas pasadas del rodillo vibratorio.



**Fig 2. Aparato Vebe.**

Además de estas filosofías que han surgido al realizar los diseños de mezclas del CCR, las mezclas CCR y consecuentemente las presas se han dividido en el pasado en: (Ref. 3 )

- Presas CCR con alto contenido de pasta ( contenido de material cementante  $>$  de  $150 \text{ Kg/m}^3$ )
- Presas CCR con contenido medio de pasta ( contenido de material cementante de  $100$  a  $149 \text{ Kg/m}^3$ )
- Presas con bajo contenido de pasta ( contenido de material cementante  $<$   $99 \text{ Kg/m}^3$ )
- Presas RCD (construidas en Japón)
- Presas Hardfill (material derivado del CCR con un muy bajo contenido de material cementante)

## **4.0 MATERIALES PARA MEZCLAS CCR**

### **4.1 MATERIALES AGLUTINANTES (CEMENTANTES)**

El tipo y la cantidad de cemento Portland o cemento más puzolana requerido en las mezclas de CCR dependen del volumen de la estructura, las propiedades requeridas por ésta y las condiciones de exposición. Además, la mayoría de presas de CCR son suficientemente grandes para requerir consideraciones del calor de hidratación del material cementante. ( Ref 1, 4, 5)

#### **4.1.1 CEMENTO**

El CCR puede ser hecho de cualquiera de los tipos básicos de Cemento Portland. Para la aplicación en masa, son útiles los cementos que tienen como característica la baja generación de

calor comparados con el tipo I de ASTM C150. Estos incluyen el tipo II, tipo IP y el tipo IS. El desarrollo de la resistencia para estos cementos generalmente es más bajo que para el tipo I a edades tempranas, pero producen finalmente resistencia más altas que el tipo I.

La selección del tipo de cemento debe considerar la economía en la obtención del cemento. Para proyectos de pequeño y mediano tamaño, puede no ser de eficaz costo especificar un especial cemento de bajo calor, el cual no está disponible localmente.

#### 4.1.2 PUZOLANAS

El uso de puzolana en la mezcla CCR puede servir como reemplazo parcial del cemento para reducir la generación del calor, como reemplazo parcial del cemento para reducir costos y como un aditivo para aumento de finos y mejorar la maniabilidad al dosificar mezclas para volúmenes mínimos de pasta.

Una de las principales funciones de la puzolana o cualquier otro material fino apropiado es la de ocupar espacio que de otra forma sería ocupado por el cemento o el agua. Ocupar este espacio con agua, obviamente dará como resultado una reducción en la resistencia del concreto.

La actividad puzolánica continua después de varios años, lo que indica que las puzolanas pueden ocupar espacio y también pueden contribuir al desarrollo de la resistencia a largo plazo.

### 4.2 AGREGADOS

#### 4.2.1 CALIDAD

La calidad requerida de los agregados depende de las propiedades deseadas del CCR, principalmente su resistencia. Para un CCR de alta resistencia, es necesario un agregado de alta calidad. Para el CCR que no es sometido a esfuerzos o no está expuesto a condiciones de congelamiento y descongelamiento mientras está húmedo, pueden ser usados agregados de baja calidad.

En las Figuras N° 3 (a) y (b) se muestra una familia de curvas de desarrollo de resistencia para dos diferentes tipos de agregados, uno de buena calidad y el otro de menor calidad.

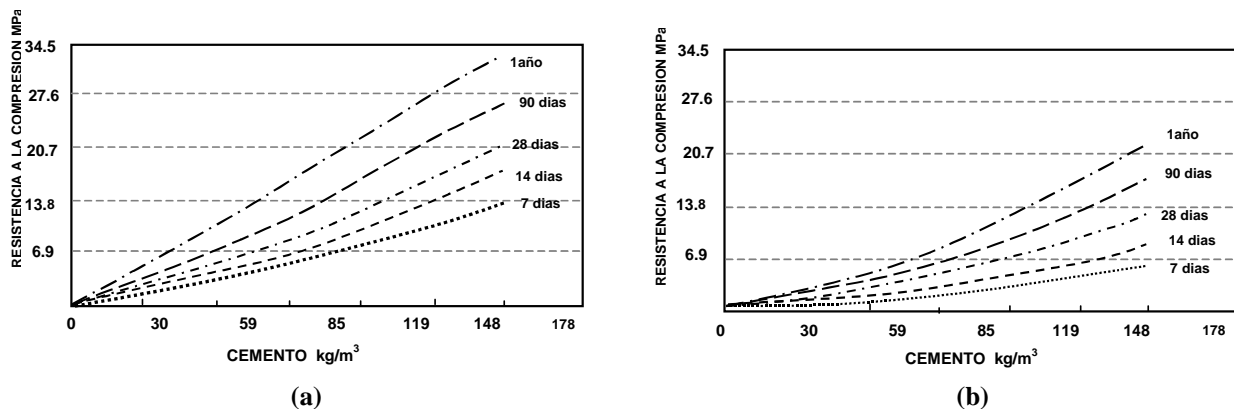


Fig.N° 3 (a) Curvas de resistencia CCR que pueden ser desarrolladas con varias proporciones de cemento para agregados de buena calidad. (b) Curvas de resistencia CCR desarrolladas con agregados de menor calidad.(ACI 207.5R-99-Ref. 1)

## 4.2.2 GRANULOMETRÍA

Para mezclas CCR **con aproximación a concreto**, los requerimientos de agregados son muy similares a los requeridos para masas convencionales de concreto. El tamaño máximo de agregado más comúnmente usado es de 3 pulg.(75 a 80 mm), aunque se han usado tamaños máximos de 6 pulg. y de 2 pulg; el porcentaje de finos ha sido usualmente limitado al 3% del total del peso del agregado, especialmente si un alto porcentaje de puzolana es usado en la mezcla.

En las mezclas con **aproximación a suelos**, hay una tendencia hacia un tamaño máximo de 2 pulg. La cantidad de finos ha llegado a ser de 8 a 16 %. (Ref .2)

Choi y Groon (Ref. 6) han propuesto los límites mostrados en la Tabla N° 1, especialmente para proyectos de tamaño pequeño a mediano. Se propone un tamaño máximo de agregado de 1,5 pulg. que ayudará a minimizar los problemas de segregación durante el mezclado, transporte, descarga y extendido del CCR durante la construcción. El 5-10% de finos provee los materiales finos óptimos para una matriz compactada densamente (y últimamente mayor resistencia) y provee la cantidad óptima de pasta para mejorar la trabajabilidad.

Los finos deben ser no plásticos o tener un bajo índice de plasticidad ( $IP < 5$ ) y se permiten hasta el punto que rellenen los vacíos para reducir los requerimientos de agua y mejorar la compactibilidad.

**Tabla N° 1: Granulometría recomendada de agregados**

| <b>TAMAÑO DE TAMIZ<br/>(1)</b> | <b>PORCENTAJE QUE PASA POR<br/>PESO<br/>(2)</b> |
|--------------------------------|---|
| 38 mm (1.5 in)                 | 100   |
| 25 mm 81.0 in)                 | 90 -100   |
| N° 4                           | 35 - 60   |
| N° 40                          | 15 - 30   |
| N° 200                         | 5 - 10  |

## 4.3 AGUA

El agua utilizada en mezclas de CCR debe estar libre de cantidad excesivas de álcalis, ácidos o material orgánico que pueden inhibir la adecuada ganancia de resistencia. La mayoría de las mezclas de CCR requiere de 89 a 119 Kg de agua por  $m^3$  para agregados de tamaño máximo mayor que 2 pulg. (50mm).

## 4.4 ADITIVOS

Los aditivos han sido efectivos en mezclas de CCR que contienen suficiente agua para proveer una pasta más fluida. Los aditivos reductores de agua y los retardadores son los más usados. Los aditivos incorporadores de aire no son comúnmente usados en mezclas de CCR debido a la dificultad en generar las burbujas de aire del tamaño apropiado y la distribución de éstas cuando la mezcla tiene una consistencia de asentamiento cero.

## **5.0 PROPORCION DE MEZCLAS UTILIZANDO EL MÉTODO DE SUELOS SIMPLIFICADO O CONCEPTO DE COMPACTACIÓN DE SUELOS**

Las mezclas de CCR han sido proporcionadas desde 1960 usando principios de compactación de suelos. Los mismos fundamentos han sido la base para determinar el contenido de cemento para mezclas de suelo-cemento por más de 50 años.

El método se inicia con una granulometría de agregados fija que involucra un programa de ensayos de variación de contenidos de material cementante y la comparación de resultados una vez que el contenido de agua es determinado.

En lugar de una determinación visual del contenido de agua, el óptimo contenido de humedad es determinado por los principios de humedad-densidad descritos en la sección 3.1, usando la compactación por impacto con un martillo estándar o dejando caer el apisonador un número prescrito de veces. El esfuerzo de compactación del Proctor Modificado de  $32.55 \text{ 2693 kJ/m}^3$  ( $\text{ft-lb/in}^3$ ) ha sido usado para la mayoría de los proyectos, aunque algunos esfuerzos de compactación han sido sugeridos por algunos investigadores. El número de golpes de un martillo de 10 lb (4.5 Kg) que se deja caer de 18 pulg (450 mm) por unidad de volumen define el esfuerzo de compactación.

El método de diseño por concepto de compactación de suelos ha sido usado con un contenido cementante conservador fijo, para algunos volúmenes de presa relativamente pequeños, donde la generación de calor no es una preocupación y donde el tiempo para un largo y extenso programa de diseño de mezclas no es disponible. (Ref 2,6,7)

### **5.1 PREPARACIÓN DE CILINDROS PARA RESISTENCIA DE CCR**

Los cilindros para ensayos de CCR son del mismo tamaño que los cilindros convencionales de concreto: 152mm (6 pulg.) de diámetro por 304 mm (12 pulg.) de altura. En la aproximación a suelos, hay dos métodos comunes para preparar cilindros de CCR:

- Usando el martillo del Proctor Modificado y aplicando el mismo esfuerzo de compactación del Proctor Modificado ( ASTM D 1557)
- Usando un martillo vibrador Hilti o un apisonador de polo neumático, mostrados en las Figuras N° 4 (a) y (b).

Algunas variaciones del uso del martillo del Proctor Modificado han sido usadas. Debido a que el molde cilíndrico es más grande que el molde del Proctor, es necesario hacer un ajuste al procedimiento estándar, para alcanzar el mismo esfuerzo de compactación, reemplazando la forma del sector de la zapata del martillo con un plato llano de 140mm (5.5 pulg.) de diámetro, para reducir la presión de contacto y evitar la excesiva rotura de granos. En la opinión de Choin y Groom (Ref 6), un mejor método es el método del martillo vibratorio o de impacto como se especifica en ASTM C 1435. Para cada capa, la muestra es vibrada hasta que el mortero de cemento es visto en el espacio anular entre el borde del molde y la cabeza del apisonador, el cual puede típicamente tomar 5-15 seg.

Si el mortero no aparece alrededor de la cabeza del martillo, el tiempo de compactación de cada capa deberá parar en alrededor de 20 segundos. Comparado con el método del martillo del Proctor Modificado, el martillo vibrador es extremadamente rápido y las densidades resultantes preparadas usando el método del martillo vibrador son comparables con las densidades del Proctor Modificado y también a las obtenidas de rodillos vibratorios de tamaño real. Las resistencias del CCR son sensibles al cambio en el contenido de agua en especímenes; si el contenido de agua de especímenes está uno o dos por ciento arriba o debajo del óptimo contenido de humedad, resultará una pérdida de resistencia. Las siguientes son las edades típicas de la rotura de cilindros: 7, 14, 28, 56, 90 y 365 días. Un promedio de resistencia de por lo menos dos cilindros debe ser requerido para cada edad, aunque tres cilindros son preferibles debido a las variaciones potenciales.



(a)



(b)

Fig N° 4 . Apisonadores utilizados en la elaboración de probetas de CCR (a) Apisonador Vibrador Hilti (b) Apisonador de Polo Neumático

## 5.2 ESPECIMENES PARA DURABILIDAD DEL CCR

Para el CCR que se expondrá a ciclos de congelamiento-deshielo o humedecimiento-secado, se recomienda que el CCR sea ensayado por durabilidad, además de resistencia. Los especímenes de CCR para cada mezcla de prueba son generalmente preparados para requerimientos de durabilidad usando los siguientes procedimientos estándar, los cuales fueron desarrollados originalmente para mezclas de suelo-cemento:

- Ensayo congelamiento-deshielo ASTM D 560
- Ensayo de humedad-sequedad ASTM D 559

Se ha sugerido una variación del tamaño y del procedimiento de preparación del espécimen para ensayos de congelamiento-deshielo (Ref. 6). El ensayo de durabilidad será desarrollado en especímenes obtenidos de la división en cuatro de un espécimen de 152 mm (6 pulg.) de diámetro por 152 mm (6 pulg.) de altura. Este procedimiento propuesto tiene la principal ventaja que los



especímenes ensayados tendrán densidades similares a las de los cilindros para resistencia, y de esta manera eliminaría el innecesario conservatismo que es establecido en la práctica común.

El ensayo de congelamiento/deshielo es más severo que el ensayo de humedecimiento-secado. Por consiguiente, el ensayo humedecimiento/secado puede ser omitido en el programa de ensayos de durabilidad si hay un presupuesto limitado para ensayo.

### 5.3 SELECCIÓN FINAL DE LA PROPORCION DE MEZCLAS

La selección de un contenido de material cementante de diseño está basado en dos consideraciones separadas: resistencia y durabilidad.

1. Los resultados de la resistencia a la compresión no confinada de los cilindros pueden ser trazados contra la edad de curado para varios contenidos de material cementante y obtener una familia de curvas, donde el contenido de material cementante de diseño inicial puede ser seleccionado basado en la resistencia requerida de diseño (Fig 5). El contenido de material cementante así obtenido puede ser incrementado para considerar las diferencias de condiciones de campo y laboratorio. Típicamente, es recomendado un incremento de 1-2% de contenido de material cementante.

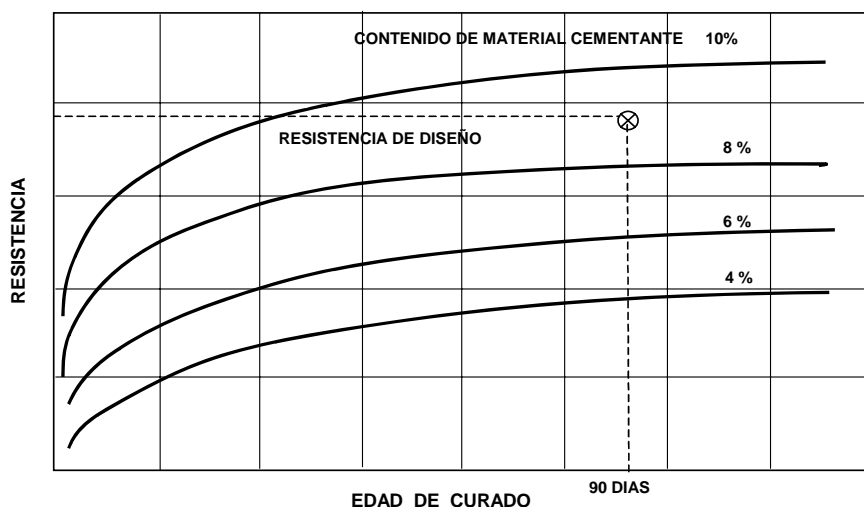


Fig N° 5: Selección del diseño de mezcla basado en la resistencia

2. Los resultados de los ensayos de durabilidad son comparados con los límites permisibles para pesos perdidos causados por ciclos de congelamiento/deshielo y humedad/sequedad. Dos juegos de límites aceptables son disponibles para especímenes de 7 días de edad después de 12 ciclos como se muestra en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2: Límites de durabilidad permisibles

| Agencia                     | Máximos límites permisibles<br>(% de peso perdido) |                       |
|-----------------------------|--|-----------------------|
|                             | Congelamiento/deshielo                             | Humedecimiento/secado |
| Portland Cement Association | 14   | 14                    |
| U.S. Bureau of Reclamation  | 8  | 6                     |

El más crítico de los dos criterios (resistencia versus durabilidad) debe ser usado como la mezcla de diseño. Típicamente, a menos que el agregado sea de calidad pobre o la resistencia de diseño sea muy baja, el criterio de resistencia usualmente controla la selección de la proporción de mezcla.

## **6. CONCLUSIONES**

La propuesta del diseño de mezcla de CCR utilizando Conceptos de Compactación de Suelos es simple y está basada en procedimientos de ensayos convencionales que están familiarizados con la mayoría de pruebas de laboratorio convencionales, éste es considerado adecuado para proyectos de diseños de CCR de tamaño pequeño a medio, para los cuales un gran presupuesto para ensayos, típicamente no es disponible

El desarrollo de esta tecnología en nuestro país es extremadamente importante, debido a que se crearán alternativas de solución a problemas relacionados a la construcción de nuevos pavimentos, nuevas presas y la rehabilitación de las existentes, aplicando conceptos ampliamente conocidos por Ingenieros Geotécnicos, adaptándolos a esta nueva tecnología lo que permitirá que en el Perú se pueda desarrollar esta técnica al igual que en otros países.

## **REFERENCIAS**

1. American Concrete Institute. "Roller-Compacted Mass Concrete" (ACI 207.5R-99)
2. Hansen, K. y Reinhardt, W. "Roller-Compacted Concrete Dams", McGraw-Hill, New York, 1991.
3. Dunstan, M. "Recent Developments in RCC Dams", Hydropower&Dams, 1999
4. U.S. Army Corps Of Engineers. "Roller-Compacted Concrete", EM 1110-2-2006, Department of the Army, Washington, D.C. 15 January 2000,
5. Rodriguez Andriolo, F. - "The Use Of Roller Compacted Concrete" Brasil, Sao Paulo, 1998.
6. Choi, Y. K. y Groom J. "RCC Mix Design – Soil Approach", Journal of materials in Civil Engineering, Enero/Febrero, 2001
7. Santana, T. M. "A Geotechnical Methodology for Roller Compacted Concrete Mixture Design", Universidad Nova de Lisboa, Portugal.