



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SECCIÓN DE POSTGRADO

# **DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS**

Miriam R. Escalaya Advíncula

## **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, a su bajo contenido de cemento y su condición de asentamiento nulo.

En nuestro país la aplicación de esta teoría es mínima, por tal motivo, la presente investigación se desarrolló con el objeto de dar a conocer con más amplitud la tecnología y diseño de mezclas CCR para presas, aplicando conceptos conocidos por ingenieros geotécnicos, adaptándolos a esta metodología, lo que permitirá que en el Perú se pueda desarrollar esta técnica al igual que otros países.

## GENERALIDADES





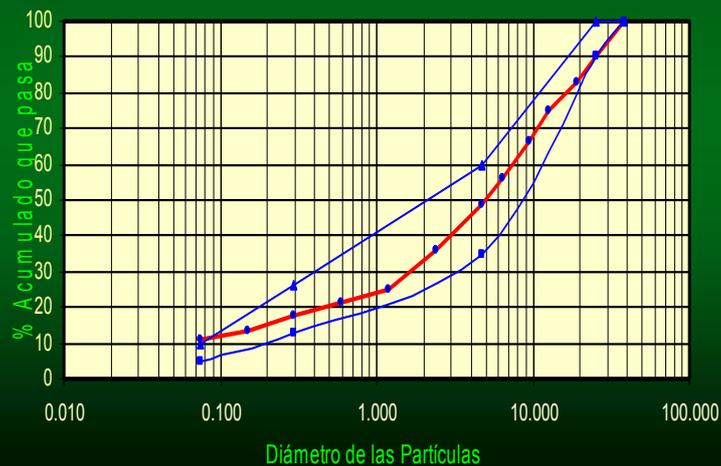
## DISEÑO DE MEZCLAS CCR UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

El Diseño de **Mezclas CCR Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos** considera que el CCR puede ser tratado como un suelo procesado desde la fase de diseño hasta su colocación y la realización de los ensayos de campo del material, después de colocado el CCR debe ser tratado como si éste fuera un concreto convencional.

Debido a que el CCR es considerado como un suelo granular procesado, se pueden emplear las teorías y los métodos estándar de la mecánica de suelos para definir y predecir el comportamiento del material.

## SELECCIÓN DE AGREGADOS

Los agregados usados en la investigación reunieron los requerimientos de calidad de la Norma ASTM C 33, aplicada para agregados de concreto. La granulometría ha sido seleccionada siguiendo los lineamientos propuestos por Choi, 1995.



## SELECCIÓN DEL MATERIAL CEMENTANTE

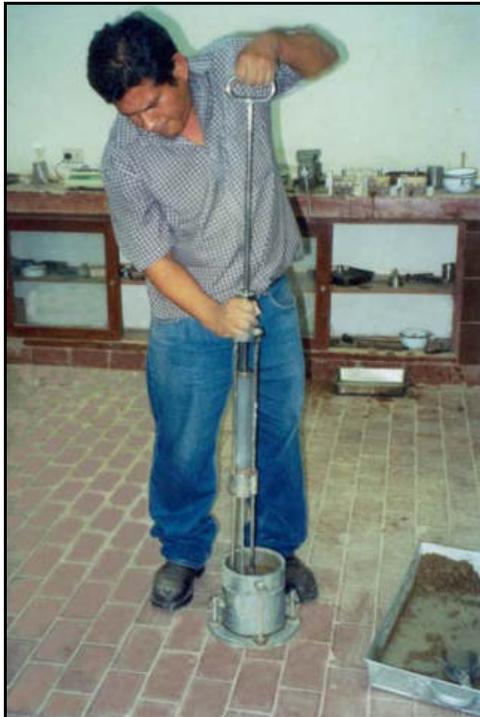
Los tipos de cemento empleados en esta investigación fueron el cemento **Portland Tipo I (Sol)** y el **cemento Puzolánico Tipo IP (Atlas)**, con la finalidad de analizar el comportamiento de ambos a diferentes edades y evaluar la posibilidad de su uso en mezclas CCR. Los porcentajes de cemento utilizados fueron de 2, 3, 4 y 5 %, con respecto al peso seco de los agregados.

## DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA

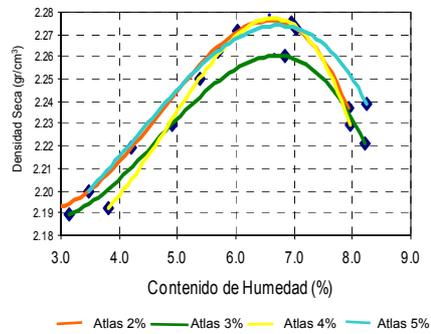
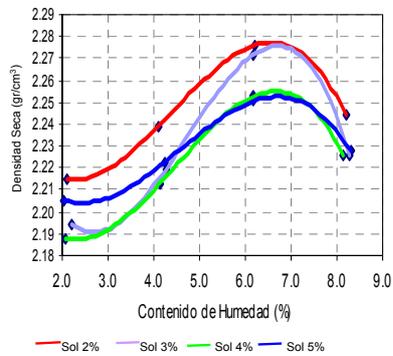
Para determinar el contenido de agua a utilizar, se realizó un ensayo **Proctor Modificado** para cada una de las mezclas de prueba



**MEZCLA DEL AGREGADO CON EL CEMENTO PARA LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO**



**APISONADO DEL MATERIAL  
CON EL MARTILLO  
ESTÁNDAR DE 10 Lb**



**CURVAS OBTENIDAS MEDIANTE LOS ENSAYOS PROCTOR MODIFICADOS REALIZADOS CON LAS MEZCLAS DE AGREGADO Y DIFERENTES PROPORCIONES DE CEMENTO PORTLAND TIPO I Y PUZOLÁNICO TIPO IP**

## DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES DE MEZCLA

Tipo de mezcla	Cemento	Cemento (% en peso)	Cantidad de material por m³ de mezcla (Kg)		
			cemento	agregado	agua
I	SOL	2	45.4	2224.6	145.28
II	SOL	3	68.1	2201.9	147.55
III	SOL	4	90.8	2179.2	148.68
IV	SOL	5	113.5	2156.5	150.95
V	ATLAS	2	45.4	2224.6	145.28
VI	ATLAS	3	68.1	2201.9	147.55
VII	ATLAS	4	90.8	2179.2	149.82
VIII	ATLAS	5	113.5	2156.5	152.09

**CANTIDAD DE MATERIAL A UTILIZAR EN CADA UNA DE LAS MEZCLAS CCR**

## DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS Y DEL TIEMPO DE COMPACTACIÓN

Para definir el número de capas y el tiempo de compactación, se elaboraron probetas de 6 pulg. de diámetro por 12 pulg. de altura, para una mezcla de prueba con 3% de cemento Portland Tipo I.

La compactación se realizó con un martillo eléctrico Hilti, en **tres y cuatro capas**, utilizándose los tiempos de compactación de **10, 15, 20 y 25 segundos** para cada una de las capas.



MARTILLO ELÉCTRICO HILTI  
AL CUAL SE LE ADAPTÓ EN  
EL EXTREMO UN DISCO  
PLANO DE DIÁMETRO  
LIGERAMENTE MENOR AL DE  
LA PROBETA

### PUNTAJE DE APARIENCIA PARA PROBETAS DE CCR

Puntaje	Descripción
5	La superficie del CCR es tan fina como la convencional superficie del concreto
4	La superficie del CCR es ligeramente porosa o ligeramente rugosa
3	La superficie del CCR es porosa
2	La superficie del CCR parece un panal
0	El CCR no está consolidado





**DENSIDAD DE PROBETAS DE PRUEBA DESPUÉS DE LA COMPACTACIÓN Y SU PUNTAJE DE APARIENCIA**

Nº Probeta	Características de compactación		Puntaje de apariencia	Densidad húmeda gr/cm <sup>3</sup>	Densidad seca gr/cm <sup>3</sup>	Promedio densidad seca gr/cm <sup>3</sup>	
	Nº capas	Tiempo de compact. por capa (seg)					
1 2	3	10	3	2.442 2.442	2.293 2.293	2.293	
3 4		15	3	2.483 2.447	2.331 2.297	2.314	
5 6		20	4	2.474 2.444	2.323 2.295	2.309	
7 8		25	4	2.478 2.477	2.327 2.326	2.326	
9 10		4	10	3	2.462 2.459	2.311 2.309	2.310
11 12			15	4	2.444 2.457	2.295 2.307	2.301
13 14			20	4	2.469 2.448	2.318 2.299	2.309
15 16			25	5	2.475 2.470	2.324 2.319	2.321

**RESUMEN DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO ANTES Y DESPUÉS DE LA COMPACTACIÓN**

Tamiz	% de muestra retenida en los tamices								
	sin compactar	3 capas con 10 seg de compactación	3 capas con 15 seg de compactación	3 capas con 20 seg de compactación	3 capas con 25 seg de compactación	4 capas con 10 seg de compactación	4 capas con 15 seg de compactación	4 capas con 20 seg de compactación	4 capas con 25 seg de compactación
1 1/2"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1"	18.89	18.89	17.56	18.58	15.39	17.38	18.82	15.22	13.35
3/4"	14.16	13.19	14.93	15.34	12.55	12.43	14.57	17.78	13.83
1/2"	15.90	15.22	16.26	14.90	10.28	15.67	15.86	15.84	9.35
3/8"	16.63	17.42	16.67	15.98	16.44	17.07	15.81	16.79	13.27
1/4"	20.74	18.56	23.19	23.74	27.13	22.81	24.29	23.55	26.46
Nro, 4	13.68	16.72	11.39	11.46	18.22	14.66	10.65	10.83	23.74
<b>PARTÍCULAS ROTAS</b>		<b>3.831</b>	<b>3.625</b>	<b>4.188</b>	<b>10.92</b>	<b>3.473</b>	<b>3.968</b>	<b>6.585</b>	<b>15.448</b>

\* Las partículas rotas están definidas como la suma algebraica de los valores positivos de las diferencias entre las cantidades iniciales y finales retenidas en cada uno de los tamices, expresado como un porcentaje.

Considerando la apariencia de los especímenes, el mínimo porcentaje de avería en los agregados y la densidad más próxima a la obtenida en el Proctor Modificado, se eligió elaborar las probetas de CCR en 4 capas y con 15 segundos de compactación por cada capa

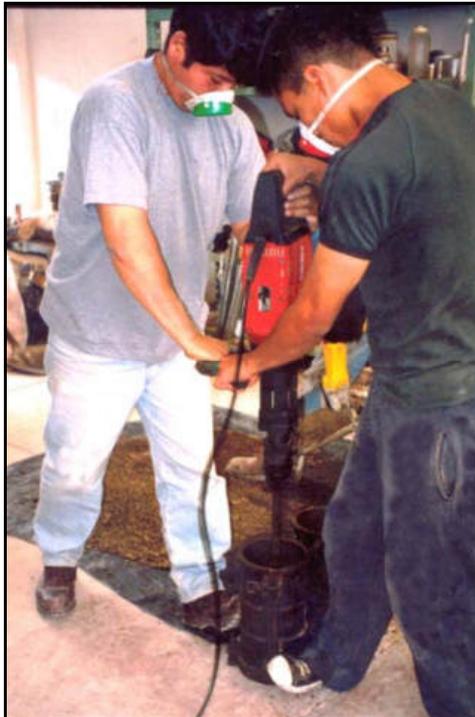


## **PREPARACIÓN DE CILINDROS PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CCR**

Para permitir la evaluación de las proporciones de mezclas, se elaboraron probetas cilíndricas de 6 pulg. de diámetro y 12 pulg. de altura.

Las probetas se elaboraron en cuatro capas, cada capa compactada con el martillo Hilti por un tiempo de 15 segundos.





ELABORACIÓN DE PROBETAS DE 6 PULG DE DIÁMETRO POR 12 PULG DE ALTURA. LA COLOCACIÓN DE LA MUESTRA SE REALIZÓ EN CUATRO CAPAS Y SE COMPACTARON UTILIZANDO UN MARTILLO HILTI CON UN TIEMPO DE 15 SEGUNDOS POR CAPA



PARA LA COMPACTACIÓN DE LA ÚLTIMA CAPA DE LAS PROBETAS SE UTILIZÓ UN COLLARÍN DE EXTENSIÓN DE 2 PULG DE ALTURA

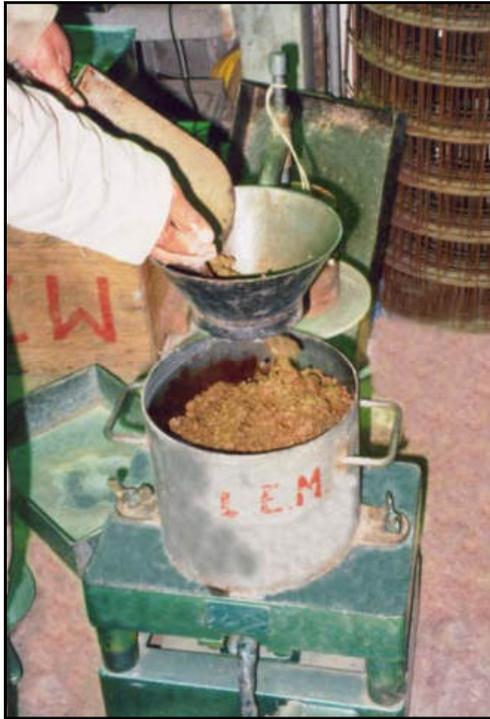




PESADO DE LAS PROBETAS  
PARA EL CÁLCULO DEL PESO  
UNITARIO DEL CCR







ENSAYO DE CONSISTENCIA VEBE  
REALIZADO CON CADA UNA DE  
LAS MUESTRAS CCR  
INVESTIGADAS, SEGÚN NORMA  
ASTM C 1170



APLICACIÓN DE LA CARGA Y  
VIBRADO DE LA MESA VEBE. SE  
OBSERVA EL ANILLO DE PASTA  
FORMADO EN EL BORDE  
INTERIOR DE LA OLLA



**PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES PARA EL ENSAYO DE DURABILIDAD**



**ESPECÍMENES PREPARADOS PARA EL ENSAYO DE DURABILIDAD CONGELAMIENTO-DESHIELO**

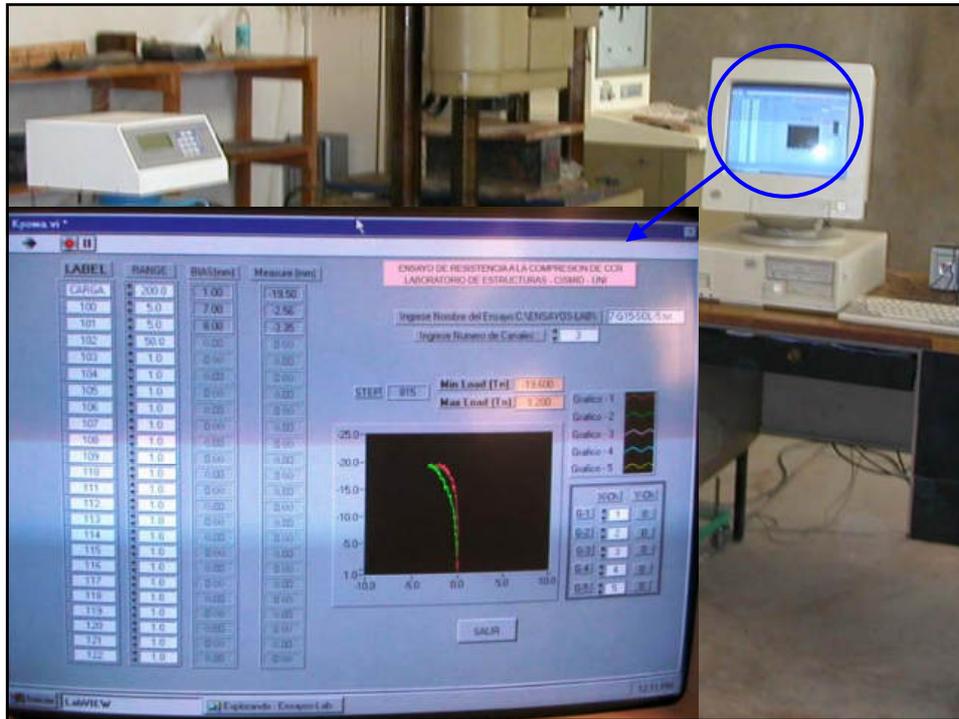
# ENSAYOS DE LABORATORIO

## ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

La resistencia a la compresión de las probetas elaboradas fue obtenida en concordancia con la norma ASTM C 39. En total se ensayaron 136 probetas, a las edades de **7, 14, 28, 56, 90 y 180 días.**

La medida del módulo de elasticidad ha sido desarrollada en todos los especímenes que fueron elaborados para el ensayo de resistencia a la compresión, en concordancia con la norma ASTM C 469.





## EL ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE POR CONGELAMIENTO/DESHIELO

El ensayo de resistencia al desgaste por congelamiento/deshielo fue realizado en concordancia con la norma ASTM D 560, sometiéndose al ensayo dos especímenes por cada tipo y proporción de cemento.





**ETAPA DE CONGELAMIENTO. LOS ESPECÍMENES SE COLOCARON EN UNA CONGELADORA A UNA TEMPERATURA CONSTANTE DE -23° C POR UN TIEMPO DE 24 HORAS**



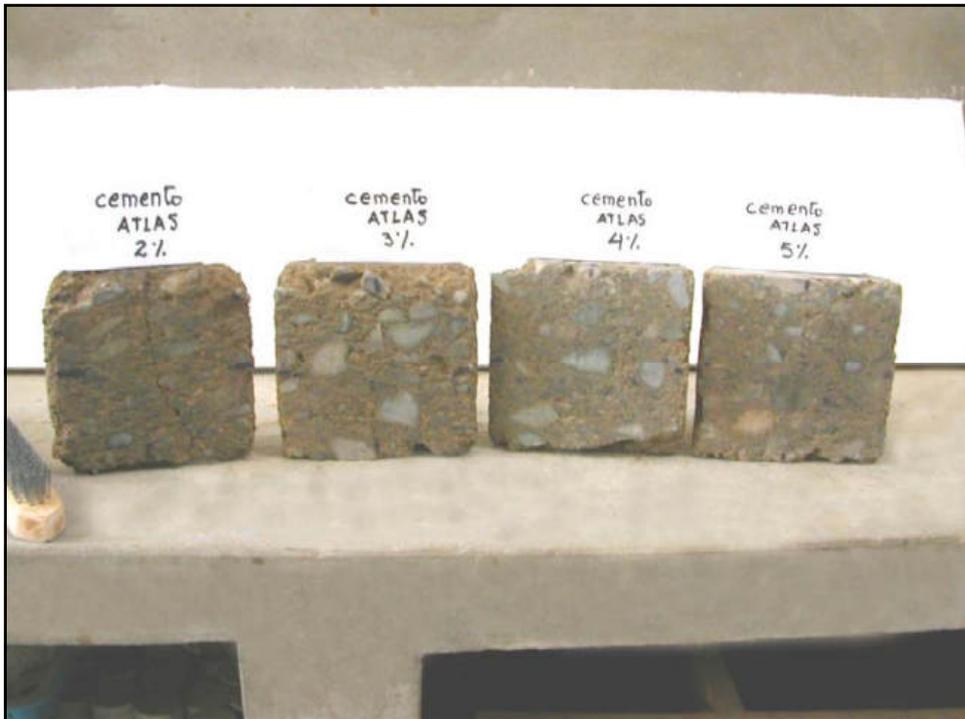
**ETAPA DE DESHIELO. LOS ESPECÍMENES SE COLOCARON EN LA CÁMARA HÚMEDA POR 23 HORAS**



**ESCOBILLADO DE ESPECÍMENES,  
DESPUÉS DE SER RETIRADOS DE LA  
CÁMARA HÚMEDA**

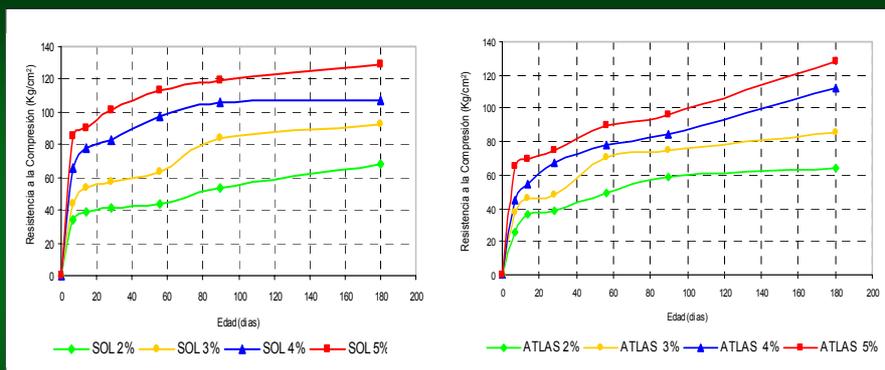


**EL ESCOBILLADO SE  
REALIZÓ EN ALGUNAS  
OPORTUNIDADES  
SOBRE UNA BALANZA  
PARA VERIFICAR LA  
PRESIÓN APLICADA**

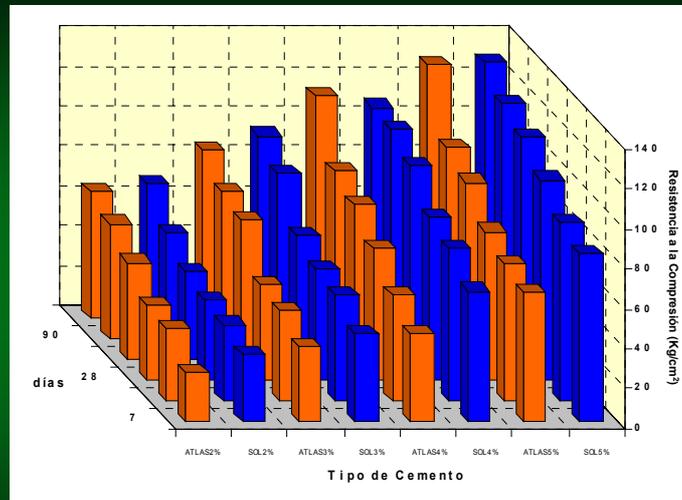


# ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

## RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, EDAD DE CURADO Y EL CONTENIDO DE CEMENTO

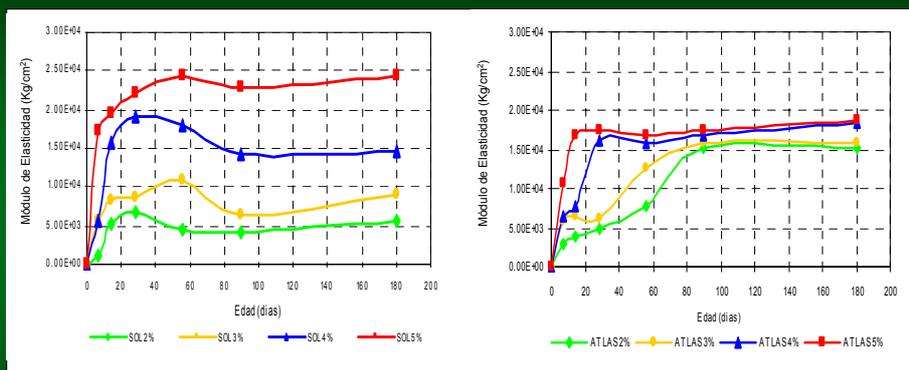


VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN DIFERENTES EDADES DE CURADO PARA MEZCLAS ELABORADAS CON 2%, 3%, 4% Y 5% DE CEMENTO PORTLAND TIPO I Y CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP

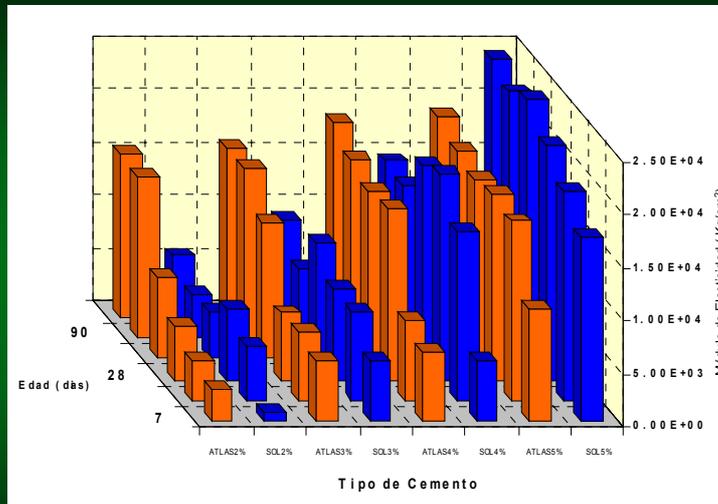


RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN OBTENIDAS EN DIFERENTES EDADES DE CURADO PARA MEZCLAS ELABORADAS CON 2%, 3%, 4% Y 5% DE CEMENTO PORTLAND TIPO I Y CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP

### RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD, EDAD DE CURADO Y CONTENIDO DE CEMENTO

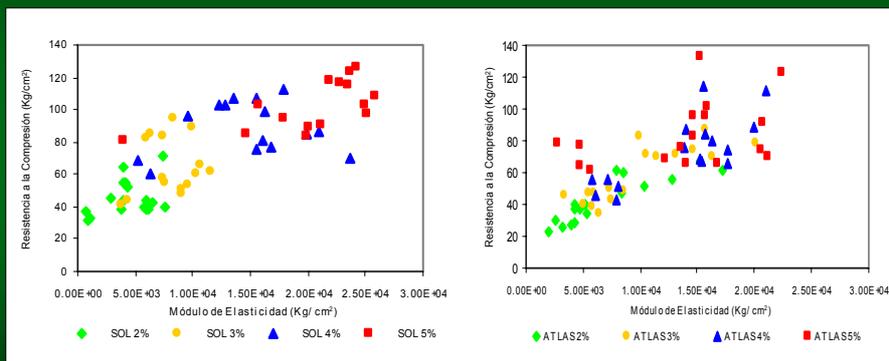


VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN DIFERENTES EDADES DE CURADO PARA MEZCLAS ELABORADAS CON 2%, 3%, 4% Y 5% DE CEMENTO PORTLAND TIPO I Y CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP



**MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS EN DIFERENTES EDADES DE CURADO PARA MEZCLAS ELABORADAS CON 2%, 3%, 4% Y 5% DE CEMENTO PORTLAND TIPO I Y CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP**

### RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN



**RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN PROBETAS FABRICADAS CON DIFERENTES PROPORCIONES DE CEMENTO PÓRDLAND TIPO I Y CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP**

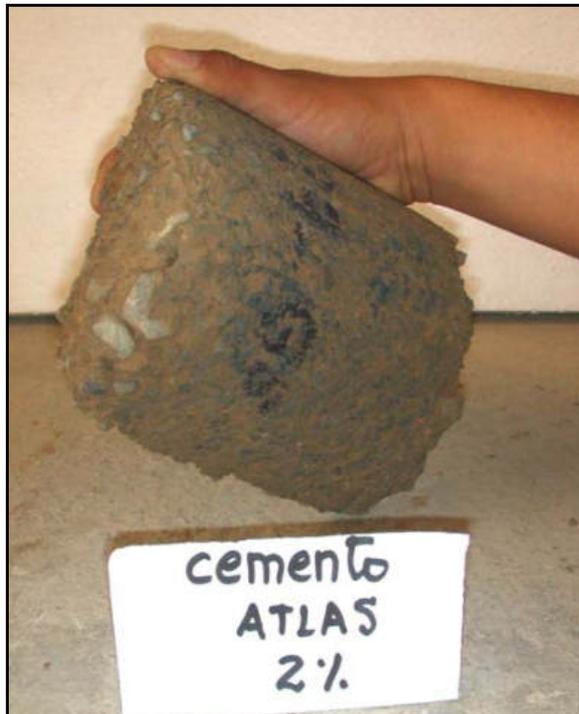
## ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE POR CONGELAMIENTO / DESHIELO

RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE LOS DOCE CICLOS DE CONGELAMIENTO/DESHIELO

Tipo de cemento	Contenido de cemento (% en peso)	Pérdida total promedio (%)
Pórtland Tipo I	2	2.8
	3	1.2
	4	0.9
	5	0.7
Puzolánico Tipo IP	2	4.7
	3	1.8
	4	1.3
	5	0.5

### LÍMITES DE DURABILIDAD ACEPTABLES

Organismo	Máximos límites permisibles (% pérdida en peso)	
	Congelamiento/deshielo	Humedecimiento/secado
Portland Cement Association	14	14
U.S. Bureau of Reclamation	8	6



ESPÉCIMEN ELABORADO  
CON 2% DE CEMENTO  
PUZOLÁNICO TIPO IP  
(ATLAS). ESTE  
ESPÉCIMEN ES EL QUE  
MOSTRÓ MAYORES  
PERDIDAS

## SELECCIÓN FINAL DE LA PROPORCIÓN DE MEZCLA

La selección de la proporción de mezcla de diseño está basada en dos consideraciones separadas: resistencia y durabilidad. El más crítico de los dos criterios debe ser usado como la mezcla de diseño.

Debido a que las pérdidas en el ensayo de durabilidad son mucho más bajas que las máximas permisibles, en este caso particular, el criterio de la resistencia a la compresión será el usado para el diseño de mezclas. El contenido de material cementante de diseño inicial puede ser seleccionado basado en la resistencia requerida de diseño. 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% del contenido de material cementante.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ❖ El Concreto Compactado con Rodillo o CCR se ha convertido en un material aceptado para la construcción de presas y pavimentos, la rehabilitación y modificación de las presas existentes. Esta tecnología provee un método económico y rápido de construcción con principios similares al de suelo-cemento y otras construcciones de tierra.
- ❖ El programa de diseño de mezclas utilizado en esta investigación proporciona una comprensiva información del procedimiento a seguir para conseguir un diseño satisfactorio de una mezcla CCR, utilizando los conceptos de compactación de suelos; adaptando equipos utilizados típicamente en laboratorios geotécnicos y en el ensayo de probetas de concreto.

- ❖ La resistencia a la compresión del CCR se incrementa con el contenido de cemento y la edad de curado. Se ha verificado que las resistencias del CCR a edades avanzadas utilizando cemento Puzolánico Tipo IP son similares a las alcanzadas con el cemento Portland Tipo I, lo que permite proveer una mejor mezcla técnica y económicamente. Las resistencias alcanzadas son suficientes para el diseño de presas pequeñas.
- ❖ El valor del módulo aumenta a medida que el contenido de cemento y la edad de curado se incrementa. Se ha verificado que los valores del módulo de elasticidad de las mezclas CCR son mucho menores que los desarrollados en mezclas de concreto convencional, variando entre 5684 y 24200 Kg/cm<sup>2</sup>. Esto significa que las mezclas CCR son menos frágiles y menos susceptibles al agrietamiento.

- ❖ Los valores del módulo de elasticidad obtenidos en las diferentes edades de curado servirán de base referencial para que en futuras investigaciones se determinen propiedades particulares del CCR en distintos proyectos; por ejemplo, la predicción de agrietamientos producidos por los esfuerzos termales.
- ❖ Debido a que las pérdidas en el ensayo de durabilidad son mucho más bajas que las máximas permisibles, en este caso particular investigado, el criterio de resistencia a la compresión deberá ser usado para el diseño de mezclas. El contenido de material cementante inicial de diseño puede ser seleccionado de las curvas de resistencia a la compresión versus tiempo, basado en la resistencia requerida de diseño en las diferentes edades de la obra.
- ❖ El diseño de mezcla inicial deberá ser confirmado en el campo, usando una sección de prueba CCR construida con los agregados, el material cementante y los equipos a utilizar en el sitio.

- ❖ Es necesario reconocer que hay mucho por aprender acerca de las mezclas de CCR, por lo que se requiere realizar más investigaciones con una cantidad mayor de especímenes y ensayos, a fin de una mejor utilización y adaptación de esta nueva tecnología, lo que permitirá que el Perú se pueda desarrollar en esta técnica al igual que otros países, creando alternativas de solución a problemas relacionados a la construcción de nuevos pavimentos, nuevas presas y la rehabilitación de las existentes,
- ❖ Se espera que los resultados obtenidos en la presente investigación, orientada mediante ensayos de laboratorio, sea un aporte al mejoramiento tecnológico de la construcción de presas en el Perú.