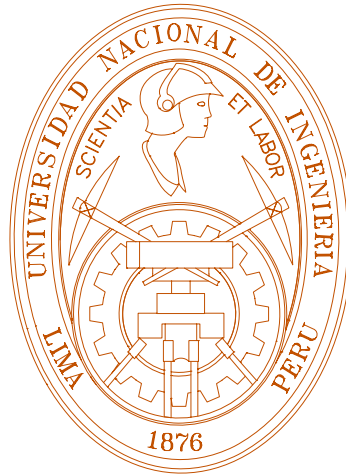


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

SECCIÓN DE POST - GRADO



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

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

Ing. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

LIMA - PERÚ

2006

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

Ing. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

**Presentado a la Sección de Post-grado de la Facultad de Ingeniería Civil en
cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del grado de**

MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Julio de 2006

© 2006, Universidad Nacional de Ingeniería, todos los derechos reservados

Autor

**MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA
Facultad de Ingeniería Civil
Julio de 2006**

Recomendado y aceptado por

**Dr. Jorge E. Alva Hurtado
Jefe de la Sección de Post-Grado
Asesor de Tesis**

Quiero expresar mi agradecimiento y reconocimiento a las personas que con sus experiencias, inquietudes y conocimiento me impulsaron en la realización del presente trabajo de investigación, en especial al Dr. Jorge Alva Hurtado, maestro y amigo, quien me brindó la oportunidad de iniciarme en la tarea de la investigación.

De igual manera, quiero agradecer al Instituto de Investigación de la Universidad de Ingeniería por la ayuda económica brindada y la confianza en mi depositada. Mi agradecimiento a los ingenieros y personal técnico de los laboratorios de la Universidad Nacional de Ingeniería, por la colaboración prestada en la elaboración de este trabajo. A mis profesores y compañeros.

A mis padres, por demostrarme que los frutos se consiguen con esfuerzo; porque supieron apoyarme en todo momento.

A mis hermanos, por su apoyo desinteresado, permaneciendo siempre cerca y pendientes de mis logros y vicisitudes.

En memoria de mi Yupe y Angel

RESUMEN

Actualmente el Concreto Compactado con Rodillo (CCR) es una técnica que se está empleando alrededor del mundo para la construcción principalmente de pequeñas presas y la reparación de éstas. 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.

En el desarrollo de esta tecnología y del diseño de las mezclas CCR han surgido dos filosofías, la filosofía de Suelos o Geotécnica y la de Concreto. En esta Investigación se ha utilizado la filosofía Geotécnica, que 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, haciendo uso de equipos y procedimientos familiares a la Mecánica de Suelos. Después de colocado el CCR debe ser curado y tratado como si fuera un concreto convencional.

En base a estos principios y teniendo en cuenta que en el Perú esta tecnología no se ha desarrollado ampliamente, se elaboró un programa de investigación con el objeto de proporcionar información orientada a conocer los atributos del CCR y los procedimientos básicos para realizar el diseño de la mezcla por métodos de Compactación de Suelos e identificar sus posibles aplicaciones en nuestro país. Esta investigación fue desarrollada en los laboratorios de Estructuras y Geotecnia del CISMID de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde se hizo uso de la filosofía de Suelos para el diseño de la mezcla CCR y se desarrollaron ensayos para determinar varias de sus propiedades, adaptándose nuevos equipos para conseguir la preparación y compactación de la mezcla, similar a la que se obtendrá en el campo. En los laboratorios de Ensayos de Materiales y de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería se determinaron las características de los agregados utilizados en el diseño.

Para las diversas mezclas diseñadas se utilizaron diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I y de cemento Puzolánico Tipo IP, se hicieron ensayos de resistencia a la compresión y durabilidad con el fin de comparar los resultados y determinar el diseño de mezclas óptimo. Del mismo modo, se hallaron valores del módulo de elasticidad en diferentes edades, obteniéndose valores que servirán de guía del comportamiento de este material para otros cálculos necesarios y evaluar el uso de las mezclas CCR en diferentes proyectos.

Los resultados de los ensayos indican que la proporción de mezcla usando metodologías geotécnicas provee una alternativa viable para el diseño de mezclas CCR, creándose una opción de solución a problemas relacionados a la construcción de nuevas presas y la rehabilitación de las existentes. Las mezclas obtenidas en esta investigación servirán de modelo para implementar esta técnica en nuestro país, demostrando su desarrollo de una manera sencilla.

ABSTRACT

Nowadays the Roller Compacted Concrete (RCC) is a technology that is used around the world for the construction mainly of small dams and the repair of these. The rapidity of the putting in work, the relatively low content of cement and the utilization of mineral additives (fly ashes, fillers, mining residues, etc.) explain the reason for which this material is economically interesting for the construction industry.

In the development of this technology and of the RCC mix design, two philosophies have arisen, the Soils or Geotechnical philosophy and the Concrete philosophy. In this Investigation there has been in use the Geotechnical philosophy which considers that the RCC can be treated as a soil tried from the phase of design to its placement and the accomplishment of the field tests of the material, using equipments and familiar procedures to the Soils Mechanics; after placed the RCC should be cured and treated as if it were conventional concrete.

On the basis of this principles and bearing in mind that in Peru this technology has not developed widely, a program of investigation was elaborated in order to provide information orientated to know the attributes of the RCC and the basic procedures to conduct the mix design for Compaction's methods of Soils and to identify its possible applications in our country. This research was developed in the laboratories of Structures and Geotechnics of CISMID of the Universidad Nacional de Ingeniería, where the Soil philosophy was used for the RCC mixtures design and tests were developed to determine several of their properties, adapting new equipments to obtain the preparation and compaction of the mixture, similar to the one that will be obtained in the field. The characteristics of the aggregates used in the design were determined in the laboratories of Material Testing and of Soils Mechanics of the Universidad Nacional de Ingeniería.

For the diverse designed mixtures different proportions of Portland Type I and Pozzolanic Type IP were used, compressive strength and durability tests were done in order to compare the obtained results and to determine the most ideal mix design. In the same way, values of the modulus of elasticity were obtained in different ages, values that will be used as guide of the behavior of this material for other calculations and to evaluate the use of the RCC mixtures in different projects.

Test results indicate that the mixtures proportion using geotechnical methodologies provides a viable alternative for RCC design mixtures, an option of solution being created to problems related to the construction of new dams and the rehabilitation of existing dams. The mixtures obtained in this investigation will be used as a model to implement this technology in our country, demonstrating his development on a simple way.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	GENERALIDADES	3
2.1	Concepto de Concreto Compactado con Rodillo.....	3
2.2	Aplicaciones.....	3
2.3	Ventajas del CCR Como Método de Construcción de Presas.....	4
2.4	Desarrollo de las Presas CCR.....	4
CAPÍTULO III	EL CCR COMO MATERIAL.....	8
3.1	Filosofías de Diseño.....	8
3.1.1	La Filosofía de Suelos.....	8
3.1.2	La Filosofía de Concreto.....	10
3.2	Materiales para Mezclas CCR.....	11
3.2.1	Materiales Aglutinantes (Cementantes).....	12
3.2.2	Agregados.....	13
3.2.3	Agua.....	17
3.2.4	Aditivos.....	17
3.3	Ensayos de Laboratorio.....	18
3.3.1	Ensayos de Consistencia.....	18
3.3.2	Preparación de Especímenes.....	20
3.3.3	Equipos y Procedimientos Apropriados de Compactación de Laboratorio.....	24
3.4	Proporción de Mezclas.....	28
3.4.1	Métodos de Proporción de Mezclas con Aproximación a Concreto.....	29
3.4.2	Métodos de Proporción de Mezclas con Aproximación a Suelos.....	31
3.5	Propiedades del CCR.....	34
3.5.1	Generalidades.....	34
3.5.2	Resistencia.....	35
3.5.3	Propiedades Elásticas.....	39
3.5.4	Deformación.....	40
3.5.5	Propiedades Térmicas.....	41
3.5.6	Cambios de Volumen.....	41
3.5.7	Permeabilidad.....	42
3.5.8	Durabilidad.....	43
3.5.9	Peso Unitario.....	44
CAPÍTULO IV	DISEÑO DE MEZCLAS CCR UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS.....	45
4.1	Generalidades.....	45

4.2	Procedimientos del Diseño de la Mezcla de CCR.....	45
4.2.1	Selección de Agregados.....	47
4.2.2	Selección del Material Cementante.....	48
4.2.3	Determinación del Contenido de Humedad.....	48
4.2.4	Determinación de la Proporción de los Componentes de la Mezcla.....	51
4.2.5	Determinación del Número de Capas y el Tiempo de Compactación.....	52
4.2.6	Preparación de Cilindros para Ensayos de Resistencia a la Compresión y Módulo de Elasticidad del CCR.....	54
4.2.7	Preparación de Especímenes para Ensayos de Durabilidad del CCR	55
4.2.8	Selección Final de la Proporción de Mezclas.....	56

**CAPÍTULO V ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS
 OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO 58**

5.1	Consistencia.....	58
5.2	Peso Unitario.....	59
5.3	Resistencia a la Compresión.....	59
5.4	Módulo de Elasticidad.....	64
5.5	Durabilidad Ante el Congelamiento y Deshielo.....	69
5.6	Selección de la Proporción de Mezcla.....	70

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 72

REFERENCIAS..... 76

ANEXOS

ANEXO I : Resultados de Ensayos de Laboratorio Realizados a los
Agregados

ANEXO II : Resultados de Ensayos de Laboratorio Realizados a las
Mezclas CCR

ANEXO III : Panel Fotográfico

LISTA DE FIGURAS

- Figura N° 2.1 Presas CCR culminadas y bajo construcción en el año 2002 (Dunstan, 2003)
- Figura N° 3.1 Curvas de laboratorio humedad-densidad para mezclas CCR sujetas a varias energías de compactación (Reeves & Yates, 1985)
- Figura N° 3.2 Fajas granulométricas de agregados utilizados en dos presas de CCR (a) Presa Galesville, (b) Presa Stacy (Oberholtzer, 1985; Lemons, 1988)
- Figura N° 3.3 Faja granulométrica propuesta por Choi y Groom (2001) para proyectos pequeños a medianos con aproximación a suelos
- Figura N° 3.4 Aparato VeBe para medir la consistencia del CCR en mezclas con aproximación a concreto
- Figura N° 3.5 Mesa vibradora grande para preparación de cilindros CCR
- Figura N° 3.6 Martillo neumático, moldes metálicos y fundas utilizadas en la elaboración de probetas CCR
- Figura N° 3.7 Pisón eléctrico Hilti
- Figura N° 3.8 Método de compactación y contenido de humedad vs máxima resistencia alcanzable (I) (Schrader, 2003)
- Figura N° 3.9 Método de compactación y contenido de humedad vs máxima resistencia alcanzable (II) (Schrader, 2003)
- Figura N° 3.10 (a) Resistencia a la compresión vs agua/cemento, (b) Contenido equivalente de cemento vs resistencia a la compresión (U.S. Army Corps of Engineers, 1992)
- Figura N° 3.11 (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)
- Figura N° 4.1 Diagrama que muestra los procedimientos seguidos en la investigación
- Figura N° 4.2 Curva granulométrica de agregados a utilizar en el diseño de mezclas CCR
- Figura N° 4.3 Curvas obtenidas mediante los ensayos Proctor Modificado realizados con las mezclas de agregado y diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I

- Figura N° 4.4 Curvas obtenidas mediante los ensayos Proctor Modificado realizados con las mezclas de agregado y diferentes proporciones de cemento Puzolánico Tipo IP
- Figura N° 4.5 Tamaño de especímenes propuestos para ensayos de durabilidad (a) Espécimen estándar de ensayo de durabilidad (suelo-cemento), (b) Espécimen propuesto para ensayo de durabilidad de CCR (Choi y Groom, 2001)
- Figura N° 5.1 Resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I - Sol
- Figura N° 5.2 Resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Puzolánico Tipo IP - Atlas
- Figura N° 5.3 Relación entre la resistencia a la compresión y el peso unitario en probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I - Sol
- Figura N° 5.4 Relación entre la resistencia a la compresión y el peso unitario en probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Puzolánico Tipo IP - Atlas
- Figura N° 5.5 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 - Sol
- Figura N° 5.6 Variación de la resistencia a la compresión en diferentes edades de curado para mezclas elaboradas con 2%, 3%, 4% y 5% de cemento Puzolánico Tipo IP - Atlas
- Figura N° 5.7 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
- Figura N° 5.8 Módulos de elasticidad de probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I - Sol
- Figura N° 5.9 Módulos de elasticidad de probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Puzolánico Tipo IP - Atlas
- Figura N° 5.10 Variación del módulo de elasticidad en diferentes edades de curado para mezclas elaboradas con 2%, 3%, 4% y 5% de cemento Portland Tipo I - Sol
- Figura N° 5.11 Variación del módulo de elasticidad en diferentes edades de curado para mezclas elaboradas con 2%, 3%, 4% y 5% de cemento Puzolánico Tipo IP - Atlas
- Figura N° 5.12 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

Figura N° 5.13 Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión en probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I - Sol

Figura N° 5.14 Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión en probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Puzolánco Tipo IP - Atlas

LISTA DE CUADROS

- Cuadro N° 2.1 Presas CCR culminadas a fines del año 2002, comparadas con las culminadas hasta el año 1996 (Dunstan, 2003)
- Cuadro N° 3.1 Comparación general de factores característicos para las filosofías de CCR (Hansen y Reinhardt, 1991)
- Cuadro N° 3.2 Características y ensayos para agregados utilizados en presas de CCR
- Cuadro N° 3.3 Comparación de densidades de CCR compactados por diferentes métodos
- Cuadro N° 3.4 Efectos de los métodos de compactación en las propiedades del CCR
- Cuadro N° 3.5 Resistencia a la compresión de algunas presas de CCR - construcción controlada con cilindros (ACI 207.5R-99)
- Cuadro N° 3.6 Comportamiento al corte de testigos perforados de presas de CCR (ACI 207.5R-99)
- Cuadro N° 3.7 Resistencia a la compresión y módulos de elasticidad de algunas mezclas CCR de laboratorio (ACI 207.5R-99)
- Cuadro N° 3.8 Resistencia a la compresión y relación de Poisson de algunas mezclas CCR de laboratorio (ACI 207.5R-99)
- Cuadro N° 4.1 Propiedades físicas del agregado utilizado en la investigación
- Cuadro N° 4.2 Granulometría de los agregados utilizados en el diseño de las mezclas CCR
- Cuadro N° 4.3 Resultados obtenidos en los ensayos Proctor Modificado (ASTM D 1557) realizados con cada una de las mezclas
- Cuadro N° 4.4 Cantidad de material a utilizar en cada una de las mezclas CCR
- Cuadro N° 4.5 Puntaje de apariencia para testigos de CCR (Nagayama, Watanabe y Niitaka, 1995)
- Cuadro N° 4.6 Puntaje de apariencia y densidad de probetas de prueba, obtenidos después de la compactación
- Cuadro N° 4.7 Resumen del análisis granulométrico del agregado antes y después de la compactación
- Cuadro N° 4.8 Límites de durabilidad permisibles
- Cuadro N° 5.1 Valores de tiempo VeBe obtenidos en cada una de las mezclas CCR investigadas
- Cuadro N° 5.2 Resumen de resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión en diferentes edades de curado

- Cuadro N° 5.3 Resumen de resultados obtenidos en el ensayo de módulo de elasticidad en diferentes edades de curado
- Cuadro N° 5.4 Pérdida total promedio de CCR después de realizado el ensayo de durabilidad ante el congelamiento y deshielo

CAPÍTULO I

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. 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.

La implementación de esta tecnología para la construcción de presas y posteriormente para la construcción de carreteras fue cada vez más necesaria para dar respuesta a las exigencias de diversos sectores. Esto ocasionó que durante los últimos años en laboratorios de diferentes países se realizaran gran variedad de investigaciones, con el objeto de identificar las diversas propiedades y potencialidades del CCR. En nuestro país la aplicación de esta tecnología es mínima, por tal motivo, la presente investigación se ha desarrollado 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 en otros países, creando alternativas de solución a problemas relacionados a la construcción de nuevas presas y la rehabilitación de las existentes.

En el desarrollo de esta tesis se ha recolectado un amplio rango de información acerca de los principales conceptos teóricos y temas de investigación relacionados con el Concreto Compactado con Rodillo (CCR), específicamente del diseño de mezclas con procedimientos geotécnicos; todo esto se ha resumido en seis capítulos que cubren una gran variedad de tópicos referentes a los principios, metodologías y las

posibilidades de empleo del diseño de mezclas, haciendo uso del concepto de compactación de suelos.

En el Capítulo II, *Generalidades*, se presenta el concepto de Concreto Compactado con Rodillo, sus diferentes aplicaciones, las ventajas que ofrece el CCR como método de construcción y el desarrollo con el tiempo del uso de esta tecnología en la construcción de presas.

El Capítulo III, *El CCR Como Material*, describe las filosofías o aproximaciones de diseño de mezclas CCR que han surgido con el desarrollo de esta tecnología, dependiendo del tratamiento que se le ha dado al agregado constituyente de la mezcla. Del mismo modo, se describen las características de los materiales necesarios para la fabricación de la mezcla y las diferentes metodologías aplicadas en su diseño, surgidas de los diferentes enfoques. Se especifican ensayos de laboratorio típicos para mezclas CCR y sus principales propiedades características.

En el Capítulo IV, *Diseño de Mezclas CCR Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos*, se describe la fase experimental de la tesis, que consiste de una extensa investigación de laboratorio, necesaria para obtener una mezcla apropiada para su aplicación en la construcción de presas, teniendo en cuenta las teorías principales y los métodos estándar de mecánica de suelos y del concreto convencional. El procedimiento adoptado se explica de una manera sencilla, de tal manera que sea de fácil entendimiento y pueda ser reproducido en futuras investigaciones.

El Capítulo V, *Análisis y Discusión de los Resultados Obtenidos en los Ensayos de Laboratorio*, presenta el análisis de los datos hallados en los diferentes ensayos realizados con cada una de las muestras investigadas y se proporcionan los principios básicos necesarios para la elección apropiada del diseño de mezcla. Se presentan los valores obtenidos correspondientes a propiedades del CCR fresco y endurecido, así como comparaciones de los resultados conseguidos con los dos tipos de cementos utilizados en la investigación, analizando el comportamiento de ambos a diferentes edades y evaluando la posibilidad de su uso en mezclas CCR.

Finalmente, en el Capítulo VI, *Conclusiones y Recomendaciones*, se presentan las conclusiones a las que se ha llegado en la presente tesis y se dan las principales recomendaciones.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES

2.1 CONCEPTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

El Concreto Compactado con Rodillo (CCR) se define como una mezcla de cemento y agregados seleccionados, con un contenido de agua suficientemente reducido para permitir su compactación con rodillo.

El CCR difiere del concreto convencional principalmente en su consistencia requerida. Para la consolidación efectiva, la mezcla de CCR debe ser lo suficientemente seca (asentamiento nulo) para 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.

2.2 APLICACIONES

El CCR puede ser considerado para su aplicación en lugares donde el concreto con asentamiento nulo pueda ser transportado, colocado y compactado usando equipos de construcción para tierras y enrocados. Los proyectos ideales donde es utilizado el CCR son aquellos donde se involucra la colocación de grandes áreas de material, con poco o ningún reforzamiento incluido. Puede ser considerado para trabajos en grandes rellenos, pavimentos, fundaciones masivas, bases de losas, ataguías, reparaciones de emergencia y protección superficial para presas y terraplenes. Pero donde mayor uso se le ha dado es en la construcción de presas, en lugar del concreto colocado convencionalmente (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).

Las presas de Concreto Compactado con Rodillo han sido diseñadas y construidas en muchos países alrededor 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 a su condición de asentamiento nulo.

2.3 VENTAJAS DEL CCR COMO MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE PRESAS

La técnica de construcción con CCR ha hecho que las presas de gravedad de CCR sean una alternativa económica y competitiva frente a las presas convencionales de concreto y a las presas de tierra, debido principalmente a los siguientes factores:

Costo : Costos históricos de construcción de presas de CCR y de concreto convencional muestran que el costo por metro cúbico de CCR es considerablemente menor que el de concreto colocado convencionalmente, aproximadamente en el rango de 25 a 50 por ciento menos. La diferencia en el porcentaje ahorrado depende usualmente del costo de los agregados y del material cementante, la complejidad de colocación y la cantidad total de concreto colocado. Los ahorros asociados al CCR son debidos principalmente a la reducción en los costos de encofrados, colocación, compactación y la reducción de tiempos de construcción.

Construcción Rápida : La rápida técnica de construcción (comparada con la de presas de concreto y terraplenes) y la reducción de las cantidades de material (comparada con los terraplenes) ocasionan mayores ahorros en los costos de las presas de CCR. El proceso de construcción con CCR fomenta una colocación continua de material en un lugar cercano, ocasionando que sean posibles altas velocidades de producción. Estas velocidades de producción disminuyen significativamente el periodo de construcción de una presa. Cuando se compara con terraplenes o presas convencionales de concreto, el tiempo de construcción para grandes proyectos de CCR puede ser reducido por varios meses o por varios años.

Otra ventaja considerada es que esta tecnología puede ser implementada rápidamente.

2.4 DESARROLLO DE LAS PRESAS CCR

Desde los inicios de los sesenta, los ingenieros de presas empezaron a buscar un nuevo tipo de presa que combinara las ventajas de seguridad de las presas de concreto y la eficiencia de la construcción de los terraplenes. Como parte de este esfuerzo, usando diferentes filosofías de diseño, se desarrolló la construcción de presas aplicando la tecnología del Concreto Compactado con Rodillo.

Los primeros conceptos de CCR fueron propuestos por Raphael (1970), quien sugirió un método de colocación y compactación de material granular enriquecido con cemento, usando equipos de construcción de tierras para construir una presa. Estos esfuerzos formaron una base para las primeras presas de CCR.

Muchas de las presas al inicio de los ochenta demostraron satisfactoriamente las altas velocidades de construcción posibles con la utilización de la técnica del CCR. Cerca de 1,1 millones de m³ de CCR fueron colocados en la presa Upper Stillwater en 11 meses de construcción, entre 1985 y 1987. La presa Stagecoach de 46 m de altura fue construida en sólo 37 días calendarios de colocación continua, con una velocidad promedio de avance en altura de 1,2 m/día. En la presa Elcreek, las velocidades de colocación de CCR excedieron los 9200 m³/día.

El uso de CCR para presas de tamaño mediano y pequeño continuó a través de los años ochenta y los inicios de los noventa, y se ha expandido a proyectos más grandes por todo el mundo. El método de CCR ha sido exitosamente aplicado en proyectos muy importantes de construcción de presas de gravedad y ha ayudado a desarrollar el potencial hídrico alrededor del mundo para hacer frente a la necesidad creciente de beber agua, irrigación, protección contra inundaciones y producción de energía.

Del mismo modo, el uso del CCR para la rehabilitación de estructuras de concreto y terraplenes se inició en los Estados Unidos a mediados de los ochenta y continuó floreciendo a lo largo de los noventa. El uso principal del CCR para mejorar la calidad de presas de concreto ha sido en el reforzamiento de estructuras existentes y el mejoramiento de su estabilidad sísmica. Para terraplenes, el CCR ha sido usado principalmente como una capa superpuesta en el talud aguas abajo para sobrepasar con seguridad los eventos de flujos que no son frecuentes.

Para entender el desarrollo de la tecnología de la construcción con CCR es importante notar que a fines de 1980 habían solamente 2 presas CCR culminadas en todo el mundo y a fines de 1996 habían un total de 157 presas CCR culminadas. Al final del año 2002, se habían terminado de construir 251 grandes presas CCR y además 34 estaban bajo construcción; todo esto en un total de 35 países. El promedio de altura de las presas en construcción es de aproximadamente 80 m y el volumen promedio es de 600 000 m³. La presa CCR considerada más grande es la de Pancheshwar (310 m) en la frontera de Nepal y la India, y en segundo lugar la presa Longtan (216 m).

En los últimos años la construcción de presas se ha incrementado considerablemente. China, con 45 presas, es el país que tiene el liderazgo en presas CCR en el mundo. En Sudamérica, Brasil es el país que tiene una mayor cantidad de presas. El Cuadro N° 2.1 y la Figura N° 2.1 muestran la distribución de presas CCR por todo el mundo hasta finales del año 2002, comparado con el total existente en el año 1996 (Dunstan, 2003).

A pesar que la construcción de presas CCR en el Perú no figura en la relación dada por Dunstan en el año 2003, su empleo en nuestro país se ha realizado de una manera muy limitada, utilizándose CCR en las estructuras de cierre (presas y diques) del reservorio Antacoto, proyecto Marcapomacocha - Marca III en 1998, y en presas pequeñas pertenecientes a la minera Yanacocha, en los años 2002 - 2003, en las que se utilizó para su construcción el hardfill, considerado como un tipo de CCR de muy bajo contenido de cemento.

Cuadro Nº 2.1 Presas CCR culminadas a fines del año 2002, comparadas con la culminadas hasta el año 1996 (Dunstan, 2003)

PAÍS	1996	2002	PAÍS	1996	2002
AFRICA			OCEANÍA		
SUD AFRICA	11	13	AUSTRALIA	8	9
MARRUECOS	7	9	TOTAL	8	9
ANGOLA	1	1	SUBCONTINENTE INDIO Y MEDIO ORIENTE		
BURKINA-FASO	0	1	JORDANIA	0	3
ERITREA	0	1	UAE	0	2
ALGERIA	0	1	IRÁN	0	1
TUNEZ	0	1	TOTAL	0	6
TOTAL	19	27	AMÉRICA DEL NORTE		
ASIA			USA	28	36
CHINA	23	45	CANADA	2	2
JAPÓN	28	42	TOTAL	30	38
TAILANDIA	1	2	AMÉRICA DEL SUR Y CENTRAL		
KYRGYZSTAN	1	1	BRASIL	9	29
TURQUÍA	0	1	MÉXICO	5	6
INDONESIA	0	1	HONDURAS	2	2
KAZAKHSTAN	0	1	COLOMBIA	0	2
RUSIA	0	1	CHILE	1	1
TOTAL	53	94	ARGENTINA	1	1
EUROPA			GUYANA FRANCESA	1	1
ESPAÑA	19	21	REPÚBLICA DOMINICANA	0	1
FRANCIA	6	6	BOLIVIA	0	1
GRECIA	1	3	COSTA RICA	0	1
RUMANIA	2	2	TOTAL	19	45
TOTAL	28	32	GRAN TOTAL	157	251

CAPÍTULO III

EL CCR COMO MATERIAL

3.1 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. Éstas pueden ser calificadas como la Filosofía de Suelos o Geotécnica y la Filosofía de Concreto (Hansen y Reinhardt, 1991).

Las aproximaciones de dosificación de mezclas se diferencian significativamente, dependiendo de la filosofía de tratamiento del agregado, ya sea como agregado para concreto convencional o como agregado utilizado en la construcción 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 existe una mayor cantidad de pasta en la mezcla de áridos. Estas mezclas pueden ser descritas como más trabajables que las desarrolladas usando la aproximación a suelos; sin embargo, ambas filosofías producirán un concreto que es calificado como de "slump cero".

Una comparación general de factores característicos de ambas filosofías es mostrada en el Cuadro N° 3.1.

3.1.1 LA FILOSOFÍA DE SUELOS

La Filosofía de Suelos considera al CCR como un suelo procesado o un 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 aplicado 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 CCR con aproximación a suelos. Proctor

determinó que para un esfuerzo de compactación dado hay un “óptimo contenido de humedad” que produce una máxima densidad seca. Incrementando el esfuerzo de compactación se obtiene una máxima densidad seca mayor y un menor óptimo contenido de humedad. Un ejemplo es mostrado en la Figura N° 3.1, donde se observan curvas para tres esfuerzos de compactación en un agregado de piedra caliza de Austin, Texas, siendo el mayor el correspondiente al Proctor Modificado (ASTM D 1557).

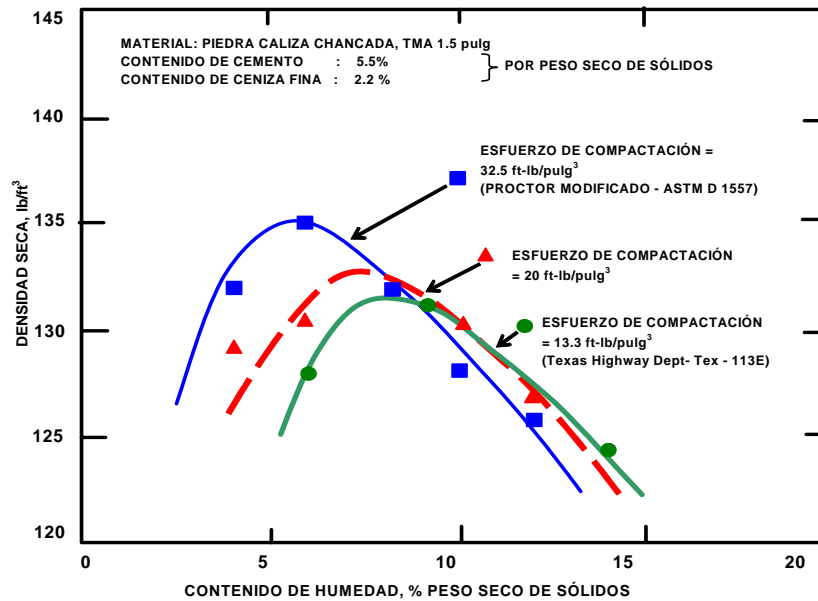


Figura N° 3.1 Curvas de laboratorio humedad - densidad para mezclas CCR sujetas a varias energías de compactación (Reeves y Yates, 1985)

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. Esta puede calcularse de la densidad húmeda y viceversa mediante la fórmula:

$$Pd = \frac{Pw}{1 + w}$$

Donde:

P_d = densidad seca Kg/m³

P_w = densidad húmeda Kg/m³

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.

3.1.2 LA FILOSOFÍA DE CONCRETO

La Filosofía de Concreto considera a la mezcla CCR como un verdadero concreto cuya resistencia y demás 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 cantidad constante de cemento se produce un concreto con mayor resistencia a la compresión y propiedades relacionadas.

La aproximación a concreto está basada 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 produzca un asentamiento mensurable o que un exceso de pasta sea llevado a la superficie con sólo unas pocas pasadas del rodillo vibratorio.

Un posible punto de demarcación entre las dos aproximaciones podría ser que las mezclas CCR diseñadas utilizando la aproximación a concreto tienen un VeBe o tiempo de compactación vibratoria de 45 segundos o menos, mientras que las mezclas resultantes de una aproximación a suelos tienen un tiempo VeBe mayor de 45 segundos. Un tiempo VeBe de 45 segundos indica que hay suficiente pasta para rellenar todos los vacíos de los agregados, después de 45 segundos de la vibración de la mezcla con carga. Para la mayoría de las mezclas con aproximación a suelos, la pasta no puede ser producida después de un minuto de vibración.

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, según Dunstan (1994) en : Presas CCR con alto contenido de pasta (contenido de material cementante $>$ de 150 Kg/m^3), Presas CCR con contenido de pasta media (contenido de material cementante de 100 a 149 Kg/m^3), Presas con bajo contenido de pasta (contenido de material cementante $<$ a 99 Kg/m^3) y Presas Hardfill (material derivado del CCR con muy bajo contenido de material cementante).

Cuadro Nº 3.1 Comparación general de factores característicos para las filosofías de CCR (Hansen y Reinhardt, 1991)

FACTOR	SUELOS (GEOTECNIA)	CONCRETO
Base para el diseño de mezclas	Humedad óptima / máxima densidad seca	Descenso de la relación agua / cemento y la consolidación
Características de los vacíos	Todos los vacíos no son rellenados - contacto partícula a partícula	Vacíos son rellenados con la pasta y su exceso
Porcentaje teórico de la densidad de aire-libre	Usualmente menor que el 98%	Mayor que el 98%
Consistencia (tiempo VeBe o VC)	45 segundos o más	45 segundos o menos
Otros nombres	Rollcrete, relleno estabilizado, suelo cemento de agregado grande, CCR pobre	Método CCR de alta pasta , RCD (Japón)
Materiales	Graduado o en bruto (natural)	Muy bien graduado para minimizar los vacíos
Granulometría del agregado, cantidad de finos (Tamiz Nº 200)	Superior del 10% del peso total	Menos finos, especialmente si hay gran contenido de ceniza volátil
Contenido de cemento + puzolana	Usualmente menor que 120 Kg/m ³	Mayor que 120 Kg/m ³
DISEÑO		
Cohesión	Valores bajos - menores que 200 lb/pulg ² (1.4 Mpa)	Valores altos -mayores que 200 lb/pulg ² (1.4 Mpa)
Permeabilidad	Depende del contenido de vacíos en la mezcla y de la construcción (grado de compactación y segregación)	Depende de las propiedades y la cantidad de pasta.
Resistencia a la compresión	Alta por peso unitario de cemento -mayor en la parte superior de la capa	Decrece con mayor cantidad de agua - mayor en el fondo de la capa
Concepto de control de infiltración	"Membrana" aguas arriba	Presa de gravedad entera
CONSTRUCCIÓN		
Mezclado	Comúnmente amasador(pugmill)	Amasador(pugmill) o tambor
Tendido	La segregación es más de un problema	La segregación es menos de un problema
Compactación	Vibratorio o aplanadora de neumáticos pesada	Rodillo vibratorio
Principal acción o rodillo	Compactación	Consolidación
Espesor de capas compactadas	Generalmente 12 pulg (0.3 m). Más posibilidad de vacíos en el fondo	12 a 30 pulg (0.3 a 0.75 m) Posibilidad de pasta en la superficie y ligera posibilidad de vacíos en el fondo

3.2 MATERIALES PARA MEZCLAS CCR

Un amplio rango de materiales ha sido usado satisfactoriamente para producir mezclas de Concreto Compactado con Rodillo. Dentro de los materiales usados para el CCR se

incluye materiales cementantes (cemento portland, puzolana, así como ceniza volátil), agregados, agua y aditivos.

3.2.1 MATERIALES AGLUTINANTES (CEMENTANTES)

El tipo y la cantidad de cemento 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. La mayoría de presas de CCR son suficientemente grandes para requerir consideraciones acerca del calor de hidratación del material cementante.

3.2.1.1 Cemento

El CCR puede ser elaborado de cualquiera de los tipos básicos de cemento Portland. Para las aplicaciones en masa, son útiles los cementos que tienen como característica la baja generación de calor de hidratación, comparado con el tipo I de ASTM C 150. Estos incluyen el tipo II (moderado calor de hidratación) y el tipo V (resistencia a los sulfatos) de ASTM C 150, el tipo IP (cemento Portland más puzolana) y el tipo IS (cemento Portland-con escoria de alto horno) de ASTM C 595. El desarrollo de la resistencia para estos cementos generalmente es más bajo que para el tipo I a edades tempranas, pero producen finalmente resistencias más altas.

La generación de calor debido a la hidratación del cemento es típicamente controlada por el uso de cementos con bajo calor de hidratación, el uso de menos cemento, o reemplazando una porción de cemento por puzolana o por una combinación de éstas.

La selección del tipo de cemento debe considerar la economía en la obtención de éste. 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. Debido a la alta capacidad de producción del CCR, puede ser requerida una especial atención para asegurar un suministro continuo de cemento al proyecto.

3.2.1.2 Puzolanas

Son sustancias naturales o artificiales, que reducidas a polvo y amasadas con cal, proporcionan a ésta propiedades aglutinantes. La selección de puzolana apropiada para el CCR debe basarse en conformidad con la norma ASTM C 618 u otra norma aplicable, en su costo y disponibilidad. En casi todos los proyectos de CCR en los que se ha utilizado puzolana, se ha usado ceniza fina clase F, debido principalmente al efecto de sus partículas esféricas sobre la manuableidad y compactibilidad.

El uso de puzolana en la mezcla CCR puede servir a los siguientes propósitos:

1. Como reemplazo parcial del cemento para reducir la generación del calor.
2. Como reemplazo parcial del cemento para reducir costos.
3. Como un aditivo para aumento de finos y mejorar la maniabilidad al dosificar mezclas con volúmenes mínimos de pasta.

Las mezclas de CCR con alto contenido de material cementante a menudo usan grandes cantidades de puzolana para reemplazar el cemento y de este modo reducir el aumento de la temperatura interna que podría ser generada, y consecuentemente reducir los esfuerzos termales. El índice de cemento reemplazado puede variar de 0 a 80 % de la masa.

En mezclas CCR que tienen un bajo contenido de cemento, las puzolanas han sido usadas para asegurar una adecuada cantidad de pasta para rellenar los vacíos y cubrir las partículas de los agregados. 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 CCR.

Para presas CCR de gran volumen, la puzolana es invariablemente almacenada, pesada e introducida dentro de la mezcla como un material separado. Para pequeños proyectos donde se desea usar la puzolana, puede tener un costo más efectivo usar cemento puzolánico premezclado, que almacenar, ensayar y manipular separadamente puzolana y cemento.

3.2.2 AGREGADOS

La calidad del agregado y la granulometría son factores que influyen en el producto final del CCR. Entre los diseñadores de mezclas CCR, han surgido ligeras diferencias en la selección del tamaño máximo del agregado (TMA), la proporción de arena en la mezcla y el porcentaje de finos que pasa la malla N° 200 (0.75 mm).

La segregación del agregado grueso en el fondo de las capas del CCR ha llevado a decidir la reducción del TMA en algunos casos o el incremento de la proporción de arena en la mezcla en otros. La mayoría de las mezclas con aproximación a suelos tienen un mayor porcentaje de finos, comparado con el contenido en las mezclas convencionales de concreto. Si los finos son no plásticos, rellenan los vacíos en el agregado, conducen a un decrecimiento de la demanda de agua y mejoran la compactación.

3.2.2.1 Calidad

La calidad requerida de los agregados depende de las propiedades deseadas del CCR, principalmente de su resistencia. Para un CCR de alta resistencia, es necesario un agregado de alta calidad. Los ensayos estándar para determinar la calidad y características de los agregados son mostrados en el Cuadro N° 3.2. En las fases iniciales del proyecto de diseño, se requieren datos referentes a granulometría y una manera de determinar la calidad del agregado. Experiencias pasadas con la fuente del agregado provee una indicación de su calidad.

Para el CCR que no estará sometido a grandes esfuerzos o a condiciones de congelamiento y deshielo cuando se encuentre en estado fresco, se pueden usar agregados de baja calidad. Esto se aplica principalmente al CCR que se colocará en el interior de la presa.

Los agregados adecuados para un CCR pueden provenir de variadas fuentes, pero se debe investigar primero el material cercano al sitio donde se ubicará la presa.

Cuadro N° 3.2 Características y ensayos para agregados utilizados en presas de CCR

Características	Importancia	Denominación de ensayo (U.S.)	Nombre del ensayo
Granulometría	Consistencia, economía en la compactación	ASTM C 136 ASTM C 117	Análisis por tamizado de agregado grueso y fino. Materiales más finos que la malla N° 200 en agregados minerales por lavado.
Resistencia a la abrasión	Calidad del agregado, resistencia de la cobertura de superficie	ASTM C 131 ASTM C 535 ASTM C 295	Resistencia a la degradación de agregado grueso pequeño por abrasión e impacto en la Máquina de los Ángeles. Resistencia a la degradación de agregado grueso grande por abrasión e impacto en la Máquina de los Ángeles. Examinación petrográfica de agregado para concreto.
Gravedad específica – absorción	Cálculo del diseño de mezclas	ASTM C 127 ASTM C 128	Gravedad específica y absorción del agregado grueso. Gravedad específica y absorción del agregado fino.
Peso unitario Bulk o densidad	Cálculo del diseño de mezclas	ASTM C 29	Peso unitario y vacíos en el agregado.
Resistencia a los sulfatos	Inalterabilidad en contra del desgaste y ataque químico	ASTM C 88	Inalterabilidad del agregado por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
Impurezas orgánicas	Ganar resistencia	ASTM C 40	Impurezas orgánicas en el agregado fino para concreto.

3.2.2.2 Granulometría

La granulometría y las proporciones usadas de agregado grueso y fino (menor que 4,75 mm) tienen un importante efecto en las propiedades del CCR.

Las diferencias entre las filosofías de diseño de mezclas han producido diferentes tendencias con respecto a los agregados especificados para el CCR. Esto se da principalmente en el tamaño máximo del agregado (TMA), el porcentaje deseado de arena y finos separados y procesados en un número de tamices, y entonces combinados para producir la granulometría deseada.

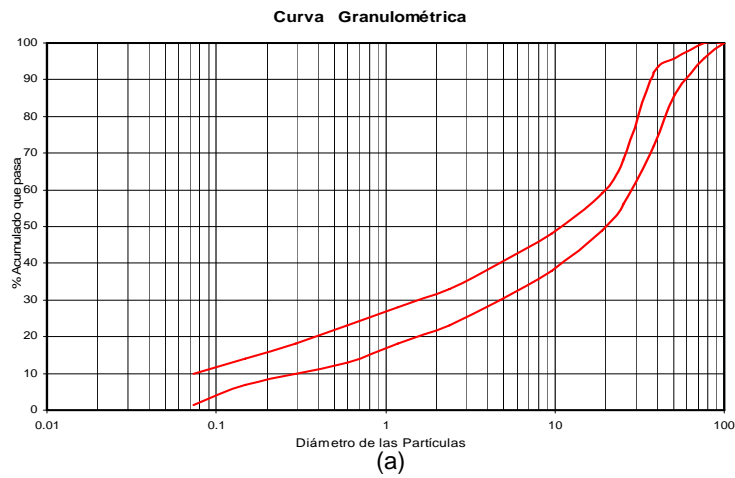
Debido a que el objetivo de las mezclas con aproximación a concreto es el de rellenar todos los vacíos de los agregados con pasta, un agregado bien graduado diseñado para producir un mínimo de vacíos es más importante para estas mezclas que para las mezclas con aproximación a suelos. Para muchas de ellas, el objetivo ha sido el uso de una granulometría aceptable que dé como resultado un menor costo global del CCR.

Para mezclas CCR **con aproximación a concreto**, los requerimientos para los agregados son muy similares a los exigidos para masas convencionales de concreto. El tamaño máximo de agregado comúnmente usado es de 3 pulg (75 a 80 mm), aunque se han usado tamaños máximos de 6 pulg y 2 pulg. Los porcentajes de arena han variado generalmente entre 30 a 35 % del agregado total. El porcentaje de finos que pasa el tamiz N° 200 ha sido usualmente limitado al 3 % del total del peso del agregado, especialmente si un alto porcentaje de puzolana es usado en la mezcla.

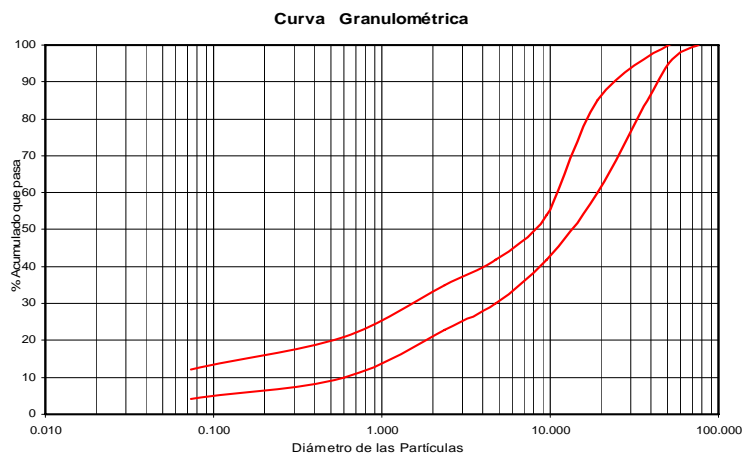
Las mezclas con **aproximación a suelos**, especificadas para muchas de las primeras presas de CCR, requirieron un agregado de tamaño máximo de 3 pulg (75 mm) y 30 a 35 % de arena. Sin embargo, con estas mezclas de consistencia seca, hay una gran tendencia que las partículas más grandes segreguen durante el transporte, la colocación y el extendido. La segregación puede ser reducida por la disminución del tamaño máximo del agregado y por el incremento del porcentaje de arena, por tal motivo hay una tendencia hacia un tamaño máximo de 2 pulg y porcentajes de arena en el rango de 35 a 40 %.

Muchas mezclas con aproximación a suelos han usado una sola combinación de granulometría de agregados, desde el tamaño máximo del agregado al menor que pasa el tamiz N° 200. Dos de estas fajas continuas de granulometría de agregados son mostradas en la Figura N° 3.2. La forma de las fajas son similares, aunque los límites permisibles para cada uno de los tamaños de tamiz, para el vertedero de la

presa Stacy con TMA de 2 pulg, son ligeramente más abiertos que la faja granulométrica que se usó en la presa Galesville con TMA de 3 pulg.



Especificación	
Tamiz	% que pasa
4 pulg	100
3 pulg	98 - 100
2 pulg	86 - 96
1 ½ pulg	72 - 92
1 pulg	56 - 68
¾ pulg	49 - 59
3/8 pulg	38 - 48
Nº 4	30 - 40
Nº 8	23 - 33
Nº 16	18 - 28
Nº 30	13 - 23
Nº 50	10 - 18
Nº 100	7 - 14
Nº 200	1,5 - 10



Especificación	
Tamiz	% que pasa
2 ½ pulg	100
2 pulg	95 - 100
3/4 pulg	60 - 85
3/8 pulg	42 - 54
Nº 4	30 - 42
Nº 8	23 - 35
Nº 30	10 - 21
Nº 200	4 - 12

Figura Nº 3.2 Fajas granulométricas de agregados utilizado en dos presas de CCR (a) Presa Galesville, (b) Presa Stacy (Oberholzer, 1985; Lemons, 1988)

La cantidad y tipo de finos menores del tamiz Nº 200 permitidos han variado considerablemente. Este ha fluctuado desde 0 a 3 % del total de agregado para algunas mezclas con aproximación a concreto y de 8 a 16 % para mezclas con aproximación a suelos. En muchos casos el agregado no lavado es apropiado para CCR.

Choi y Groom, 2001, han propuesto la faja granulométrica mostrada en la Figura Nº 3.3, especialmente para proyectos de tamaño pequeño a mediano con aproximación a suelos. Se propone un tamaño máximo de agregado de 1,5 pulg que ayudará a minimizar los problemas de segregación durante el mezclado, transporte, descargue y extendido del CCR durante la construcción. El 5 a 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.

Las mezclas de CCR hechas con una excesiva cantidad de finos de arcillas han mostrado una gran demanda de agua debido a la actividad de la superficie de los minerales de arcilla. El incremento del contenido de agua causa la producción de una mezcla pegajosa que es difícil de mezclar y compactar, de igual modo aumenta la contracción en el CCR y produce un gran potencial de agrietamiento y reducción de resistencia. Los finos deben ser no plásticos (IP<5) o tener un bajo índice de plasticidad y deben ser permitidos hasta el punto que rellenen los vacíos para reducir los requerimientos de agua y mejorar la compactabilidad.

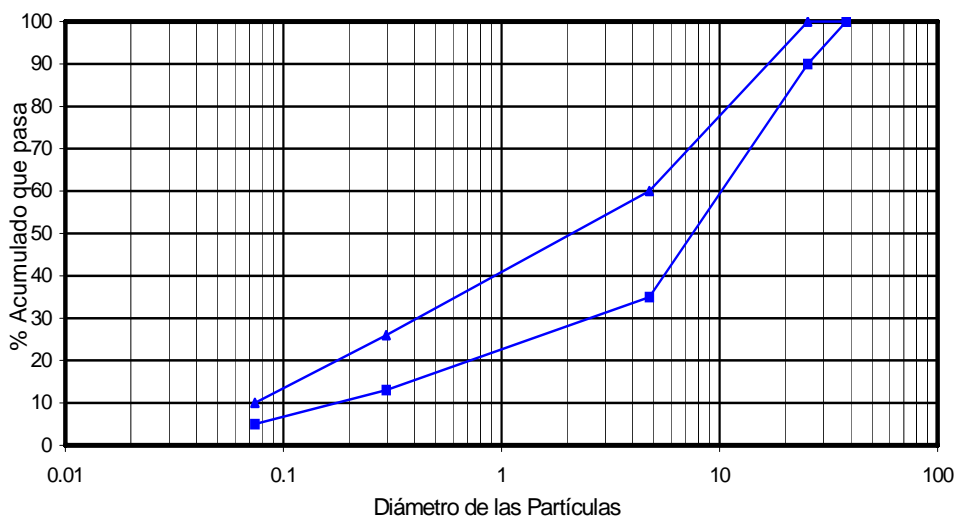


Figura N° 3.3 Faja granulométrica propuesta por Choi y Groom (2001) para proyectos pequeños a medianos con aproximación a suelos

3.2.3 AGUA

El único requerimiento para el agua en mezclas de CCR es que ésta debe estar libre de una excesiva cantidad de álcalis, ácidos o material orgánico que pueden inhibir la adecuada ganancia de resistencia. La mayoría de las mezclas de CCR requieren de 89 a 119 Kg de agua por m³ para agregados de tamaño máximo mayor que 2 pulg (50 mm).

3.2.4 ADITIVOS

Los aditivos han sido efectivos en mezclas CCR que contienen suficiente agua para proveer una pasta más fluida. Los aditivos reductores de agua y los aditivos reductores de agua y retardadores de fragua son los más comúnmente usados. Los aditivos reductores de agua, usados en muy grandes dosificaciones, han demostrado reducir la demanda de agua, incrementar la resistencia, retardar el fraguado y promover la

trabajabilidad en algunas mezclas de CCR. Sin embargo, el conocimiento de la eficacia en otras mezclas, típicamente con un bajo contenido de material cementante y bajos niveles de trabajabilidad es limitado. Los aditivos deben ser evaluados con la mezcla de CCR antes de ser usados en el campo.

Los aditivos de aire incorporado no son comúnmente usados en mezclas de CCR debido a la dificultad en generar las burbujas de aire del tamaño y distribución apropiada cuando la mezcla tiene una consistencia de asentamiento nulo. Sin embargo, el CCR con aire incorporado ha sido usado en una producción base en China y Estados Unidos en sus más recientes proyectos. Aditivos de aire incorporado han sido generalmente necesarios para desarrollar CCR con una consistencia de pasta fluida.

3.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

La mayoría de los ensayos usados hasta la fecha para CCR son ensayos estándar desarrollados para concreto convencional o en algunos casos para suelos. Dentro de ellos se incluyen ensayos para definir las propiedades y aprobación de los materiales, además de métodos para la manipulación y rotura de especímenes. Sin embargo, dos procedimientos son realizados de diferente manera en las pruebas de CCR: los ensayos de consistencia y la preparación de especímenes.

3.3.1 ENSAYOS DE CONSISTENCIA

El principal propósito de los ensayos de consistencia es determinar la cantidad de agua requerida para alcanzar las propiedades de resistencia deseadas y producir una mezcla adecuada para la compactación externa por rodillo. Para la aproximación a suelos, el contenido de agua deseado es determinado por la relación densidad-humedad. Para la aproximación a concreto, el contenido de agua de la mezcla es determinado usando una mesa vibratoria hasta alcanzar el tiempo deseado para que la pasta empiece a aparecer en la superficie de la mezcla CCR. Para ambas aproximaciones, se usa una mezcla de CCR en la que la única variable es el contenido de agua.

3.3.1.1 Ensayos de Vibración

El propósito de los ensayos de vibración es establecer un contenido de agua que corresponda a la consistencia deseada. Aún cuando existen varios ensayos similares para medir la consistencia, todos ellos siguen 3 pasos básicos:

- 1 Un recipiente u olla es relleno con concreto no compactado, nivelado y una sobrecarga es aplicada al CCR.
- 2 El cilindro es sujetado a una mesa vibradora, la que tiene una frecuencia y amplitud constante. El espécimen es entonces vibrado con la sobrecarga en la superficie hasta que se consolide completamente.
- 3 El tiempo en segundos es anotado cuando un anillo de pasta se forme completamente alrededor del borde interior del cilindro. Este tiempo es la medida de la consistencia o trabajabilidad de la mezcla.

El peso total de la sobrecarga usada varia considerablemente. En Japón es de 44 lb (20 Kg). El Cuerpo de Ingenieros usa 27,5 lb (22,7 Kg), según norma ASTM C 1170. Como el peso de la sobrecarga se incrementa, la tendencia del tiempo VeBe o VC decrece para la misma mezcla. En las investigaciones del diseño de mezclas para la presa Upper Stillwater, un tiempo VeBe de 35 a 45 segundos fue obtenido sin sobrecarga. Este se comparó a los 25 segundos con una sobrecarga de 50 lb para la misma mezcla.

Varios factores de la proporción de mezcla afectan el tiempo Vebe. Algunos de estos factores tienden a endurecer la mezcla, así como un alto contenido de arena y una alta temperatura incrementa el tiempo VeBe. Sin embargo, el principal factor es la cantidad de agua. Un menor tiempo VeBe indica un mayor contenido de agua, por consiguiente se producirá una mezcla de consistencia más fluida.



Figura N° 3.4 Aparato VeBe para medir la consistencia del CCR en mezclas con aproximación a concreto

3.3.2 PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES

Para la preparación de especímenes se han utilizado varios métodos, con el objeto de determinar las propiedades de mezclas CCR. El problema radica en la preparación de especímenes de laboratorio que produzcan propiedades parecidas a las del CCR colocado en el campo, donde camiones, topadoras y rodillos vibratorios compactan y consolidan la mezcla. La tarea del técnico de laboratorio es producir un espécimen de laboratorio que tenga la misma densidad que la final producida en el campo.

La mayoría de los especímenes se han preparado en moldes usados para la elaboración de cilindros de concreto estándar de 6 pulg de diámetro y 12 pulg de altura (152 por 304 mm). Estos moldes son fácilmente disponibles y pueden acomodar agregados de tamaño máximo de 2 pulg (50 mm).

Para mezclas CCR que usan agregados de tamaño máximo mayores, los agregados mayores a 2 pulg (50 mm) pueden ser tamizados o pueden utilizarse moldes más grandes, diseñados para este caso. Usualmente, se utilizan moldes cilíndricos de metal partidos o con hendidura para permitir la extracción más fácil de las mezclas secas compactadas de CCR. También se han usado moldes plásticos o fundas de metal insertados en un cilindro de acero sobre medido, para facilitar la extracción del espécimen.

Para la preparación de cilindros se utilizan tres métodos básicos: compactación por impacto, vibración y apisonamiento.

3.3.2.1 Especímenes Compactados por Impacto

Los métodos de compactación por impacto para la preparación de especímenes se han limitado a las mezclas de consistencia seca de la aproximación a suelos. El número de capas usado en la preparación de cilindros de prueba ha variado desde 3 capas de 4 pulg (100 mm) de espesor a 6 capas de 2 pulg (50 mm). Se debe considerar que el número de capas no es tan importante como el tipo de martillo o apisonador usado y la cantidad de esfuerzo de compactación o energía aplicada al material en el cilindro rígido.

La mayoría de los procedimientos para la preparación de especímenes compactados por impacto han sido hechos con el mismo tipo de equipo que es utilizado en el ensayo Proctor Modificado para suelos (ASTM D1557). El ensayo emplea un martillo de 10 lb (4,5 Kg) que se deja caer 18 pulg (450 mm) antes de golpear la superficie del material ensayado. El verdadero esfuerzo de compactación modificado equivale a 32,55 ft-lb/pulg³ (2693 kJ/m³).

Lowe, usó la compactación con el Proctor Modificado en 1960 para determinar el óptimo contenido de humedad del núcleo de rollcrete de la ataguía en la presa Shihmen en Taiwán. Un molde de compactación de 14 pulg (356 mm) de diámetro fue utilizado para realizar los ensayos en el CCR, el cual fue preparado con un agregado de tamaño máximo de 3 pulg (75 mm).

Reeves y Yates (1985), determinaron posteriormente que los especímenes de laboratorio compactados con el esfuerzo de compactación del Proctor Modificado tenían muy buena correlación con las densidades secas medidas para la presa de detención North Loop en Austin, Texas, para un CCR hecho con un agregado de caliza de tamaño máximo de 1,5 pulg (38mm). Los especímenes de CCR fueron preparados en 6 capas de 2 pulg (50 mm) y recibieron 122 golpes por capa.

Ensayos más recientes realizados por Casias, Goldsmith y Benavides (1988), del U.S. Boureau of Reclamation, indican que un menor esfuerzo de compactación puede ser más apropiado que el procedimiento del ensayo Proctor Modificado. Ellos encontraron que el esfuerzo de compactación usando el martillo estándar del Proctor Modificado, causaba mucho fracturamiento en el agregado grueso. La cantidad de agregado fracturado o el cambio de granulometría durante el impacto del ensayo de compactación está en función del agregado en particular. El agregado sólido y duro debe ser capaz de absorber más energía sin fallas. Ellos concluyeron que un esfuerzo de compactación por impacto de $13,3 \text{ ft-lb/pulg}^3$ (1100 kJ/m^3) provee mejores especímenes de ensayo. Este grado de compactación fue obtenido colocando el CCR en seis capas de 2 pulg (50mm) y dando 50 golpes a cada capa.

Wong et al (1988) también notaron la fractura del agregado usando la pequeña forma del sector del martillo asociado con el procedimiento del ensayo Proctor Modificado. Por lo tanto, desarrollaron una nueva cara de contacto del apisonador que consistió de un disco plano de 5,5 pulg de diámetro con bordes redondeados. El peso total del pisón continuaba en 10 lb (4,5 Kg) y había una distancia de $\frac{1}{4}$ pulg (6mm) entre el disco y el molde. Con este pisón modificado se alcanzó una mayor densidad, comparada con la obtenida con el pisón estándar para los mismos 93 golpes dados en cada una de las 3 capas de 4 pulg (100 mm). Los ensayos fueron hechos sin material cementante y la diferencia asciende a $1,3 \text{ lb/ft}^3$ ($20,8 \text{ Kg/m}^3$) en mayor densidad. El esfuerzo de compactación usado fue igual a $12,2 \text{ ft-lb/pulg}^3$ (1009 kJ/m^3).

3.3.2.2 Especímenes Vibrados

Los especímenes vibrados son usados principalmente para mezclas con aproximación a concreto, diseñadas para tener más pasta que vacíos en los agregados. Un cilindro

de acero de 6 pulg por 16 pulg (152 por 304 mm) es sujetado rígidamente a una mesa vibratoria y llenado en 3 capas iguales. Generalmente, la mesa vibratoria es la misma que se usa en el ensayo VeBe, para determinar la consistencia en las mezclas de CCR. En la parte superior de la capa se coloca un peso de 20 lb (9,1 Kg) y el cilindro es vibrado hasta que la pasta se forme alrededor del borde de la sobrecarga. Después de la tercera repetición, el exceso de concreto es enrasado y el cilindro es cubierto para su posterior ensayo. Este método es descrito en la Norma ASTM C 1176 y en el US Bureau of Reclamation Estándar 4906-86. Un método similar es usado para el método RCD en Japón excepto por el tamaño del espécimen que es aproximadamente de 9 pulg (240 mm) de diámetro con una altura de 8 pulg (200 mm).



Figura N° 3.5 : Mesa vibradora grande para preparación de cilindros CCR

3.3.2.3 Especímenes Apisonados

Otro método para producir cilindros de CCR involucra apisonamiento, el cual puede ser conseguido por dos distintos métodos: (1) El uso de un martillo pole neumático (2) El uso de un pisón vibratorio impulsado eléctricamente. El último aparato es conocido como martillo Kango en Europa y otros lugares, y pistola Hilti en los Estados Unidos. Para la preparación de cilindros de CCR, ambos usan una superficie llana de 5 a 5¾ pulg (127-146 mm) de diámetro para el martillo.

Existe una marcada diferencia entre la amplitud o golpe y la frecuencia de los dos apisonadores. El martillo pole tiene un golpe de aproximadamente 6 pulg (150 mm), mientras que el pisón vibratorio tiene una amplitud muy baja que es imperceptible a simple vista. La frecuencia de los pisones varían desde 2000 a 2400 impactos por minuto, mientras la frecuencia o golpes del martillo neumático es menor que 600 impactos por minuto. La frecuencia real depende en parte de la eficiencia de la unidad compresora de aire.

Ambos, el martillo pole neumático y el pisón vibratorio, han sido usados intensamente para la preparación de cilindros de mezclas CCR que conforman la aproximación a suelos.

El pisón eléctrico Hilti es apropiado para mezclas de consistencia intermedia. El martillo neumático es usado para mezclas de consistencia seca. La principal ventaja de su uso es que compactará con seguridad mezclas CCR de cualquier consistencia, excepto las mezclas muy húmedas con bajos tiempos VeBe. Sin embargo requiere mayor esfuerzo de los técnicos de laboratorio que otros métodos. La frecuencia de golpe de este martillo es similar a la frecuencia de un rodillo vibratorio de 10 Ton en el campo durante la compactación del CCR producido.

La duración de la compactación dependerá de la mezcla en particular, usualmente se usa alrededor de 15 segundos, para mezclas más secas se requiere más de 20 segundos por capa y para mezclas más húmedas el apisonamiento se tendrá que detener a los 10 segundos. La duración del tiempo de compactación debe ser el necesario para alcanzar una compactación completa. Esto puede ser determinado usualmente por un operador entrenado, escuchando el sonido del martillo y observando cuando las partículas de arena salen del molde en mezclas secas o cuando el pie del martillo se hunde en mezclas húmedas.

En la mayoría de los casos los cilindros tradicionales de 6 por 12 pulg (152 por 304 mm) han sido usados con el apisonador de pole o el pisón vibrador. Para cualquier de los dos métodos el agregado grande por encima de las 2 pulg (50 mm) es removido de la mezcla mediante tamizado antes de colocarse en el cilindro. Usualmente, el uso de cualquier aparato requiere una extensión de cilindro para compactar apropiadamente la parte superior.



Figura Nº 3.6 Martillo neumático, moldes metálicos y fundas utilizadas en la elaboración de probetas CCR



Figura N° 3.7 Pisón eléctrico Hilti

3.3.3 EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS APROPIADOS DE COMPACTACIÓN DE LABORATORIO

Diferentes métodos pueden ser usados para compactar especímenes de CCR en el laboratorio. El procedimiento debe ser el apropiado para el rango y tipos de mezcla CCR que serán incluidas en el programa de diseño, usado para determinar la mejor mezcla para el proyecto.

El equipo utilizado para la compactación de especímenes de CCR en el laboratorio debe lograr la misma densidad y el contenido de vacíos alcanzados en el campo con un equipo adecuado. Esto es, la densidad asociada con aproximadamente 1% de vacíos.

Las Figuras N° 3.8 y 3.9 resumen los procedimientos apropiados de compactación para mezclas CCR de diversas consistencias, obtenidos para un grupo de materiales específico por Schrader (2003). El principio básico es que el 100% de la resistencia máxima alcanzable será lograda por compactación de la mezcla en su consistencia más seca, que contiene cerca del 99% de la densidad teórica de aire libre. Como se muestra en las figuras, ésto ocurre para un grupo de materiales con un contenido de humedad de 3,9%. El contenido de humedad es el contenido de agua sobre la superficie saturada seca de los agregados dividido por el peso total de la mezcla, incluyendo el agua, material cementante, aditivos y agregados. La mezcla estaba bastante seca. De hecho, fue imposible obtener un tiempo VeBe modificado. El

aparato VeBe, simplemente no tuvo suficiente energía y capacidad para simular las 10 toneladas del rodillo, compactar completamente la mezcla y originar que la pasta ascienda a la parte superior del envase del VeBe.

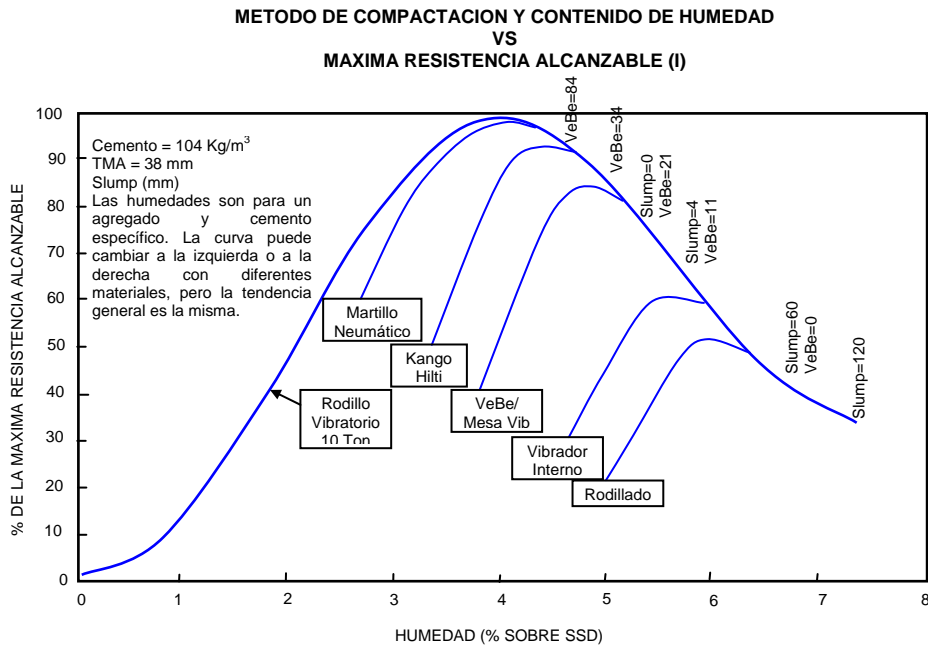


Figura Nº 3.8 Método de compactación y contenido de humedad vs máxima resistencia alcanzable (I) (Schrader, 2003)

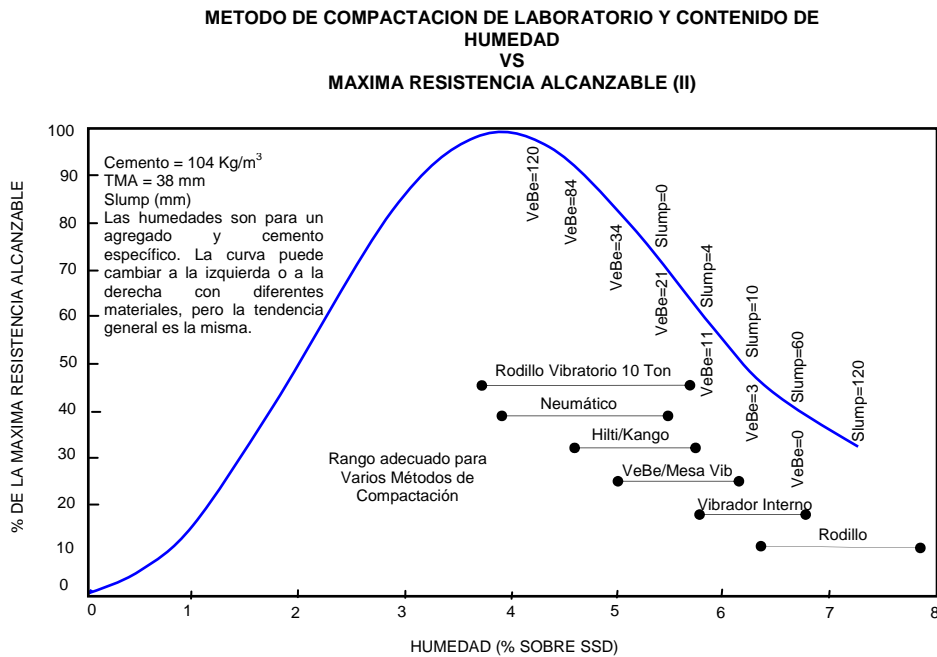


Figura Nº 3.9 Método de compactación y contenido de humedad vs máxima resistencia alcanzable (II) (Schrader, 2003)

La Figura N° 3.8 muestra claramente que la humedad óptima para la resistencia a la compresión depende del método de compactación o consolidación. El rodillo de 10 Ton y el martillo neumático alcanzaron ambos la humedad óptima. Otros métodos requieren más humedad, con la correspondiente pérdida de resistencia.

Sin embargo, debe resaltarse que la humedad óptima para obtener la resistencia máxima a la compresión resulta de una mezcla muy seca, la resistencia de la liga entre las capas de elevación probablemente se reduzca. La mezcla es simplemente muy seca para permitir que gran cantidad de pasta se mueva a través de la mezcla, cubra la superficie de la capa colocada previamente y asegure la máxima resistencia en la pega.

La Figura N° 3.9 muestra los rangos de humedad y trabajabilidad apropiados para diferentes métodos de elaboración de muestras para ensayos. Otros materiales y mezclas CCR pueden tener ligeras diferencias entre los contenidos de humedad máximos y mínimos para diferentes métodos de elaboración de muestras, pero la tendencia general en la mayoría de mezclas CCR, sin tener en cuenta el cemento y el contenido de ceniza, parece comportarse de una manera muy similar a las Figuras N° 3.8 y 3.9.

El rodillo de 10 Ton puede compactar mezclas de CCR que van desde muy secas no trabajables a mezclas húmedas con tiempos VeBe menores a 11 segundos. Esto es sólo aproximadamente donde el slump puede empezar a ser medido. En una consistencia más húmeda, el rodillo simplemente se hunde en el CCR.

El martillo neumático es aplicado a mezclas de consistencias tan secas como la máxima que pueda ser compactada con el rodillo, hasta mezclas cuyo tiempo VeBe es de aproximadamente 15 segundos o más.

El método de compactación mediante el plato vibratorio Hilti o Kango es aplicable a mezclas con un tiempo VeBe de aproximadamente 35 ó 40 segundos, hasta aproximadamente 12 segundos.

La mesa vibradora y el método de VeBe de compactación es aplicable a mezclas que tienen un tiempo VeBe modificado de alrededor de 3 a 30 segundos. El VeBe modificado es el correspondiente a la norma ASTM C 1170 con un peso de sobrecarga de 22,7 Kg.

El Cuadro N° 3.3 compara una gran cantidad de datos de uno de los primeros grandes proyectos CCR. Estos incluyen mezclas con altos y bajos contenidos de cemento. Algunas de ellas tienen ceniza volátil y otras no, pero todas las mezclas son relativamente secas con tiempos VeBe que van desde 30 segundos al infinito (tiempo

de ensayo no medible). Se han comparado resultados de más de 1000 ensayos. La densidad promedio para 860 cilindros compactados con el martillo neumático fue esencialmente idéntica al promedio de más de 1105 ensayos in-situ después de la compactación con el rodillo de 10 Ton (2452 Kg/m³ vs 2451 Kg/m³). El promedio de 81 cilindros hechos con el procedimiento de VeBe modificado fue significativamente menor (en 2331 Kg/m³). Las muestras de VeBe tenían un contenido de vacíos de aire del orden de 6%, mientras que las muestras realizadas con martillo tuvieron un contenido de aire del orden de 1% o ligeramente menor.

Cuadro N° 3.3 Comparación de densidades de CCR compactados por diferentes métodos

Mezcla C+F (Kg/m ³)	VeBe Modificado		Martillo Neumático		Rodillo de 10 Ton	
	Densidad húmeda (Kg/m ³)	Número de ensayos	Densidad húmeda (Kg/m ³)	Número de ensayos	Densidad húmeda (Kg/m ³)	Número de ensayos
47+19	2340	29	2456	221	-	-
104+00	2316	11	2451	228	-	-
104+47	2308	24	2444	228	-	-
187+80	2353	17	2465	183	-	-
Número de ensayos totales	-	81	-	860	-	1105
Promedio ponderado de densidad	2331	-	2452	.	2451	-

El Cuadro N° 3.4 compara resultados de muestras ensayadas de diferentes mezclas CCR hechas con el método VeBe y con el martillo neumático en dos proyectos con dos laboratorios diferentes. Se incluye una comparación de resultados de ensayos de separación por tracción y módulo de elasticidad, así como también resistencia a la compresión. Estos datos confirman que el método VeBe modificado es aplicable a mezclas con tiempos VeBe en el orden de 3 a 30 segundos, pero no debe ser usado para mezclas secas. Esto también confirma los contenidos de humedad indicados en las Figuras N° 3.8 y 3.9, que fueron establecidos para un tercer proyecto. Cada proyecto tuvo diferentes tipos de agregados (mezclas de gravas, basalto chancado con finos limosos naturales y granito/esquisto chancado).

Cuadro Nº 3.4 Efectos de los métodos de compactación en las propiedades del CCR

Mezcla C+F (Kg/m ³)	Tiempo VeBe (seg)	Agua de mezcla (SSD) (%)	Nº total muestras	Compresión		Split Tension		Módulo de Elasticidad		Proporción VeBe/martillo		
				VeBe (Mpa)	Martillo (Mpa)	VeBe (Mpa)	Martillo (Mpa)	VeBe (GPa)	Martillo (Gpa)	Compresión	Tensión	Módulo
47+19(W)	120+	3,5	55	11,1 ²	18,0 ²	-	-	-	-	62	-	-
104+00 (W)	120+	3,6	53	12,9 ²	26,0 ²	-	-	-	-	50	-	-
104+47(W)	45 ¹	3,6	53	22,8 ²	28,6 ²	-	-	-	-	78	-	-
187+80(W)	35 ¹	4,5	46	34,1 ²	39,9 ²	-	-	-	-	85	-	-
196+77(W)	15 ¹	5,6	14	31,7 ²	31,6 ²	-	-	-	-	100	-	-
100+00(M1)	25-35	4,8	12	4,3 ³	4,6 ³	0,6 ³	0,6 ³	10,5 ³	7,7 ³	93	100	136
100+00(M1)	25-35	4,8	12	6,8 ⁴	6,9 ⁴	0,8 ⁴	0,9 ⁴	20,5 ⁴	19,2 ⁴	99	89	107
125+00(M1)	25-35	4,9	6	6,6 ³	6,9 ³	0,8 ³	0,8 ³	15,0 ³	14,7 ³	96	100	102
125+00(M1)	25-35	4,9	6	9,6 ⁴	9,5 ⁴	1,4 ⁴	1,4 ⁴	27,5 ⁴	25,8 ³	101	100	107

¹ Promedio aproximado, basado en la combinación de ensayos y observaciones

² Promedio de resultados de ensayos a los 365 días

³ Promedio de resultados de ensayos a los 7 días

⁴ Promedio de resultados de ensayos a los 28 días

3.4 PROPORCIÓN DE MEZCLAS

El objetivo básico de la proporción de mezclas de CCR es producir un material que satisfaga el desarrollo de requerimientos, usando la combinación más económica de materiales disponibles rápidamente que puedan ser colocados por métodos de compactación con rodillo. Las propiedades físicas deseadas de la mezcla dependen de la función, localización y el diseño escogido para la estructura.

Para presas de CCR pobre, diseñadas con la cara aguas arriba relativamente impermeable, el principal requerimiento del diseño de mezcla es la resistencia a la compresión o la resistencia al corte. La resistencia está regida por mínimos requerimientos estructurales de seguridad con algunos factores de cálculo de sobre diseño a causa de la variabilidad de la mezcla, junto con apropiados factores de seguridad.

En el diseño de presas CCR de alta pasta, donde la sección entera es considerada como la barrera de agua, la cohesión entre las capas sucesivas del CCR y la permeabilidad del concreto son los requerimientos de diseño que controlan la mezcla. El CCR que será expuesto y sujeto a severas condiciones climáticas y a altas velocidades sísmicas debe ser diseñado por durabilidad, pudiendo requerir resistencias a la compresión tan altas como 351,8 Kg/cm² (34,5 MPa) en 28 días.

Todos los diseños de mezcla se deben iniciar con los mismos dos pasos: seleccionar las propiedades deseadas del CCR y luego determinar las propiedades de los materiales a ser usados.

Basados en el tipo de estructura, la disponibilidad de los materiales y su costo, se deberá tomar en cuenta las consideraciones iniciales de calidad y tamaño máximo del agregado, el tipo de cemento y si se usará puzolana y hasta que punto. Todos los métodos deben incluir la preparación de mezclas de prueba para confirmar que la consistencia es adecuada para la compactación con rodillo; esto usualmente se confirmará en una sección de prueba, usando los métodos de colocación y equipos que se planean utilizar en la presa. Si la mezcla determinada en el laboratorio demuestra ser inadecuada para la construcción, deberá ser ajustada adecuadamente.

3.4.1 MÉTODOS DE PROPORCIÓN DE MEZCLAS CON APROXIMACIÓN A CONCRETO

Los métodos de proporción de mezclas con aproximación a concreto dependen de ensayos de consistencia por vibración para determinar el contenido de agua de la mezcla.

Todos estos métodos son basados en un tiempo Vebe (o valor VC) - indicador de la completa consolidación del CCR - la premisa básica de estos métodos es que el volumen de la pasta debe exceder los vacíos en el agregado. Por lo tanto, hay una mayor necesidad de controlar atentamente la granulometría del agregado para minimizar los vacíos y la cantidad de pasta requerida. Todas las proporciones de mezclas involucradas usan conceptos de volumen absoluto, en los cuales los pesos y gravedades específicas de todos los materiales son usados para calcular el volumen unitario de concreto. La mezcla final, por lo tanto, consiste de una serie de pesos para producir un metro cúbico de CCR.

Los métodos de diseño de mezclas con aproximación a concreto usualmente involucran fijar todos, excepto uno de los materiales básicos (material cementante, agua o contenido de agregado) y entonces variar este componente hasta que la consistencia deseada o las propiedades requeridas sean alcanzadas. Cada variable puede ser ajustada de esta forma para optimizar todos los componentes de la mezcla.

3.4.1.1 El Método de la Alta Pasta

Este método de proporción de mezcla fue desarrollado por el Bureau of Reclamation de los Estados Unidos para ser usado durante el diseño de la presa Upper Stillwater. Las mezclas resultantes de este programa de ensayos generalmente contenían alta

proporción de material cementante, alto contenido de puzolana, agregados graduados normalizados y limpios, y alta trabajabilidad. El propósito de las mezclas de la presa Upper Stillwater fue proveer una excelente resistencia y baja permeabilidad en las juntas entre capas mediante el proporcionamiento de suficiente pasta cementante en la mezcla para aumentar el desarrollo en éstas.

El método de alta pasta implica determinar las proporciones agua/cemento y ceniza volátil-cemento para el nivel de resistencia deseado. Las proporciones óptimas de agua, agregado fino y agregado grueso son determinadas por una serie de ensayos, evaluando la consistencia VeBe para un rango de 10 a 30 segundos. Los volúmenes y masas requeridas de agregado, cemento, puzolana, agua y aire son entonces calculados.

3.4.1.2 El Método de Presa Compactada con Rodillo (RCD)

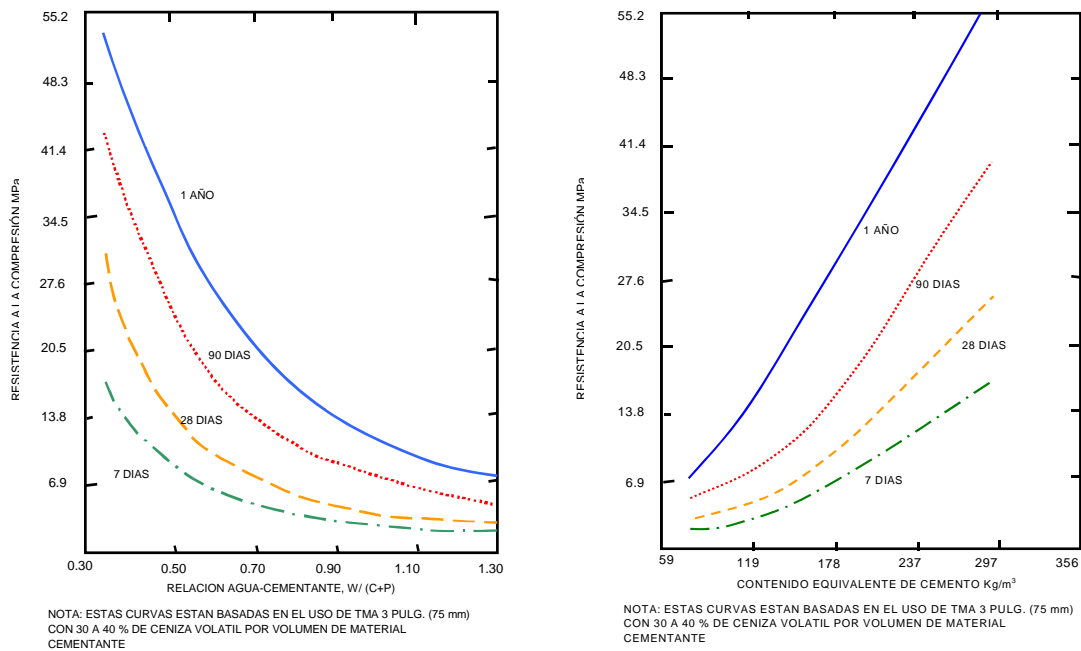
Este método fue desarrollado por ingenieros japoneses y es usado principalmente en Japón. El método es similar al proporcionamiento convencional de concreto en conformidad con ACI 211.1, excepto porque éste incorpora el uso de un contador de consistencia. El contador de consistencia es similar al aparato VeBe en el que la mezcla CCR es colocada en un recipiente y vibrado hasta que el mortero es observado en la superficie, este tiempo en segundos es definido como el valor VC (valor de compactación). El dispositivo es suficientemente grande para permitir evaluar la mezcla completa, con agregado de tamaño máximo nominal de 6 pulg (150 mm), antes que tener que tamizar las partículas de gran tamaño.

El procedimiento consiste en determinar la relación entre la consistencia, el valor final VC, el contenido de agua, relación arena-agregado, peso unitario del mortero y la resistencia a la compresión. La mezcla adecuada RCD es la óptima combinación de materiales que satisfacen los criterios de densidad específica. Debido a los requerimientos del equipo del ensayo de consistencia y diferencias en la naturaleza del diseño y construcción del RCD, este método no es muy usado para proporciones de mezclas de CCR fuera de Japón.

3.4.1.3 El Método del Cuerpo de Ingenieros del Ejército

Este método de proporción de mezclas está basado en la relación agua-cemento y resistencia. Se calcula una determinada cantidad de volumen de sólidos, tal como se usa en el proporcionamiento convencional del concreto. La relación agua/cemento y el contenido equivalente de cemento son establecidos de figuras basadas en los criterios de resistencia (Figuras N° 3.10 a y b). La demanda aproximada de agua está basada

en el tamaño máximo nominal del agregado y modificada por el tiempo VeBe deseado. El contenido de agregado fino es recomendado como un porcentaje del volumen total del agregado y está basado en el tamaño máximo nominal y en la naturaleza del agregado grueso. Una vez que el volumen de cada ingrediente es calculado, se puede realizar una comparación del contenido de mortero para valores recomendados, con la finalidad de verificar las proporciones. Este método también provee varios aspectos peculiares, incluyendo una combinación ideal de la granulometría de agregado grueso y fino, incorporando límites con un mayor porcentaje de finos que los permitidos por ASTM C 33. Debido a que el diseño de resistencia para muchas presas CCR se basa en 1 año, se pueden estimar las resistencias de los 90 ó 180 días usando las Figuras N° 3.10 (a) y (b).



(a)

(b)

Figura N° 3.10 (a) Resistencia a la compresión vs agua/cemento, (b) Contenido equivalente de cemento vs resistencia a la compresión (U.S. Army Corps of Engineers, 1992)

3.4.2 MÉTODOS DE PROPORCIÓN DE MEZCLAS CON APROXIMACIÓN A SUELOS

Dentro de esta aproximación encontramos dos métodos. Estos métodos inician el diseño con la granulometría deseada de agregados y conlleva la preparación de cilindros con varios contenidos de cemento para determinar la resistencia u otras propiedades. Las diferencias entre los dos métodos se centran en cómo la humedad o contenido de agua para la mezcla es determinada y el método de preparación de especímenes en las pruebas de laboratorio.

3.4.2.1 El Método de CCR Pobre

Este método se inicia con una granulometría de agregados fija, varios contenidos de cemento y la comparación de resultados, principalmente de la resistencia a la compresión, con los requerimientos del proyecto.

La faja continua de granulometría de agregados de la presa Galesville, mostrada en la Figura N° 3.2 (a) es típica de este método.

La cantidad de agua usada para las mezclas de prueba en laboratorio es determinada por la observación de la consistencia de las mezclas con diversos contenidos de agua, teniendo en cuenta las experiencias del pasado. El contenido de agua es establecido entre un punto del lado seco, donde los vacíos no son muy visibles en los lados del cilindro de laboratorio y en un lado húmedo, antes que la mezcla tenga un aspecto pegajoso .

Con la granulometría del agregado y el contenido de agua fijos, se preparan cilindros en el laboratorio con contenidos variables de cemento, utilizando un apisonador de pole neumático. La mayoría de las mezclas que se han obtenido con este método han variado desde 100 a 175 lb de cemento por yarda cúbica (60 a 104 Kg/m³), con excepción de las mezclas especiales.

Si se desea usar puzolana, se preparará otro conjunto de especímenes usando un porcentaje establecido de puzolana con respecto al total del contenido de material cementante, este porcentaje usualmente varía de 25 a 50 %. Típicamente, el programa de diseño de mezclas de laboratorio consiste de dos cilindros preparados para ensayar en 3, 7, 14, 28, 90, 180 y 365 días. Si no se cuenta con el tiempo suficiente para obtener resultados en las edades más tardías, la resistencia a la compresión puede ser estimada basada en la forma de la curva de las edades tempranas, en los resultados de los ensayos de proyectos anteriores usando el mismo método o por métodos de ensayo acelerados. De esta manera, el programa de diseño de mezclas proporciona una familia de curvas que indican los efectos de varios contenidos de material cementante en la resistencia a la compresión a varias edades.

El contenido de cemento puede ser seleccionado para satisfacer los requerimientos del proyecto teniendo en consideración los factores de seguridad y coeficientes de variación. Una vez que el contenido de cemento es seleccionado, pueden realizarse ensayos adicionales variando el tipo de agregado o la granulometría, especialmente el porcentaje de finos que pasa el tamiz N° 200.

3.4.2.2 El Método de Suelos Simplificado o Utilizando Concepto de Compactación de Suelos

Las mezclas CCR han sido proporcionadas desde 1960 usando los 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 básico es bastante similar al método de CCR pobre. 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 la Figura N° 3.2(b) se muestra una faja continua de granulometría de los agregados usados en la presa Stacy para el diseño de mezcla, utilizando este método.

En lugar de determinar el agua de manera visual, el óptimo contenido de humedad es determinado por los principios de humedad-densidad descritos en la sección 3.1.1, 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 ha sido usado para la mayoría de los proyectos actuales, aunque algunos investigadores han sugerido esfuerzos de compactación menores. 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.

Para resolver el problema de la rotura del agregado con el apisonador normalizado del Proctor Modificado, encontrado por algunos investigadores, se puede usar un disco plano más grande de 5.5 pulg de diámetro (140 mm) con bordes redondeados. Los pasos restantes en el método de diseño de mezcla son idénticos a los descritos para el método CCR pobre.

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

Este método de diseño de mezcla también ha sido usado extensamente para la modificación o rehabilitación de presas existentes, donde la principal consideración de diseño para el CCR expuesto ha sido la durabilidad y/o la resistencia a la erosión del material. En estos casos, la investigación de laboratorio puede involucrar varios contenidos de cemento para alcanzar un nivel deseado de durabilidad, cuando es medida por la pérdida de peso después de 12 o más ciclos de congelamiento y deshielo, similar al desarrollado para suelo-cemento. La durabilidad del diseño de

mezcla puede estar también basada en la pérdida de peso de especímenes sujetos a chorros de agua a alta velocidad o en una mínima fuerza compresiva. Para muchos de los diseños de mezclas por concepto de compactación de suelos, los contenidos de cemento y puzolana son expresados como un porcentaje del peso seco del agregado. Los porcentajes son útiles en el proporcionamiento volumétrico del CCR asociado con la mayoría de operaciones de mezclas con amasadora.

3.5 PROPIEDADES DEL CCR

3.5.1 GENERALIDADES

Las propiedades del CCR dependen de la calidad de los materiales empleados, de la proporción de mezcla y del grado de compactación o consolidación. Debido al amplio rango de materiales y de mezclas que han sido usados en las diferentes presas construidas a nivel mundial, desde mezclas pobres a mezclas con alto contenido de material cementante, los valores obtenidos para el conjunto de propiedades han sido variables.

Debido a que las mezclas CCR que conforman la aproximación a suelos usualmente contienen más del 2% de vacíos de aire, el grado de compactación juega un rol importante en la producción de resistencia. Los vacíos son producidos por el contacto partícula-partícula de los agregados sin suficientes finos o pasta para rellenar los vacíos. El incremento de la compactación tiende a disminuir estos vacíos, produciéndose un CCR más denso con un correspondiente incremento de la resistencia. Los agregados pobremente graduados o los agregados con un alto porcentaje de agregado grueso, pueden tener una matriz de agregados que está completamente compactada y aún posee un relativo alto porcentaje de vacíos, originando densidades y resistencias bajas. Aunque en las mezclas con aproximación a suelos, se puede tener un mayor volumen de vacíos, todos los contactos de los agregados son cementados juntos.

La compactación con rodillo de una mezcla de CCR de asentamiento nulo, produce un material que es anisotrópico para muchas de sus propiedades. Esto se da principalmente para la impermeabilidad, donde la permeabilidad en dirección de la compactación vertical puede ser apreciablemente menor que en la dirección horizontal.

3.5.2 RESISTENCIA

3.5.2.1 Resistencia a la Compresión

Ensayos de resistencia a la compresión son desarrollados en la fase de diseño para determinar los requerimientos de la proporción de mezclas y optimizar la combinación de los materiales cementantes y agregados. La resistencia a la compresión es utilizada para satisfacer los requerimientos de cargas de diseño y también como indicador de otras propiedades tales como la durabilidad. Durante la construcción, los ensayos de resistencia a la compresión son usados para confirmar las propiedades de diseño como un instrumento para evaluar la variabilidad de la mezcla.

La resistencia a la compresión es normalmente requerida debido a su facilidad de determinación y a que muchas otras propiedades están directamente ligadas a ella. Para las presas de CCR se requieren usualmente edades de ensayo de 90, 180 ó 360 días y de 28 días para pavimentos de CCR. Las edades requeridas para las presas de CCR se deben al desarrollo de resistencias a largo plazo de concretos que tienen en su mezcla material puzolánico como parte del material cementante.

La resistencia a la compresión del CCR está determinada por el contenido de agua, el contenido y las propiedades del material cementante, la granulometría del agregado y el grado de compactación. Para muchas mezclas CCR, la resistencia en compresión es una función de la relación agua - material cementante, tal como en los concretos convencionales.

La resistencia a la compresión del CCR se incrementa con una reducción en el contenido de agua, mientras que esté completamente compactado. La máxima resistencia a la compresión para una mezcla determinada se obtiene con el óptimo contenido de agua acorde con el esfuerzo de compactación dado. Los contenidos de agua menores que el óptimo producen resistencias a la compresión menores, indicando ello que la presencia de vacíos en la mezcla tiene un efecto negativo mayor sobre la resistencia que el efecto positivo de reducción de agua.

Para la mayoría de los CCR, el diseñador establece un contenido de agua relativamente fijo, el cual está basado en el tiempo Vebe o valor VC para mezclas con aproximación a concreto, o una máxima densidad seca para mezclas diseñadas usando la aproximación a suelos. El diseñador de mezclas CCR con aproximación a suelos puede decidir especificar un contenido de agua ligeramente mayor que el óptimo para obtener una mejor trabajabilidad. Sin embargo, una vez que el contenido de agua y el esfuerzo de compactación son establecidos, la resistencia a la compresión depende del contenido de cemento o del contenido de la puzolana más

cemento. La resistencia a la compresión se incrementa con el tiempo y el contenido de material cementante en la mezcla.

Las mezclas CCR con bajo contenido de material cementante pueden no alcanzar los niveles de resistencia requerida si los vacíos entre los agregados no son rellenados completamente. Para estas mezclas la adición de finos no plásticos o polvos de roca ha sido beneficioso en el relleno de vacíos, de esta manera se incrementa la densidad y la resistencia. Se ha demostrado que el uso de finos plásticos (arcillas) en mezclas de CCR afecta desfavorablemente la resistencia y trabajabilidad, y por consiguiente no es recomendado.

Resistencias típicas a la compresión del CCR son dadas en el Cuadro N° 3.5.

Cuadro N° 3.5 Resistencia a la compresión de algunas presas de CCR - construcción controlada con cilindros (ACI 207.5R-99)

Presa/proyecto	Cemento (Kg/m ³)	Puzolana (Kg/m ³)	a/c	TMA pulg	Método de fabricación de cilindros	Resistencia a la compresión, Kg/cm ² , a la edad de				
						7 días	28 días	90 días	180 días	360 días
Camp Dyer	82	81	0,55	1,5	VB	61,9	103,4	-	-	258,7
Concepcion	90	0	1,03	3	PT	40,8	56,2	77,3	89,3	-
Galesville	53	51	1,09	3	PT	21,1	40,8	71,7	-	113,9
	65	68	0,84	3	PT	29,5	57,7	96,3	-	-
Middle Fork	66	0	1,43	3	PT	-	89,3	116,0	-	-
Santa Cruz	76	75	0,67	2	VB	76,6	191,9	226,4	-	310,8
Stacy Spillway	125	62	0,82	1,5	MP	-	184,2	218,0	-	-
Stagecoach	71	77	0,93	2	PT	15,1	24,6	-	69,3	87,9
Upper Stillwater	79	173	0,37	2	VB	109,7	180,7	253,1	393,0	490,7
	94	207	0,30	2	VB	143,4	240,5	295,3	388,8	519,6
	79	173	0,39	2	VB	75,9	128,7	182,8	-	450,0
	93	206	0,33	2	VB	94,2	156,8	218,7	-	474,6
Urugua-I	60	0	1,67	3	PT	-	65,4	82,3	-	97,7
Willow Creek	104	0	1,06	3	PT	70,3	130,1	186,3	-	265,8
	104	47	0,73	3	PT	80,9	144,8	278,4	-	291,8
	47	19	1,61	3	PT	40,8	82,3	121,6	-	184,2
	187	80	0,41	1,5	PT	142,7	239,8	314,3	-	407,1

Nota: Método de fabricación de cilindros: VB = Vebe (ASTM C 1176); MP = Proctor Modificado (ASTM D 1557); y PT = Martillo Neumático.

Las mezclas CCR con un bajo contenido de pasta pueden alcanzar resistencias a la compresión de 50 a 150 Kg/cm², las de contenido de pasta medio de 110 a 210 Kg/cm² y las mezclas con alto contenido de pasta alcanzarán resistencias de 175 a 315 Kg/cm². Las Figuras N° 3.11 (a) y (b) muestran una familia de curvas de resistencia a la compresión desarrolladas para diferentes agregados, usando el método de máxima densidad para la proporción de mezclas.

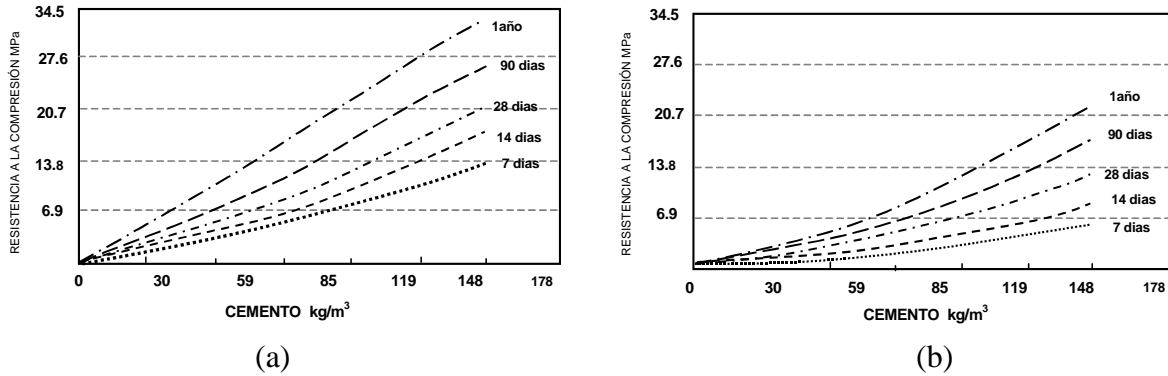


Figura N° 3.11 (a) Curvas de resistencia CCR que pueden ser desarrolladas con varias proporciones de cemento para agregados de buena calidad. (b) Curvas de resistencia CCR desarrolladas con agregados de menor calidad. (ACI 207.5R-99)

3.5.2.2 Resistencia a la Tensión

La resistencia a la tensión del CCR es requerida para propósitos de diseño, incluyendo el análisis de cargas dinámicas y el análisis térmico.

La relación de la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión en el CCR varía dependiendo de la calidad del agregado, edad, contenido de cemento y resistencia. La resistencia a la tensión del CCR está en el orden del 10% al 15% de la resistencia a la compresión.

3.5.2.3 Resistencia al Corte

La resistencia al corte es una de las más importantes propiedades del CCR endurecido para presas y es generalmente determinada usando la ecuación de Coulomb:

$$S = c + \sigma \tan \phi$$

Donde:

S = resistencia al corte, Mpa (psi)

c = cohesión, Mpa (psi)

σ = esfuerzo normal o de confinamiento, Mpa (psi)

ϕ = ángulo de fricción, grados

La cohesión c es también llamada esfuerzo de adhesión, mientras que $\sigma \tan \phi$ define la resistencia a la fricción de deslizamiento. El método usual para obtener los datos de cohesión y el ángulo de fricción es el ensayo de corte directo, usando varias cargas normales.

La cohesión varía con la proporción de mezclas, especialmente por el contenido de pasta y material cementante, con la edad y con la preparación y exposición de las juntas entre capas. El ángulo de fricción es dependiente principalmente del tipo y forma del agregado y es relativamente independiente de los factores que afectan la cohesión. Generalmente el ángulo de fricción no cambia significativamente con la proporción de mezcla y con la edad.

Desde el punto de vista de la resistencia al esfuerzo cortante, si bien el cemento influye, no es el factor más importante, sino la forma en que se tratan las juntas, a fin de lograr la mayor adherencia posible.

La resistencia mínima se presenta en las juntas de construcción y a lo largo de la interfase entre capas del CCR. Una junta de construcción típica en la masa de concreto de una presa es la superficie horizontal de un concreto existente, el cual ha comenzado a rigidizar antes que el nuevo concreto pueda ser incorporado al anterior. Tales juntas de construcción son conocidas como juntas frías o juntas entre capas y desde que es imposible continuar colocando concreto sin interrupciones en la totalidad de una gran presa, ellas son inevitables como igualmente lo son si el tiempo de vaciado entre capas es excesivo. Valores típicos de ensayos de corte para el CCR del cuerpo y de las juntas son dados en el Cuadro N° 3.6.

Cuadro N° 3.6 Comportamiento al corte de testigos perforados de presas de CCR (ACI 207.5R-99)

Presa/ proyecto	Cemento (Kg/m³)	Puzolana (Kg/m³)	TMA pulg	Tipo de junta	Edad días	Resistencia a la compresión testigos (Kg/cm²)	Cohesión pico (Kg /cm²)	Corte φ grados	Corte residual cohesión (Kg /cm²)	Corte residual φ grados
Cuchillo Negro	77	59	3	B	750	177,9	15,8	58	-	-
	77	59	3	P	750	177,9	25,3	52	-	-
	77	59	3	NB	750	177,9	7,0	62	-	-
Elk Creek	70	33	3	P	90	94,2	15,8	43	-	-
	70	33	3	B	90	94,2	8,8	49	-	49
Galesville	53	51	3	NB	415	146,2	7,7	67	5,6	40
	53	51	3	B	415	146,2	23,2	52	4,9	43
	53	51	3	P	415	146,2	26,7	33	6,7	45
Upper Stilwater	79	173	2	NB	365	367,0	31,6	53	2,1	49
	79	173	2	NB	545	393,0	39,4	76	1,4	53
	79	173	2	P	120	272,1	21,1	55	2,1	42
	79	173	2	NB	730	457,7	30,9	48	1,4	46
Victoria	67	66	2	P	365	188,4	19,7	64	2,8	47
	67	66	2	B	365	188,4	16,2	69	0,7	44
	67	66	2	NB	365	188,4	12,0	62	14,1	48
Willow Creek	104	0	3	NB	200	-	13,0	65	-	-
	104	47	3	NB	200	-	13,1	63	-	-
	47	19	3	NB	200	-	8,1	62	-	-
Zintel Canyon	74	0	2,5	NB	345	106,2	6,0	56	0,7	40
	74	0	2,5	B	345	106,2	14,1	54	0,7	40
	74	0	2,5	P	345	106,2	20,4	56	-	55

Tipo de junta : B = concreto de asentamiento o mortero; NB = concreto de asentamiento 0; P = masa de concreto

3.5.3 PROPIEDADES ELÁSTICAS

3.5.3.1 Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad está definido como la relación del esfuerzo normal a su correspondiente deformación para esfuerzos de tensión o compresión, por debajo del límite elástico proporcional del material.

Los principales factores que pueden afectar el módulo de elasticidad del CCR son la edad, la resistencia, el volumen de pasta y el tipo de agregado. Generalmente para un tipo de agregado dado, el módulo de elasticidad está en función de la resistencia.

Las mezclas CCR preparadas con agregados para concretos convencionales y un contenido relativamente alto de cemento o cemento más puzolana pueden desarrollar módulos similares a aquellos obtenidos en concretos convencionales.

En la mayoría de concretos masivos, se desea un bajo módulo para disminuir las grietas potenciales. Mezclas pobres de CCR, usando finos naturales o manufacturados como el filler han resultado con muy bajo módulo.

Datos de propiedades de elasticidad típicas del CCR son dados en el Cuadro N° 3.7.

Cuadro N° 3.7 Resistencia a la compresión y módulos de elasticidad de algunas mezclas CCR de laboratorio (ACI 207.5R-99)

Presal/ Proyecto	Método fab. cilindros	TMA pulg	a/c	Resistencia a la compresión, Kg/cm ²				Módulo de elasticidad Kg /cm ² x 10 ⁶			
				7 días	28 días	90 días	365 días	7 días	28 días	90 días	365 días
Concepción	PT	3	1,03	45,0	68,9	87,9	118,8	-	0,08	0,13	0,23
Santa Cruz	VB	2	0,88	45,0	90,7	153,3	214,4	0,10	0,13	0,16	0,23
Upper Stillwater	VB	2	0,47	95,6	149,8	246,8	367,0	-	0,07	0,09	0,12
	VB	2	0,45	54,1	85,8	151,2	336,1	-	0,06	-	0,11
	VB	2	0,43	78,0	113,9	194,8	348,7	-	0,06	-	0,12
Urugua I	PT	3	1,67	-	65,4	82,3	97,7	-	0,16	0,22	0,25
Willow Creek	PT	3	1,06	70,3	129,7	186,3	265,8	0,15	0,19	0,20	-
	PT	3	0,73	80,9	144,8	278,4	291,8	0,17	0,20	0,23	-
Zintel Canyon	PT	3	1,61	40,8	82,3	121,6	184,2	0,08	0,11	0,13	-
	PT	3	2,00	19,7	44,3	76,6	109,0	0,05	0,11	0,15	0,18
	PT	3	1,00	69,6	113,9	149,8	218,0	0,11	0,17	0,17	0,23

3.5.3.2 Relación de Poisson

El valor de la relación de Poisson es la relación de la deformación transversal (lateral) a la correspondiente deformación axial (longitudinal), resultante de la distribución uniforme de los esfuerzos axiales bajo el límite de proporcionalidad del material. Se ha encontrado que el valor de la relación de Poisson en el CCR es similar a los valores

reportados para los concretos normales, pudiendo presentarse un rango de 0,17 a 0,22.

Cuadro N° 3.8 Resistencia a la compresión y relación de Poisson de algunas mezclas CRR de laboratorio (ACI 207.5R-99)

Presa/ Proyecto	Método fab. cilindros	TMA pulg	a/c	Resistencia a la compresión, Kg/cm ²				Relación de Poisson			
				7 días	28 días	90 días	365 días	7 días	28 días	90 días	365 días
Concepción	PT	3	1,03	45,0	68,9	87,9	118,8	-	0,17	-	-
Santa Cruz	VB	2	0,88	45,0	90,7	153,3	214,4	0,13	0,14	0,19	0,21
Upper Stillwater	VB	2	0,47	95,6	149,8	246,8	367,0	-	0,13	0,14	0,17
	VB	2	0,45	54,1	85,8	151,2	336,1	-	0,13	-	0,20
	VB	2	0,43	78,0	113,9	194,8	348,7	-	0,13	-	0,18
Urugua I	PT	3	1,67	-	65,4	82,3	97,7	-	-	-	-
Willow Creek	PT	3	1,06	70,3	129,7	186,3	265,8	-	0,19	0,18	-
	PT	3	0,73	80,9	144,8	278,4	291,8	-	0,21	0,21	-
	PT	3	1,61	40,8	82,3	121,6	184,2	-	0,14	0,17	-
Zintel Canyon	PT	3	2,00	19,7	44,3	76,6	109,0	-	-	0,21	-
	PT	3	1,00	69,6	113,9	149,8	218,0	-	-	0,20	-

3.5.4 DEFORMACIÓN

3.5.4.1 Escurrimiento Plástico

Cuando el concreto está sometido a una carga, la deformación causada puede ser dividida en una deformación elástica (relacionada al módulo de elasticidad), la cual ocurre inmediatamente y desaparece totalmente en cuanto se remueve la carga, y el escurrimiento plástico el cual se desarrolla gradualmente bajo carga continua, una vez retirada ésta el escurrimiento plástico continúa indefinidamente. Sin embargo, tiende a disminuir aproximadamente a un valor límite.

El escurrimiento plástico en el CCR está en función del agregado y la resistencia del CCR. Agregados que producen un bajo módulo de elasticidad en el concreto producirán un alto valor de escurrimiento plástico. Las mezclas de altas resistencias tienen una pasta de cemento más rígida y por lo tanto una baja deformación o valor de escurrimiento plástico cuando son cargadas. Para las presas CCR es usualmente deseable un alto valor de escurrimiento plástico o la capacidad de aliviar el esfuerzo sufrido. Sin embargo, los esfuerzos compresivos en presas de gravedad son generalmente bajos y el escurrimiento plástico no es una mayor preocupación para los diseñadores de presas.

3.5.4.2 Capacidad de Deformación por Tensión

La capacidad de deformación es considerada como la última deformación bajo tensión antes de la ruptura. La deformación es inducida cuando un cambio en el volumen es impedido. Cuando el cambio de volumen da por resultado una deformación por tensión que excede la capacidad del material para absorber la deformación, se presenta una grieta. El valor de deformación justo antes del agrietamiento es la capacidad de deformación del material.

La deformación por tensión puede ser desarrollada por cargas externas, así como por cambios de volumen inducidos por secado, reducción de temperatura o por contracción autógena.

Como cualquier otra propiedad del material, la capacidad de deformación del CCR puede variar considerablemente con el amplio rango de diseños de mezclas y con los agregados empleados. Los principales factores que afectan la capacidad de deformación son la velocidad de carga, el tipo de agregado y sus características de forma, y el contenido de cemento.

3.5.5 PROPIEDADES TÉRMICAS

Las propiedades térmicas, incluyendo el calor específico, conductividad, coeficiente de expansión térmica y el aumento de temperatura adiabática son la principal preocupación en masas de concreto convencional y de concreto compactado con rodillo. Las propiedades termales de las mezclas son gobernadas por las propiedades termales de los constituyentes. Aunque los valores para concretos convencionales y CCR son similares, los valores reales medidos pueden variar significativamente, dependiendo del tipo y contenido de agregado, cemento y puzolana.

El aumento de la temperatura adiabática es afectado por el total del contenido de material cementante y el porcentaje de puzolana en la mezcla. Las mezclas de CCR con bajo contenido de material cementante tendrán menor aumento de temperatura que las mezclas normales de concreto masivo. También, las puzolanas pueden reducir la velocidad de aumento de temperatura en las edades tempranas.

3.5.6 CAMBIOS DE VOLUMEN

3.5.6.1 Contracción por Secado

La contracción por secado es gobernada principalmente por el contenido de agua en la mezcla y en menor extensión por el grado de control del agregado. El cambio de volumen debido a contracción por secado en CCR se minimiza debido al bajo

contenido de agua de éste.

3.5.6.2 Cambio de Volumen Autógeno

El cambio de volumen autógeno, comúnmente llamado "contracción autógena" es una disminución en el volumen del concreto debido a la hidratación de los materiales cementantes dentro del concreto, ganando o perdiendo humedad. Este tipo de cambio de volumen ocurre en el interior de una gran masa de concreto y puede ser un factor significativo. Está principalmente relacionado a las propiedades de los materiales, las proporciones en la mezcla y especialmente al tipo de agregado.

Las mezclas CCR con un factor bajo de cemento tienden a ser más estables. El efecto de esta propiedad puede generalmente ser ignorado para estructuras pequeñas y de menor longitud.

3.5.7 PERMEABILIDAD

La permeabilidad del CCR depende principalmente de los vacíos en la masa compactada junto con la porosidad de la matriz del mortero, y por lo tanto, está casi totalmente controlada por la proporción de mezcla, el método de colocación y el grado de compactación.

El CCR será relativamente impermeable cuando la mezcla contenga suficiente pasta, mortero y una adecuada distribución de las partículas finas que minimicen el sistema de vacíos de aire, que eviten la ocurrencia de la segregación del agregado grueso y se obtenga una completa compactación.

En general, una masa de CCR sin fisuras, preparada con agregado convencional limpio, con suficiente pasta o una mezcla muy pobre con una granulometría de agregados controlada y con suficientes finos, deberá tener valores de permeabilidad similares al de los concretos normales.

La propiedad que causa mayores preocupaciones a los diseñadores de presas de CCR es la permeabilidad en sitio, siendo las juntas entre las capas la principal causa de la dificultad. Sin embargo se ha demostrado que es posible obtener un monolitismo efectivo y estructuras impermeables, cuando el CCR se coloca en capas y se presta especial atención al tratamiento entre juntas.

Se ha sugerido que la impermeabilidad del CCR puede estar directamente relacionada a su contenido de material cementante. Este hecho es especialmente aplicable a las mezclas CCR que conforman la aproximación a concreto donde la pasta excede a los vacíos en el agregado. Por lo tanto, los mayores contenidos de material cementante

producen una pasta más impermeable. Para mezclas con aproximación a suelos, se puede alcanzar una mayor impermeabilidad con una combinación del incremento del contenido de cementante, mayor compactación y suficiente cantidad de finos en un agregado bien graduado, todo ello con la finalidad de reducir los vacíos en el material.

Las mezclas CCR mejoradas con un coeficiente de permeabilidad similar al de los concretos normales son más adecuadas para la construcción de presas de gravedad o presas de arco de gran altura. El empleo de un alto porcentaje de finos (que no sean cemento), filler o material puzolánico en una mezcla CCR, contribuye a su baja permeabilidad, sin incrementar las posibilidades de agrietamiento térmico.

El coeficiente de permeabilidad de las juntas de construcción del CCR ensayadas tiene valores desde 1×10^{-9} a 1×10^{-11} cm/s, comparables con los del concreto normal.

3.5.8 DURABILIDAD

La durabilidad del CCR es especialmente importante si el material es expuesto al tiempo o a fuerzas hidráulicas severas. El CCR, como el concreto en masa convencional, está sujeto a un potencial deterioro debido a los efectos de abrasión/erosión, congelamiento/deshielo y otros factores como reacción álcali /sílice y ataque a los sulfatos.

3.5.8.1 Resistencia a la Abrasión y Erosión

La resistencia a la erosión del CCR es proporcional a su resistencia a la compresión y a la abrasión de los agregados empleados en la mezcla. El CCR ha mostrado buena resistencia a la erosión y abrasión, tanto en el laboratorio como en obra. Los pavimentos que soportan carga pesada no han presentado desgaste apreciable por tráfico o abrasión industrial bajo condiciones severas.

3.5.8.2 Resistencia al Congelamiento y Deshielo

Debido a que generalmente en las mezclas CCR un contenido apropiado de aire atrapado no es obtenible con aditivos, la resistencia al congelamiento y deshielo deberá basarse en su resistencia e impermeabilidad. Las mezclas CCR de altas resistencias con bajas permeabilidades tienen una mayor resistencia al congelamiento - deshielo que las mezclas pobres de bajas resistencias.

Si las mezclas CCR son diseñadas por durabilidad, empleando ensayos de pérdida de peso por congelamiento-deshielo y criterios como los desarrollados para suelo - cemento, se espera una durabilidad aceptable frente a procesos de congelamiento y deshielo. La cantidad de cemento necesaria para producir una mezcla de CCR lo

suficientemente durable, puede ser mayor que la requerida para alcanzar otras propiedades, tales como la resistencia a la compresión. Cuando las superficies horizontales del CCR serán expuestas a ciclos tempranos de congelación y deshielo, es recomendable no realizar el reemplazo de cemento por puzolana o de lo contrario hacerlo en pequeñas proporciones, debido a las altas resistencias iniciales que se requieren en estas condiciones.

3.5.9 PESO UNITARIO

El peso unitario o densidad depende principalmente de la gravedad específica de los agregados y de la cantidad de vacíos en la masa del CCR. En el CCR hay poca cantidad de vacíos de aire retenido, reducidos por la gran compactación. Esto significa que existe una mayor cantidad de sólidos en un volumen unitario de CCR, por lo tanto el peso unitario es generalmente mayor que en el concreto convencional hecho con agregado de la misma gravedad específica. Pesos unitarios mayores que 2400 Kg/m^3 son comunes para CCR.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE MEZCLAS CCR UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

4.1 GENERALIDADES

El diseño de mezclas de Concreto Compactado con Rodillo (CRR) fue originalmente desarrollado por ingenieros geotécnicos y empresas de ensayos de materiales que han estado familiarizados con los procedimientos de compactación de suelos y con los equipos empleados en el ensayo de probetas de concreto. En general, el método de diseño de mezclas utilizando conceptos de compactación de suelos puede ser considerado un "enfoque simplificado" (Reeves y Yates, 1985), donde se recomienda una combinación de la teoría de mecánica de suelos y la teoría de concreto, utilizando equipos convencionales de laboratorio y procedimientos de ensayos de campo, debido a que las resistencias y densidades del CCR obtenidas en el campo pueden ser modeladas y previstas en el laboratorio usando métodos convencionales.

Reconociendo la versatilidad potencial y económica del CCR como material de construcción, es importante que el diseño, los ensayos y el proceso constructivo sean lo más simples posible; de tal manera, que el ingeniero de diseño, el constructor y el ingeniero de laboratorio puedan fácilmente responder a las necesidades de un proyecto de CCR. Para lograr este objetivo, un proyecto de CCR debe utilizar equipos de laboratorio, ensayos, tecnologías de construcción y control de campo, conocidos.

La metodología simplificada 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 curado y 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.

4.2 PROCEDIMIENTOS DEL DISEÑO DE LA MEZCLA DE CCR

En base a los principios mencionados y en vista que actualmente la tecnología del Concreto Compactado con Rodillo y el diseño de mezcla por métodos de Compactación de Suelos es una técnica que se está empleando alrededor del mundo

para la construcción de presas de poco volumen y para la reparación de éstas, se elaboró un programa de investigación con el objeto de proporcionar información orientada a conocer los atributos del CCR e identificar las posibles aplicaciones en nuestro país. Esta investigación fue desarrollada en los laboratorios de Estructuras y Geotecnia del CISMID de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde se hizo uso del método por Compactación de Suelos para el diseño de la mezcla CCR y se desarrollaron ensayos para determinar varias de sus propiedades. En los Laboratorios de Ensayos de Materiales y de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería se determinaron las características de los agregados utilizados en el diseño. La metodología seguida en esta investigación para realizar el diseño de la proporción de mezclas de Concreto Compactado con Rodillo por el método de compactación de suelos, es mostrada en la Figura N° 4.1.

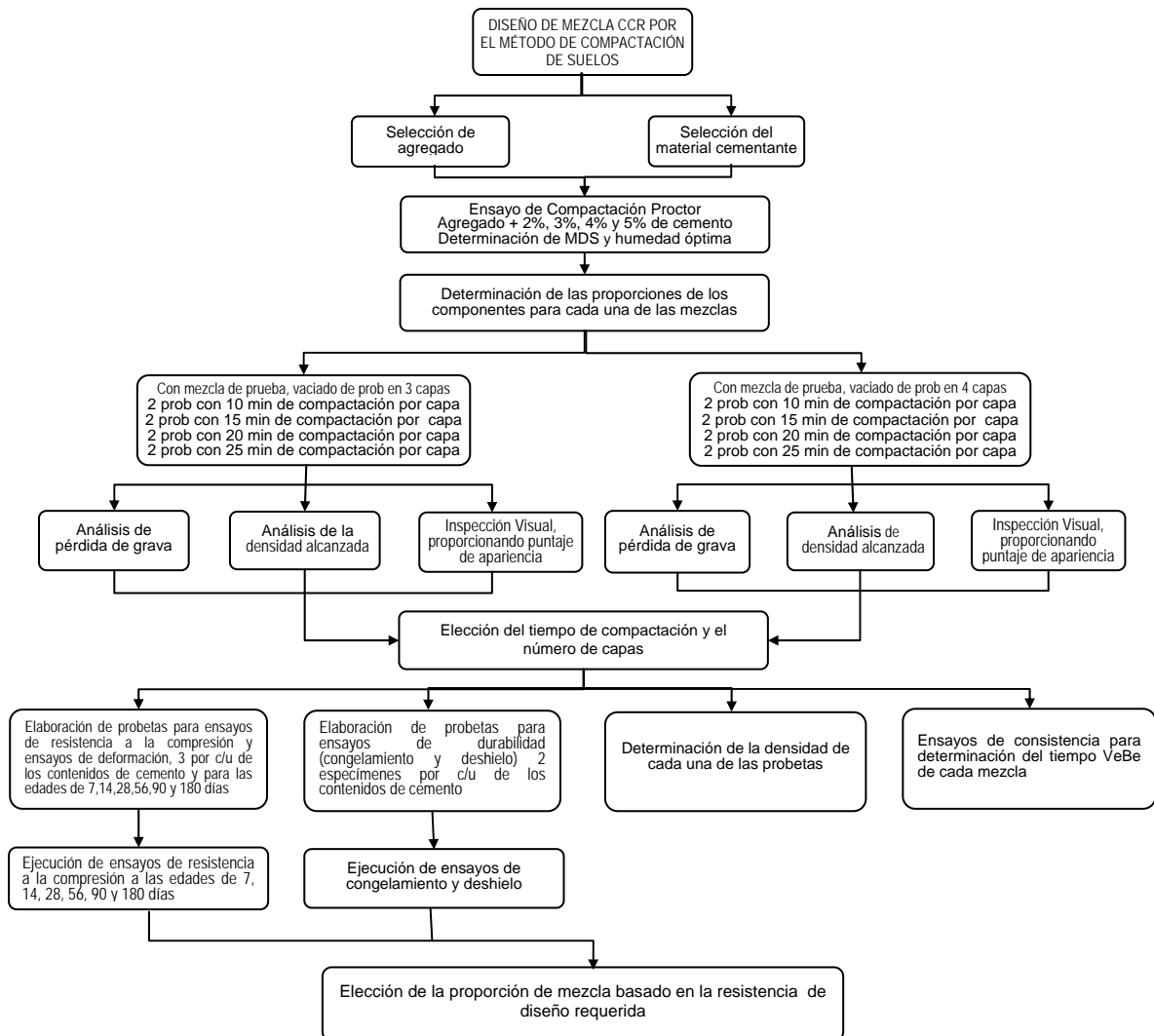


Figura N° 4.1 Diagrama que muestra los procedimientos seguidos en la investigación

4.2.1 SELECCIÓN DE AGREGADOS

La selección y el control de granulometría de los agregados son factores importantes que influyen en la calidad y propiedades del CCR. Los agregados usados en la investigación reunieron los requerimientos de calidad de la Norma ASTM C 33, aplicada para agregados de concreto. En el Anexo I se muestran los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a los agregados. En el Cuadro N° 4.1 se resumen las propiedades físicas de los agregados, obtenidas mediante los distintos ensayos de laboratorio.

Cuadro N° 4.1 Propiedades físicas del agregado utilizado en la investigación

Ensayo de laboratorio	Resultado de ensayo
Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso ASTM C 127	
Gravedad Específica	2,69
Absorción	0,81 %
Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino ASTM C 128	
Gravedad Específica	2,68
Absorción	0,65 %
Abrasión de los Ángeles ASTM C 131	17,40 %
Durabilidad con Sulfato de Sodio ASTM C 88	
Agregado Grueso	4,024 %
Agregado Fino	2,796 %
Límites de Consistencia ASTM D 4318	
Límite Líquido	20,23 %
Límite Plástico	NP

La granulometría de los agregados ha sido seleccionada siguiendo los lineamientos propuestos por Choi y Groom (2001), y es mostrada en el Cuadro N° 4.2 y la Figura N° 4.2. Esta granulometría se mantuvo constante para todas las proporciones de mezcla.

Choi y Groom (2001), han propuesto usar esta granulometría para el agregado del CCR, especialmente para proyectos de tamaño pequeño a mediano, tal como el utilizado en la protección de terraplenes, donde el presupuesto para gastos de investigación de campo y ensayos de los agregados es limitado.

Cuadro N° 4.2 Granulometría de los agregados utilizados en el diseño de las mezclas CCR

Tamaño de tamiz	Porcentaje que pasa por peso		
	Granulometría deseada		Presente trabajo
	Límite menor	Límite mayor	
38 mm (1,5 pulg)	100	100	100
25 mm (1,0 pulg)	90	100	90,37
N° 4	35	60	48,95
N° 40	15	30	19,80
N° 200	5	10	10,82

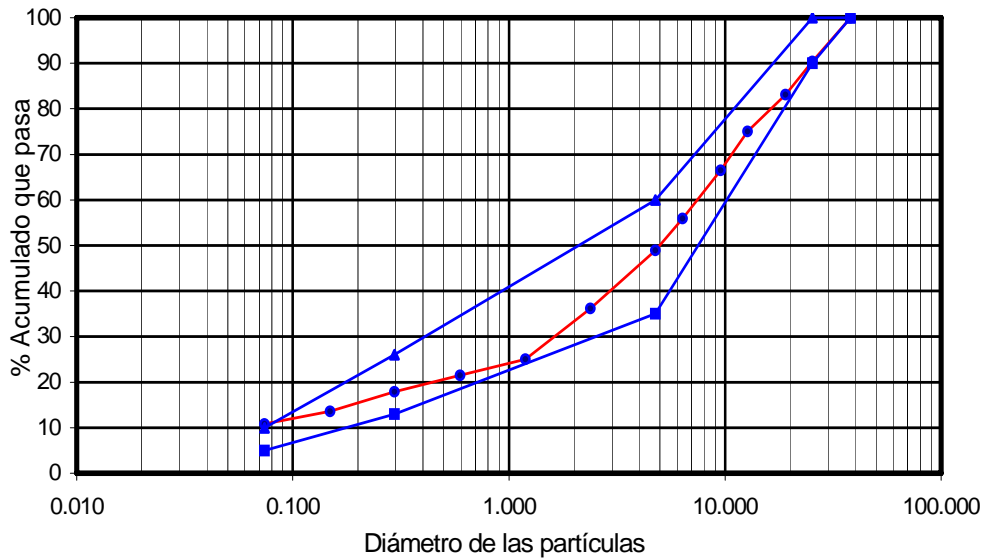


Figura N° 4.2 Curva granulométrica de agregados a utilizar en el diseño de las mezclas CCR

En la figura se puede observar que la cantidad de finos es ligeramente mayor que la especificada por los husos granulométricos, sin embargo los agregados fueron considerados apropiados para ser utilizados en el diseño.

4.2.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL CEMENTANTE

Después que el agregado y la granulometría son seleccionados, el siguiente paso es determinar la cantidad de cemento a usar en las mezclas de prueba. En el enfoque de suelos, los materiales cementantes son generalmente expresados como un porcentaje del peso seco del agregado. Además, con el material cementante especificado de esta manera, las mezcladoras usadas para la mezcla de CCR pueden ser fácilmente calibradas durante la construcción.

Los tipos de cementos 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 utilizados de cemento fueron de 2, 3, 4 y 5%, con respecto al peso seco de los agregados.

4.2.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

El siguiente paso es estimar el contenido de humedad a usarse en la preparación de las probetas de CCR. En mecánica de suelos y en el enfoque de suelos, el contenido de humedad es expresado como un porcentaje del peso seco total de los materiales.

La base de selección de un adecuado contenido de humedad es la clásica relación para suelos humedad - densidad, haciendo uso del ensayo de compactación Proctor Modificado (ASTM D 1557). Este ensayo ha sido usado para determinar relaciones humedad-densidad y para trabajos de diseño de mezclas, debido a que el esfuerzo de compactación del Proctor Modificado se correlaciona mejor con el producido por el equipo de máxima compactación de campo.

Para la determinación del contenido de agua a utilizar en la elaboración de las probetas de CCR, se realizó un ensayo Proctor Modificado para cada una de las mezclas de prueba, los puntos del contenido de humedad-peso unitario seco se graficaron y se trazó una curva uniforme a través de ellos. El pico de esta curva dió el máximo peso unitario seco y el óptimo contenido de humedad (OCH) que se usó para determinar la proporción de todos los componentes de cada una de las mezclas de CCR. Debido al tamaño máximo del agregado se usaron los moldes más grandes del Proctor (152 mm de diámetro en lugar de 102 mm).

Se tuvo en consideración que debido a la hidratación del cemento, los contenidos de humedad no pudieron ser determinados exactamente mediante el secado en horno, por lo que fue necesario hacer correcciones y usar contenidos de humedad calculados en base a la masa seca de los sólidos del diseño de mezcla.

Los resultados obtenidos en los ensayos Proctor Modificados para cada una de las mezclas, con las diferentes proporciones de cemento, son mostradas en el Cuadro N° 4.3 y en las Figuras N° 4.3 y 4.4.

Cuadro N° 4.3 Resultados obtenidos en los ensayos Proctor Modificado (ASTM D 1557) realizados con cada una de las mezclas

PROCTOR N°	Tipo de cemento usado	cemento (% en peso)	OCH %	MDS gr/cm ³
1	SIN CEMENTO	-	5,7	2,271
2	PORTLAND TIPO I (SOL)	2	6,6	2,278
3		3	6,7	2,276
4		4	6,6	2,255
5		5	6,7	2,253
6	PUZOLÁNICO TIPO IP (ATLAS)	2	6,6	2,276
7		3	6,7	2,261
8		4	6,6	2,277
9		5	6,7	2,274

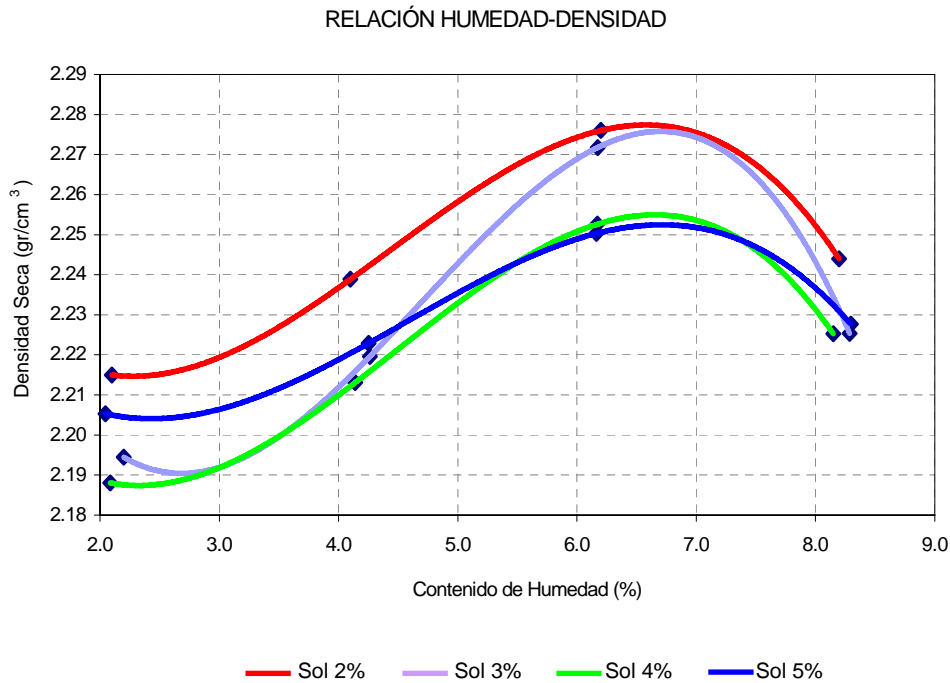


Figura N° 4.3 Curvas obtenidas mediante los ensayos Proctor Modificado realizados con las mezclas de agregado y diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I

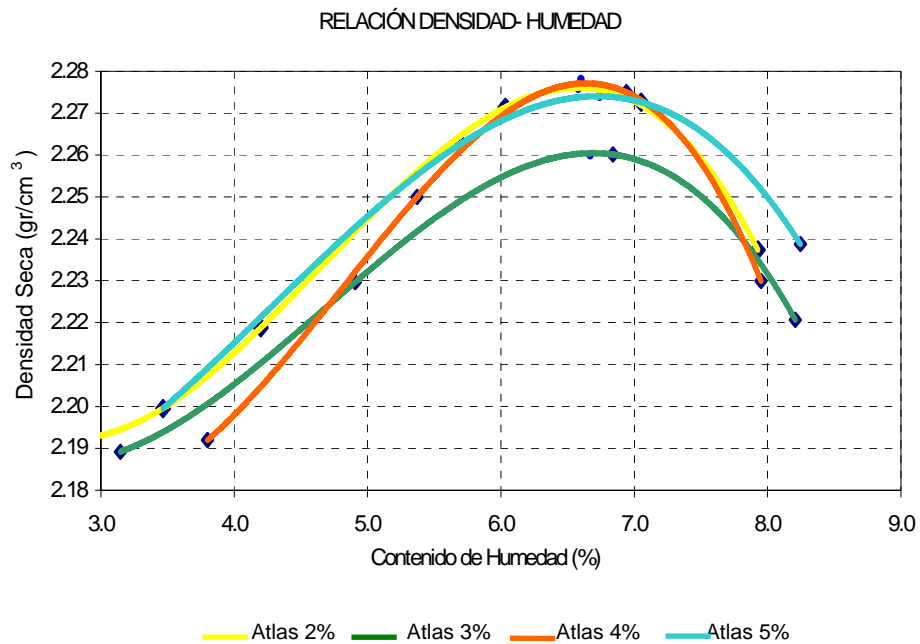


Figura N° 4.4 Curvas obtenidas mediante los ensayos Proctor Modificado realizados con las mezclas de agregado y diferentes proporciones de cemento Puzolánico Tipo IP

Según sus características, las curvas de compactación no parecen ser muy sensibles a la variación del contenido de cemento. Las máximas densidades secas de las

mezclas varían en menos de 2% y los óptimos contenidos de humedad en 0,1%. Estos resultados confirman los encontrados por Wong, Bischoff y Johnson (1988), donde se indica que la demanda de agua, para un agregado específico, muestra muy poco cambio ante un amplio rango del contenido de material cementante.

4.2.4 DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA

Una vez calculado el óptimo contenido de agua, se determina la proporción de todos los componentes, como sigue:

$$P = P_w + P_s + P_c + P_f \quad (1)$$

Siendo P el total del peso de la mezcla (en el molde de volumen V) después de la compactación, P_w el peso del agua, P_s el peso seco de los agregados, P_c el peso del cemento y P_f el peso de la ceniza fina o puzolana (si se utilizase).

El óptimo contenido de humedad, basado en el total de masa de los sólidos, está dado por:

$$w = \frac{P_w}{P_s + P_c + P_f} \quad (2)$$

Por otro lado, el peso del material cementante ($P_c + P_f$) está establecido para la dosificación como un porcentaje de la masa seca del agregado:

$$P_c + P_f = \frac{n}{100} P_s \quad (3)$$

Resolviendo las ecuaciones (1), (2) y (3) se obtiene la proporción de cada componente existente en el volumen V del molde, el cual puede ser convertido para el volumen de 1 m^3 .

Como los agregados tienen un contenido inicial de agua w_i , antes de la medición, el peso total del agregado P_t debe ser:

$$P_t = P_s (1 + w_i)$$

Siguiendo los pasos anteriormente descritos, se obtuvo la cantidad de material a utilizar en cada una de las mezclas. Un resumen de estas cantidades es dado en el Cuadro N° 4.4.

Cuadro N° 4.4 Cantidad de material a utilizar en cada una de las mezclas CCR

Tipo mezcla	Cemento	Cemento (% en peso)	Cantidad de material por m ³ 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

4.2.5 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS Y EL TIEMPO DE COMPACTACIÓN

Definidas las proporciones a utilizar en las diversas mezclas CCR, se procedió a determinar el tiempo de compactación y el número de capas apropiadas a ser empleadas en la elaboración de las probetas CCR.

Se elaboraron probetas de 6 pulg de diámetro por 12 pulg de altura con una mezcla CCR de prueba, utilizando 3% de cemento Portland Tipo I. La compactación se realizó con un martillo eléctrico Hilti, al cual se le adaptó en el extremo un disco plano de diámetro ligeramente menor al de la probeta. El proceso de compactación se efectuó en tres y cuatro capas, utilizándose los tiempos de 10, 15, 20 y 25 segundos para cada una de las capas.

Una vez que se elaboraron las probetas, se calculó su densidad o peso unitario, dividiendo el peso (masa) entre el volumen del espécimen; posteriormente se realizó una inspección ocular de cada una de ellas, proporcionándole un puntaje de apariencia, basado en los criterios indicados en el Cuadro N° 4.5.

Cuadro N° 4.5 Puntaje de apariencia para testigos de CCR (Nagayama, Watanabe y Niitaka, 1995)

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

La densidad de cada una de las probetas preparadas con la mezcla de prueba y su respectivo puntaje de apariencia son mostrados en el Cuadro N° 4.6.

Cuadro N° 4.6 Puntaje de apariencia y densidad de probetas de prueba, obtenidos después de la compactación

N° probeta	Características de compactación		Puntaje de apariencia	Densidad húmeda gr/cm ³	Densidad seca gr/cm ³	Promedio densidad seca gr/cm ³
	N° capas	Tiempo de compactación por capa (seg)				
1	3	10	3	2,442	2,293	2,293
2				2,442	2,293	
3		15	3	2,483	2,331	2,314
4				2,447	2,297	
5		20	4	2,474	2,323	2,309
6				2,444	2,295	
7		25	4	2,478	2,327	2,326
8				2,477	2,326	
9	4	10	3	2,462	2,311	2,310
10				2,459	2,309	
11		15	4	2,444	2,295	2,301
12				2,457	2,307	
13		20	4	2,469	2,318	2,309
14				2,448	2,299	
15		25	5	2,475	2,324	2,321
16				2,470	2,319	

A pesar que algunas probetas presentaron una muy buena apariencia en su superficie, se observó que se había generado la rotura de agregados durante el proceso de compactación que podrían tender a debilitar el espécimen. Por tal motivo, se desarrollaron ensayos de granulometría del material de cada uno de las probetas, antes y después de la compactación, determinando de este modo la cantidad de agregado grueso averiado durante el proceso. El porcentaje de partículas rotas en cada uno de las probetas es mostrado en el Cuadro N° 4.7.

Cuadro N° 4.7 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
PARTÍCULAS ROTAS		3,831	3,625	4,188	10,92	3,473	3,968	6,585	15,448

* 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 las probetas, 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.

4.2.6 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. Se utilizaron moldes metálicos partidos para facilitar el desmolde y un collar de extensión de 2 pulg de altura para permitir la compactación de la última capa y nivelar la superficie superior del espécimen después de la compactación.

Todas las probetas fueron preparadas usando las dosificaciones por peso de cada uno de los componentes dados en el Cuadro N° 4.3. Los materiales en la proporción requerida y el agua correspondiente al óptimo contenido de humedad fueron mezclados en una mezcladora de 1,50 m³ de capacidad. Para garantizar la adecuada mezcla de los materiales, los agregados y el cemento fueron mezclados inicialmente por 2 minutos, luego de este tiempo se adicionó el agua y se procedió a mezclar por otros 5 minutos.

Las probetas se elaboraron vaciando la mezcla en cuatro capas, cada capa se compactó con el martillo Hilti por un tiempo de 15 segundos, realizando un rallado entre capa y capa para facilitar la adherencia entre ellas. Una vez elaboradas las probetas se obtuvo su peso unitario, basado en el volumen de los moldes metálicos.

Con cada una de las mezclas preparadas, se realizaron Ensayos VeBe con la finalidad de medir la consistencia de la mezcla, en concordancia con la norma ASTM C 1170.

Para cada tipo de mezcla y para las edades de ensayo de 7, 14, 28, 56 y 90 días se prepararon 3 cilindros CCR. Para la edad de ensayo de 180 días se prepararon 2 probetas para cada tipo de mezcla CCR.

Curado de los especímenes: Después de aproximadamente 18 horas de vaciadas las probetas se procedieron a desmoldar, se cubrieron con bolsas plásticas y luego se colocaron en una cámara húmeda con temperatura y humedad controlada (23 °C ± 2 °C y 95% ± 5%). Los especímenes fueron mantenidos en la cámara de curado hasta un día antes del ensayo.

4.2.7 PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES PARA ENSAYOS DE DURABILIDAD DEL CCR

Para el CCR que se expondrá a ciclos de congelamiento-deshielo o humedecimiento-secado, se recomienda que se realicen ensayos de 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 de Congelamiento-Deshielo, ASTM D 560
- Ensayo de Humedecimiento-Secado, ASTM D 559

Los especímenes para estos tipos de ensayo son usualmente preparados en moldes de 4 pulg (102mm) de diámetro por 4,6 pulg (117mm) de altura, usando el procedimiento del Proctor estándar, y como tal, los resultados son usualmente extremadamente conservadores por dos razones. Primero, la densidad del espécimen es generalmente más baja que la densidad de campo, y segundo, las partículas de agregado más grandes que el tamiz N° 4 (5mm) son removidas del espécimen.

Para evitar todos estos inconvenientes, la preparación de los especímenes para el ensayo de durabilidad se realizó siguiendo la recomendación dada por Choi y Groom (2001), que consistió en cortar en dos mitades un cilindro estándar de 6 pulg (152 mm) de diámetro por 12 pulg (304 mm) de altura, y luego partir a lo largo la mitad del cilindro, tal como se muestra en la Figura N° 4.5. El ensayo de durabilidad fue desarrollado en el espécimen dividido de 6 pulg (152mm) de diámetro por 6 pulg (152 mm) de altura. Para cada tipo de mezcla investigada se prepararon dos especímenes.

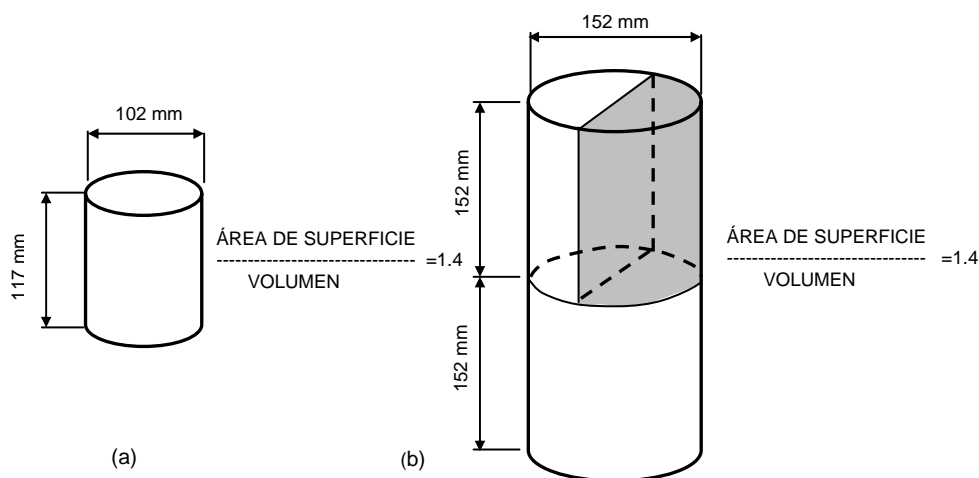


Figura 4.5 Tamaño de especímenes propuestos para ensayos de durabilidad (a) Especimen estándar de ensayo de durabilidad (suelo-cemento); (b) Especimen propuesto para ensayo de durabilidad de CCR (Choi y Groom, 2001)

Este procedimiento propuesto tiene las siguientes ventajas:

- Los especímenes ensayados deberán tener densidades similares a las de los cilindros para resistencia, y de esta manera se eliminaría el innecesario conservatismo que es establecido en la práctica común.
- La misma relación de superficie área/volumen (o superficie específica) de 1,4 similar al espécimen estándar de 4 pulg (102 mm) es mantenida.
- El costo de preparación del espécimen probablemente sería menor que en la práctica común, debido a que cuatro especímenes duplicados de durabilidad son producidos por aproximadamente el costo de hacer un cilindro estándar de resistencia.

Hansen y Lynch (1995), señalan que para materiales granulares el ensayo de congelamiento/deshielo es más severo que el ensayo de humedecimiento/secado, considerando que este último puede ser omitido del programa de ensayos de durabilidad si hay un presupuesto limitado para ensayos. Por tal motivo, en la presente investigación se consideró necesario realizar sólo el ensayo de congelamiento/deshielo para evaluar la durabilidad de cada una de las mezclas CCR preparadas.

4.2.8 SELECCIÓN FINAL DE LA PROPORCIÓN DE MEZCLAS

La selección de la proporción de mezcla de diseño está basada 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.
2. Los resultados de los ensayos de durabilidad son comparados con los límites permisibles para pesos perdidos causados por ciclos de congelamiento/deshielo y humedecimiento/secado. Dos juegos de límites aceptables son disponibles para especímenes de 7 días de edad después de 12 ciclos, como se muestra en el Cuadro N° 4.8.

Cuadro N° 4.8 : Límites de durabilidad permisibles

Agencia	Máximos límites permisibles (% 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.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión, las curvas trazadas con ellos y los resultados del ensayo de durabilidad son mostrados en el Capítulo V : Análisis y Discusión de los Resultados Obtenidos en los Ensayos de Laboratorio. Estos resultados permitirán la elección de la proporción de mezclas basado en la resistencia de diseño requerida.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

En la presente investigación se desarrollaron diversos ensayos para determinar distintas propiedades del CCR, entre ellas: consistencia, peso unitario, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y resistencia al congelamiento y deshielo. A continuación se indican los principales resultados obtenidos.

5.1 CONSISTENCIA

Los ensayos de consistencia son realizados con la finalidad de obtener la cantidad de agua necesaria para la mezcla CCR. Además de la determinación del contenido de agua mediante el método de densidad-humedad (típico para las mezclas con aproximación a suelos), se halló la consistencia de cada una de las mezclas mediante el ensayo VeBe, en concordancia con la norma ASTM C 1170. Mediante este ensayo se verificó que los valores de tiempo VeBe se encontraban dentro de los rangos especificados para este tipo de mezclas (de 45 segundos a más). En el Cuadro N° 5.1 se puede observar los tiempos VeBe obtenidos para cada una de las mezclas CCR investigadas.

Cuadro N° 5.1 Valores de tiempo VeBe obtenidos en cada una de las mezclas CCR investigadas

Mezcla	Tipo de cemento	Cemento (% en peso)	Tiempo Vebe (segundos)
I	Portland Tipo I	2	46
II	Portland Tipo I	3	51
III	Portland Tipo I	4	47
IV	Portland Tipo I	5	45
V	Puzolánico Tipo IP	2	49
VI	Puzolánico Tipo IP	3	50
VII	Puzolánico Tipo IP	4	48
VIII	Puzolánico Tipo IP	5	52

5.2 PESO UNITARIO

Una vez elaboradas cada una de las probetas con los diferentes tipos y proporciones de cemento utilizados, se obtuvo el peso unitario de cada una de ellas basados en el volumen de los moldes metálicos empleados. El peso unitario de cada una de las probetas se muestra en el Anexo II. Se pudo observar que los valores obtenidos son uniformes y la mayoría de ellos son superiores a 2400 Kg/m^3 , es decir mayores a los valores típicos del concreto convencional.

5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

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; estas probetas fueron preparadas utilizando cemento Portland Tipo I (Sol) y Puzolánico Tipo IP (Atlas), en proporciones de 2%, 3% 4% y 5% del peso seco de los agregados.

Los resultados obtenidos para cada ensayo son mostrados en el Anexo II y se han graficado en las Figuras N° 5.1 y 5.2. La uniformidad de los resultados para cada combinación de mezcla y edad, indican que la preparación de los cilindros en el laboratorio han recibido una uniforme dosificación, mezclado y compactación.

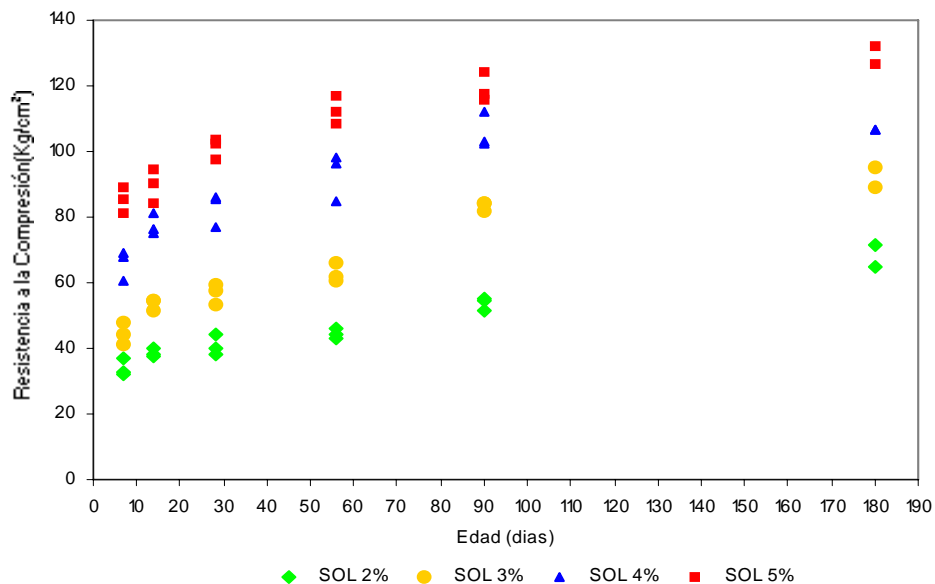


Figura N° 5.1 Resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I - Sol

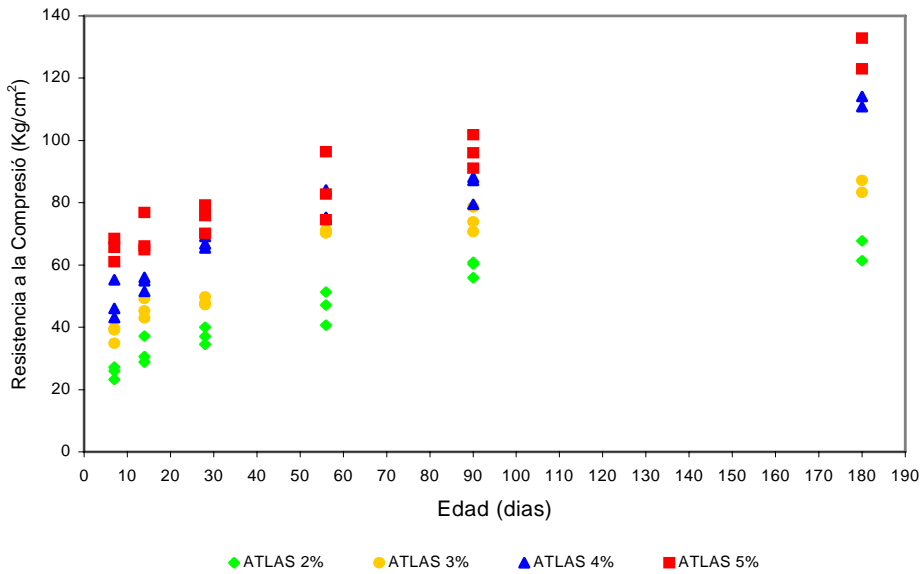


Figura Nº 5.2 Resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Pozolánico Tipo IP- Atlas

Relación entre la Resistencia a la Compresión y el Peso Unitario

La relación entre la resistencia a la compresión y el peso unitario es mostrada en las Figuras Nº 5.3 y 5.4. En ellas se observa que la resistencia a la compresión de las diversas mezclas no es sensible a los pequeños cambios en el peso unitario. No se ha encontrado la relación esperada donde las mezclas de menor peso unitario son las que alcanzarían una menor resistencia a la compresión.

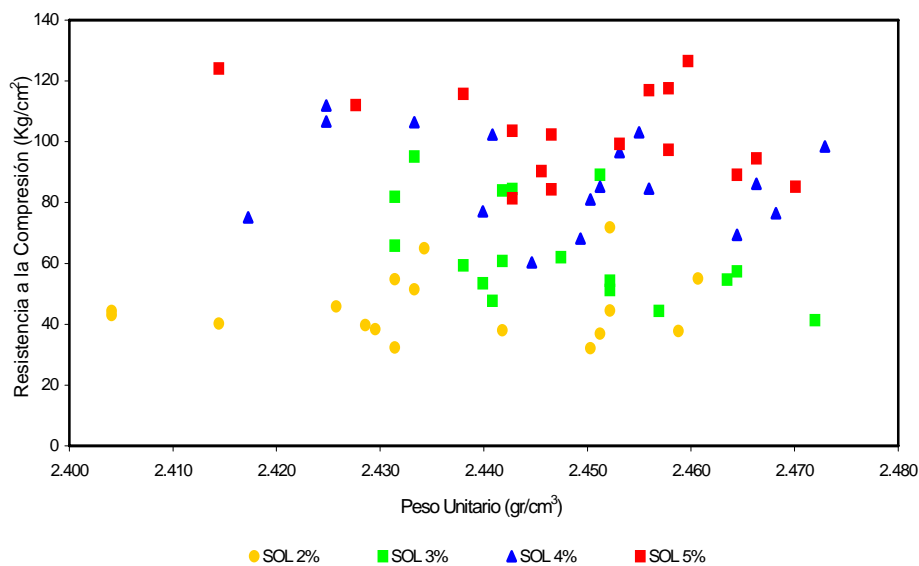


Figura Nº 5.3 Relación entre la resistencia a la compresión y el peso unitario en probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I - Sol

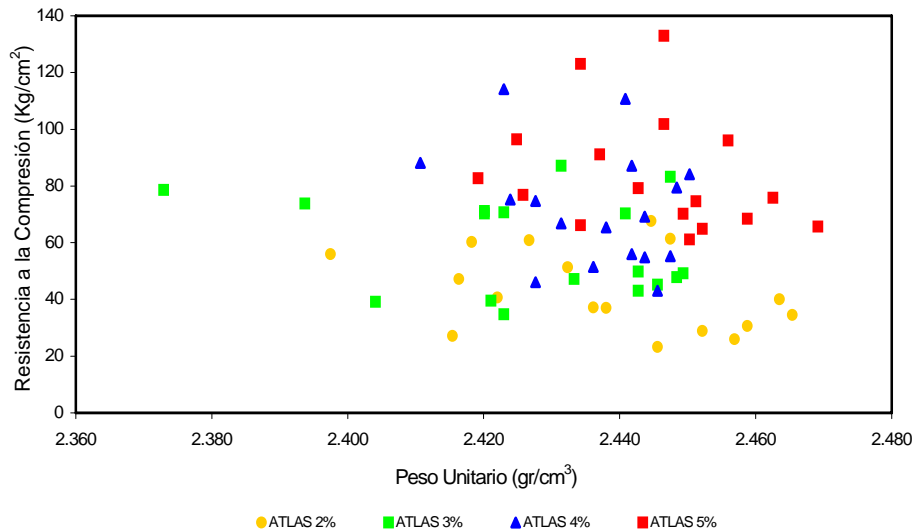


Figura N° 5.4 Relación entre la resistencia a la compresión y el peso unitario en probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Pozolánico Tipo IP - Atlas

Relación entre Resistencia a la Compresión, Edad de Curado y el Contenido de Cemento

El Cuadro N° 5.2 muestra el promedio de los resultados correspondientes a cada una de las mezclas en las diferentes edades de curado, obtenidos mediante el ensayo de resistencia a la compresión. Para las cinco primeras edades de curado, el dato indicado es el promedio obtenido del ensayo de tres especímenes; para los 180 días de edad de curado, el dato indicado es el promedio de dos especímenes.

Cuadro N° 5.2 Resumen de resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión en diferentes edades de curado

Tipo de cemento	Contenido de cemento (% en peso)	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)					
		7 días	14 días	28 días	56 días	90 días	180 días
Portland Tipo I	2	33,78	38,67	40,86	44,42	53,76	68,42
	3	44,42	53,42	56,72	62,91	83,49	92,15
	4	65,94	77,55	82,83	97,50	105,80	106,56
	5	85,20	89,70	101,10	112,61	119,09	129,39
Puzolánico Tipo IP	2	25,46	36,47	38,54	49,26	58,43	64,54
	3	37,87	45,83	48,30	70,71	74,40	85,21
	4	44,54	54,14	67,11	78,09	84,92	112,44
	5	65,08	69,32	75,07	89,58	96,33	127,97

Las Figuras N° 5.5 y N° 5.6 bosquejan gráficamente el desarrollo de la resistencia a la compresión a través del tiempo.

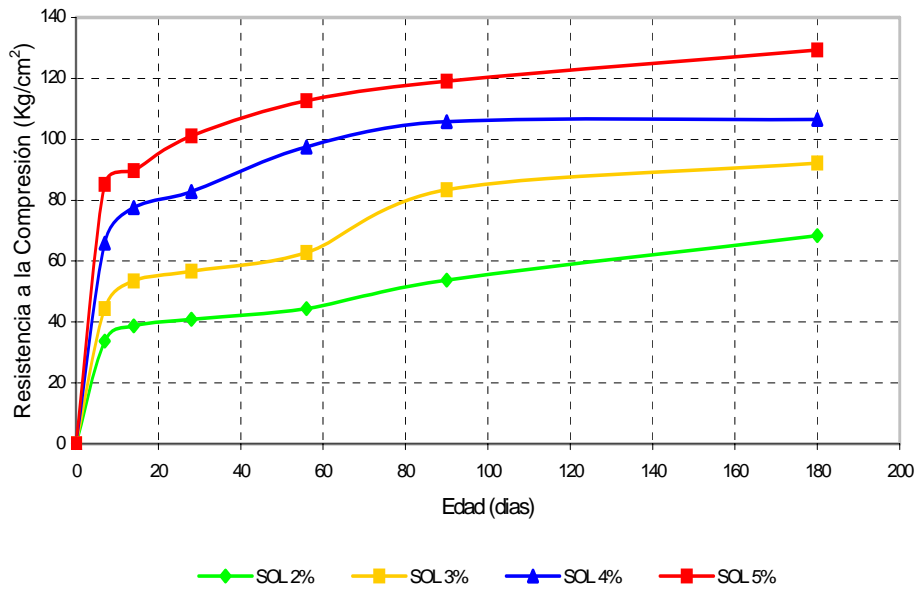


Figura Nº 5.5 Variación de la resistencia a la compresión en diferentes edades de curado para mezclas elaboradas con 2%, 3%, 4% y 5% de cemento Portland Tipo I - Sol

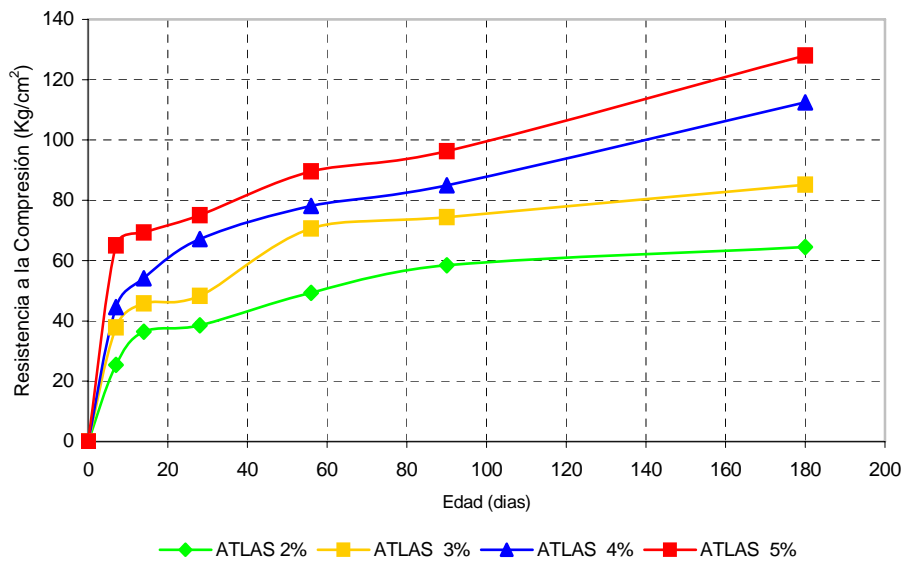


Figura Nº 5.6 Variación de la resistencia a la compresión en diferentes edades de curado para mezclas elaboradas con 2%, 3%, 4% y 5% de cemento Puzolánico Tipo IP - Atlas

Ambas figuras muestran la influencia de la edad de curado en la resistencia a la compresión. En los primeros 7 días, la mezcla de CCR conformada por cemento Portland Tipo I ganó aproximadamente el 81% de su resistencia a los 28 días, mientras que la mezcla de CCR conformado por cemento Puzolánico Tipo IP ganó el 74%. Después de los 180 días de curado, la resistencia a la compresión de los 28 días ha sido excedida en un 65% en el caso del uso de cemento Portland Tipo I (proporción

2 y 3%) y 28% para las proporciones de 4 y 5%. En el caso del uso del cemento Puzolánico Tipo IP, la resistencia a la compresión a los 28 días fue excedida en un 70%, apreciándose que la puzolana contribuye en la resistencia del CCR en las últimas edades.

Del mismo modo, se observa que la resistencia a la compresión del CCR se incrementa con el aumento del porcentaje de cemento. El óptimo contenido de agua continua siendo aproximadamente el mismo y la proporción agua/cemento decrece.

En la Figura N° 5.7 se bosquejan conjuntamente los resultados obtenidos con los diferentes tipos y proporciones de cemento utilizados en esta investigación, observándose el comportamiento de éstos a través del tiempo; se aprecia que los valores obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión de los especímenes fabricados con cemento Puzolánico Tipo IP siempre son menores que los obtenidos con los fabricados con cemento Portland Tipo I. En la figura se muestra que la mezcla con el cemento Puzolánico Tipo IP gana resistencia en un largo tiempo, de tal modo que a la edad de curado de 180 días los valores de resistencia obtenidos para ambos tipos de cemento son muy cercanos.

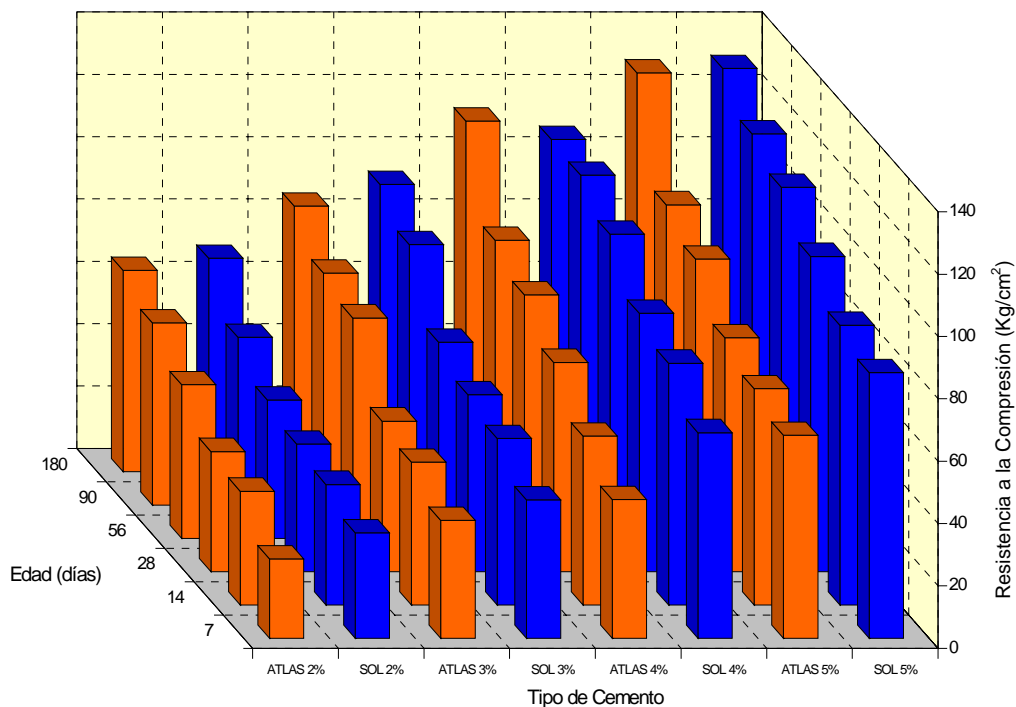


Figura N° 5.7 Resistencias a la compresión obtenidas en diferentes edades de curado para mezclas elaboradas con 2%, 3%, 4% y 5% de cemento Portland Tipo I y cemento Puzolánico Tipo IP

Los resultados conseguidos son muy alentadores debido a que las resistencias alcanzadas son altas, incluso utilizando el 2% de cemento se ha obtenido una

resistencia mayor a 50 Kg/cm² a la edad de 90 días de curado, esta resistencia es suficiente para el diseño de presas pequeñas; del mismo modo se ha verificado la mejora de las propiedades del CCR utilizando cemento Puzolánico Tipo IP, lo que permite proveer una mejor mezcla técnica y económicamente.

5.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD

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. Para eliminar los efectos de agrietamiento, la evaluación se realizó mediante un “módulo cuerda” desde la curva esfuerzo-deformación, con un primer punto en 0,00005 mm/mm de deformación.

$$E_c = \frac{0,4 \cdot f_c - \sigma_1}{\varepsilon(0,4 \cdot f_c) - \varepsilon_1}$$

Donde:

E_c = módulo elástico estático (Mpa)

f_c = resistencia a la compresión última (Mpa)

ε = deformación axial (mm/mm)

ε_1 = 0,00005 (mm/mm)

σ_1 = esfuerzo correspondiente a ε_1

Para cada uno de los ensayos se trazó una curva esfuerzo - deformación, del análisis de cada una de ellas se obtuvo el respectivo módulo de elasticidad. Estas curvas son mostradas en el Anexo II, en cada una de ellas se indica el porcentaje de cemento utilizado en la mezcla, la edad de ensayo y la resistencia a la compresión donde se detuvo la medida de la deformación. Se debe indicar que la resistencia indicada en el ensayo no es la última, debido a que el control de la deformación en la mayoría de las probetas tuvo que ser paralizado antes de llegar a la carga última, por restricciones en el límite máximo de deformación que podía ser medido con el equipo de laboratorio utilizado.

Las Figuras N° 5.8 y 5.9 muestran los valores del módulo de elasticidad obtenidos en cada una de las probetas ensayadas. Se puede apreciar la variabilidad de resultados en probetas de la misma edad de curado y del mismo tipo de cemento, especialmente en las primeras edades. Esta variación pudo deberse a la poca resistencia de estas

probetas, lo que ocasionó que se presentaran dificultades en la fijación de los anillos utilizados en la medida de deformación.

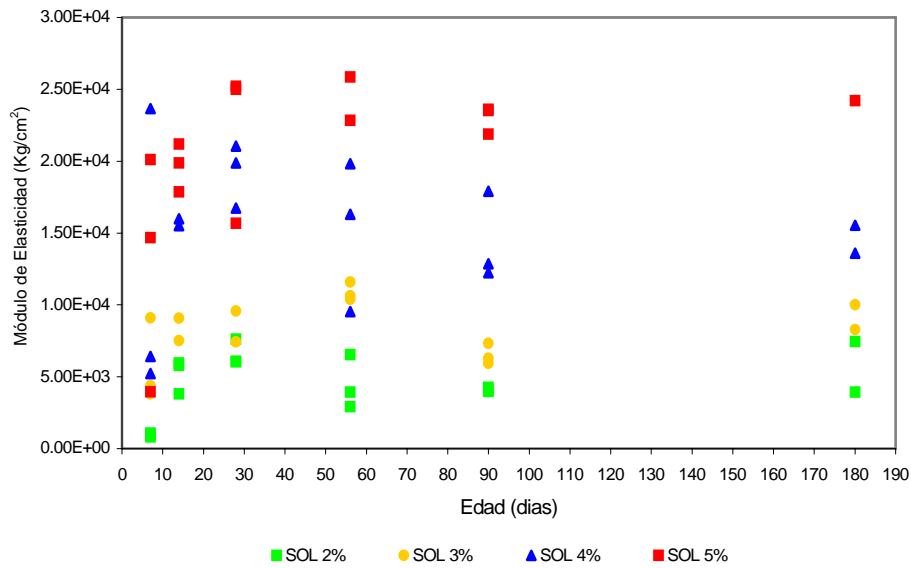


Figura N° 5.8 Módulos de elasticidad de probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I - Sol

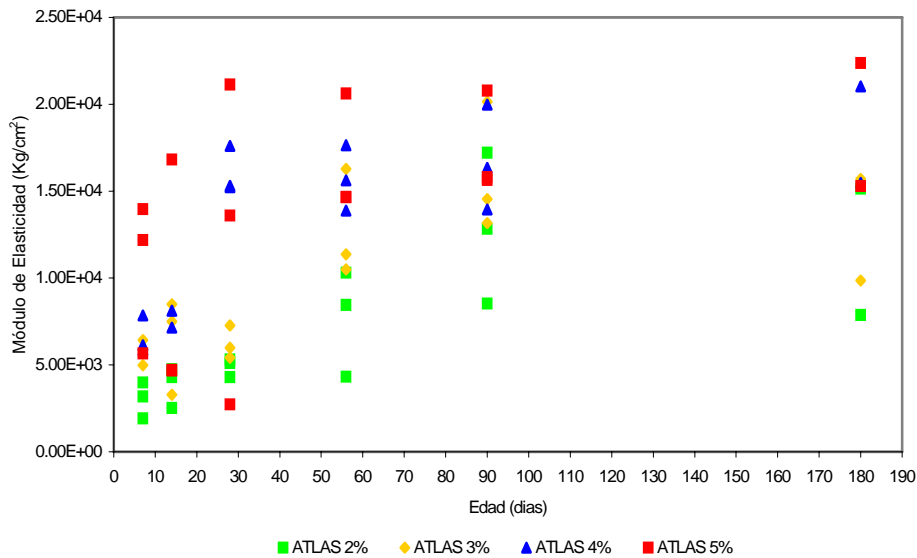


Figura N° 5.9 Módulos de elasticidad de probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Pozolánico Tipo IP - Atlas

Relación entre el Módulo de Elasticidad, Edad de Curado y el Contenido de Cemento

El Cuadro N° 5.3 muestra el promedio de resultados correspondientes a cada una de las mezclas en diferentes edades de curado, obtenidos mediante el ensayo de módulo de elasticidad.

Cuadro N° 5.3 Resumen de resultados obtenidos en el ensayo de módulo de elasticidad en diferentes edades de curado

Tipo de Cemento	Contenido de cemento (% en peso)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)					
		7 días	14 días	28 días	56 días	90 días	180 días
Portland Tipo I	2	952	5186	6577	4467	4102	5684
	3	5770	8290	8497	10868	6521	9146
	4	5811	15759	19215	18070	14336	14573
	5	17397	19648	21962	24347	23002	24200
Puzolánico Tipo IP	2	3028	3856	4900	7695	15021	15154
	3	5747	6423	6221	12713	15957	15710
	4	6610	7631	16051	15712	16752	18250
	5	10610	16810	17366	16651	17413	18836

Para analizar el comportamiento del Módulo de Elasticidad a través de las distintas edades de curado, se ha graficado en las Figuras N° 5.10 y 5.11 el promedio de los módulos indicados en el cuadro anterior con sus respectivas edades de curado.

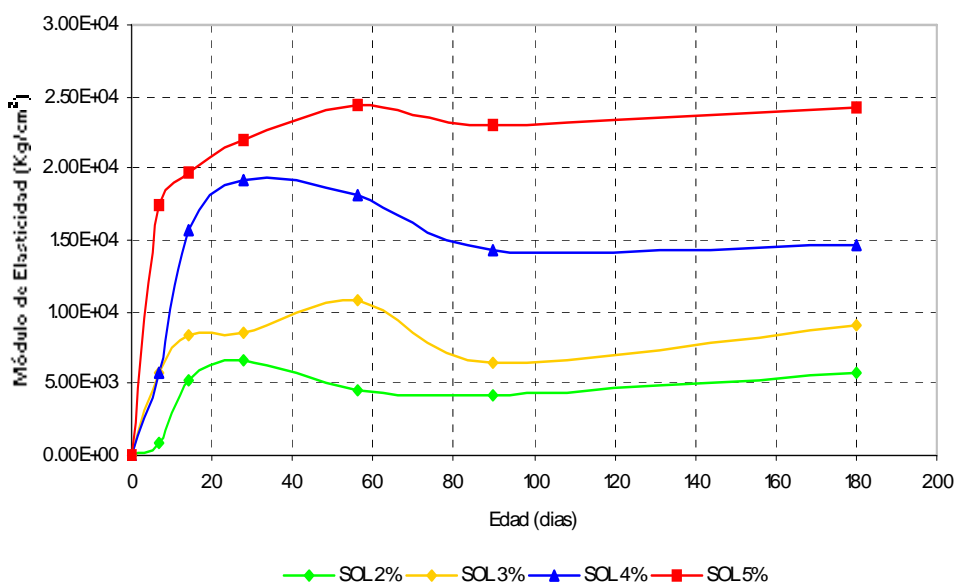


Figura N° 5.10 Variación del módulo de elasticidad en diferentes edades de curado para mezclas elaboradas con 2%, 3%, 4% y 5% de cemento Portland Tipo I - Sol

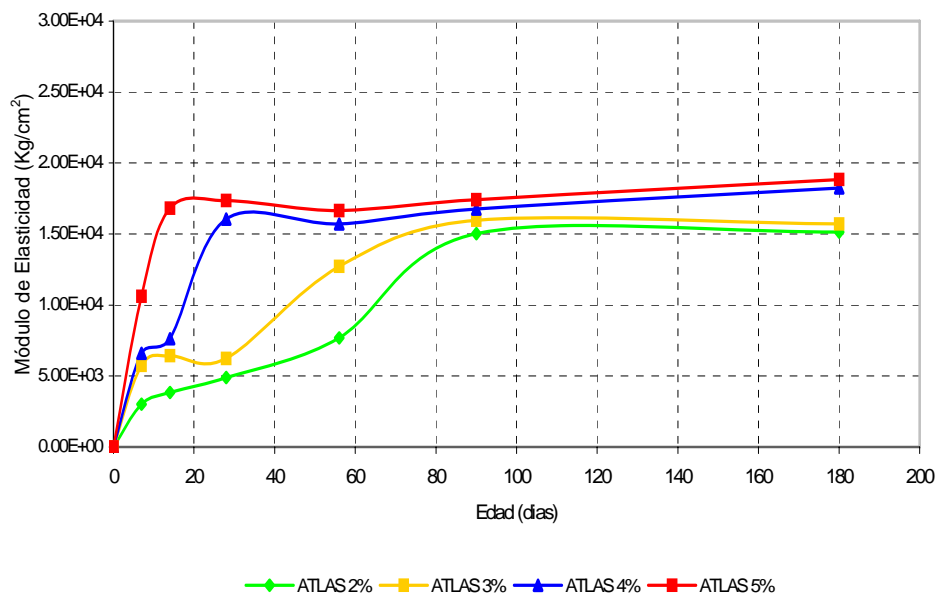


Figura N° 5.11 Variación del módulo de elasticidad en diferentes edades de curado para mezclas elaboradas con 2%, 3%, 4% y 5% de cemento Puzolánico Tipo IP - Atlas

Las Figuras muestran que el valor del módulo de elasticidad aumenta a medida que el contenido de cemento se incrementa. Del mismo modo, existe un aumento con la edad de curado, aunque éste no es constante, observándose algunas subidas y bajadas en algunas mezclas debido principalmente a la variación de resultados obtenidos en algunos especímenes con similar edad de curado. A partir de la edad de 56 días el valor del módulo se mantiene aproximadamente constante, variando en pequeños porcentajes.

Para comparar los valores del módulo de elasticidad de las mezclas, se presentan en la Figura N° 5.12 los resultados obtenidos con los diferentes tipos y proporciones de cemento utilizados en esta investigación, observándose el comportamiento de éstos a través del tiempo. Se aprecia que, a edades avanzadas, los módulos de elasticidad de los especímenes fabricados con 2%, 3% y 4% de cemento Portland Tipo I, son menores que los obtenidos con la misma proporción de cemento Puzolánico Tipo IP; en el caso de usar 5 % este comportamiento se invierte. Es notoria también, una gran variedad en el comportamiento de los módulos elásticos a edades tempranas, esto pudo deberse a que las probetas con bajo contenido de cemento mostraron una baja resistencia en las primeras edades de curado, ocasionando dificultades y posibles errores en la medida de la deformación.

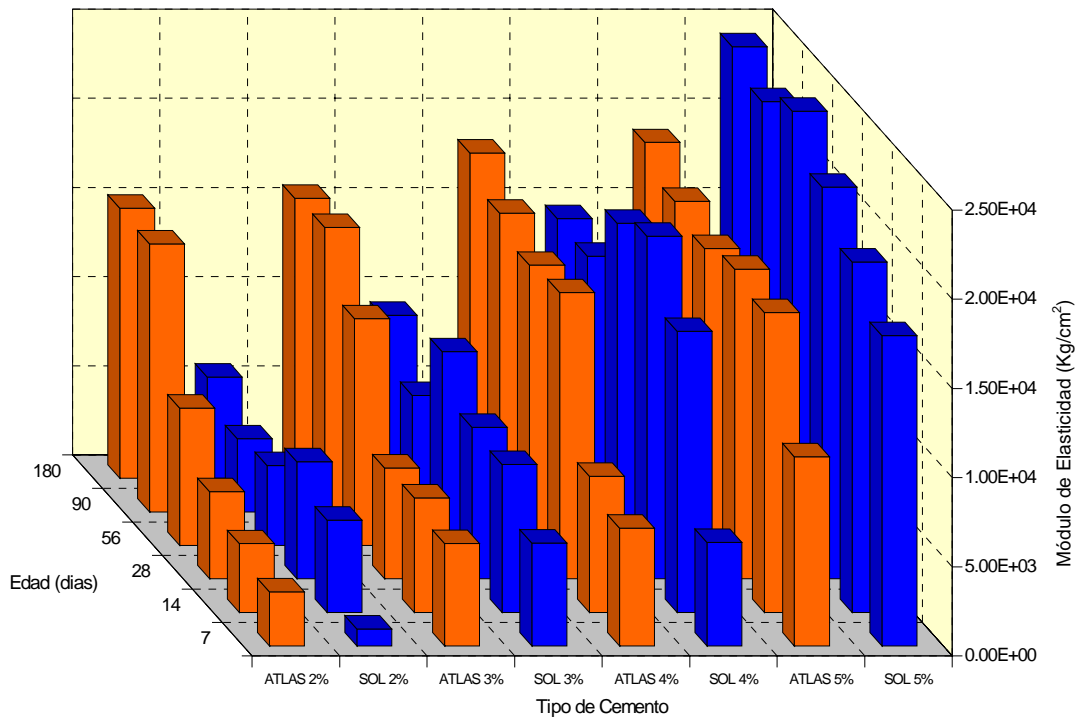


Figura N° 5.12 Módulos de elasticidad obtenidos en diferentes edades de curado para mezclas elaboradas con 2%, 3%, 4% y 5% de cemento Portland Tipo I y cemento Puzolánico Tipo IP

Relación entre el Módulo de Elasticidad y la Resistencia a la Compresión

La relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión es mostrada en las Figuras N° 5.13 y 5.14, en ellas se observa que en términos generales hay una relación directa entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión, es decir mientras mayor es la resistencia, mayor será el módulo de elasticidad.

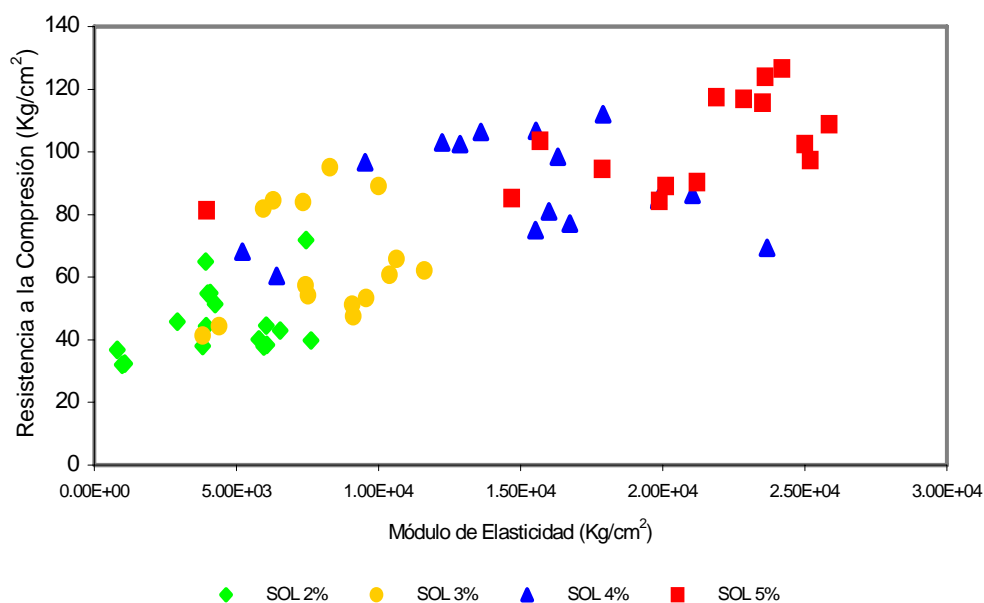


Figura N° 5.13 Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión en probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Portland Tipo I - Sol

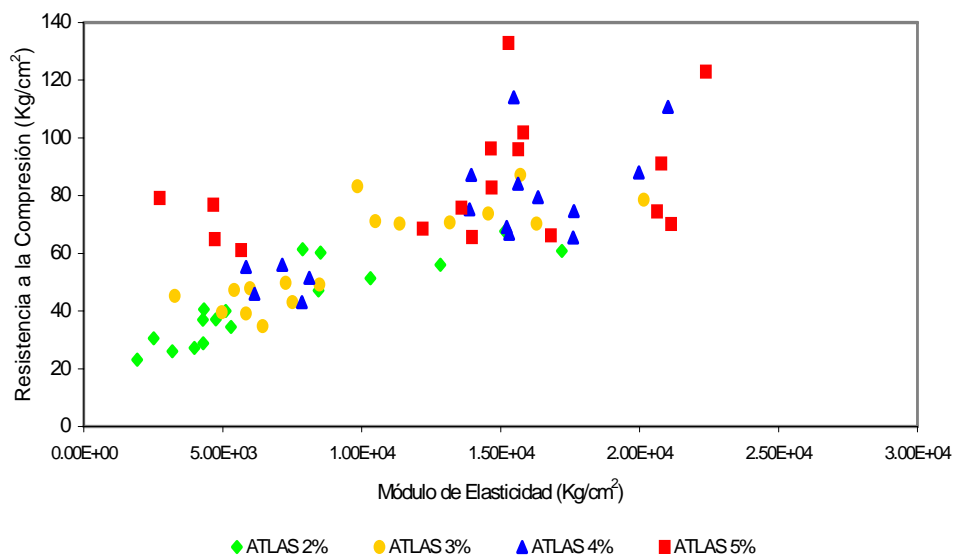


Figura N° 5.14 Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión en probetas fabricadas con diferentes proporciones de cemento Pozolánico Tipo IP-Atlas

Luego de analizar los resultados obtenidos mediante este ensayo, se ha verificado que los módulos de elasticidad de las mezclas CCR son mucho menores que los desarrollados en mezclas de concreto comunes. Esto significa que las mezclas CCR son menos frágiles y menos susceptibles al agrietamiento, mostrándose este comportamiento con ambos tipos de cemento investigados. Estos valores obtenidos servirán de guía del comportamiento de este material para otros cálculos y evaluar el uso del CCR en diferentes proyectos. El conocimiento del módulo de elasticidad, especialmente en las primeras edades de curado, permitirá la predicción del agrietamiento debido a los esfuerzos termales generados en el CCR.

5.5 DURABILIDAD ANTE EL CONGELAMIENTO Y DESHIELO

El ensayo de durabilidad al desgaste por congelamiento/deshielo fue realizado en concordancia con la norma ASTM D 560. Las probetas para el ensayo se elaboraron siguiendo los pasos indicados en el ítem 4.2.7 del Capítulo IV, sometiéndose al ensayo dos especímenes por cada tipo y proporción de cemento. Los resultados obtenidos después de los 12 ciclos de congelamiento y deshielo, son mostrados en el Cuadro N° 5.4.

Cuadro N° 5.4 Pérdida total promedio de CCR después de realizado el ensayo de durabilidad ante el congelamiento y deshielo

Tipo de cemento	Contenido de cemento (% en peso)	Pérdida total promedio (%)
Portland 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

Las Fotos N° 36, 37 y 38 en el Anexo III ilustran el estado final de los bloques ensayados después de los doce ciclos de congelamiento y deshielo. Los resultados indican claramente que la durabilidad ante el congelamiento y deshielo es mayor cuando el contenido de cemento en los especímenes es incrementado. Se puede observar que los especímenes con 2% de cemento son los que han presentado mayores pérdidas, especialmente el que fue elaborado con cemento Puzolánico Tipo IP; los especímenes con 5% de cemento presentaron pérdidas mínimas.

Al analizar los resultados obtenidos, se tiene que la durabilidad ante el desgaste de congelamiento y deshielo de las 8 mezclas ensayadas puede ser considerada como buena, debido a que el porcentaje de pérdida máximo es menor que 4.8%, este valor está por debajo de los límites permitidos mostrados en el Cuadro N° 4.8.

5.6 SELECCIÓN 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 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 de las Figuras N° 5.5 y 5.6, 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 a 2% del contenido de material cementante.

El diseño de mezclas inicial deberá ser confirmado en el campo durante la construcción usando una sección de prueba de CCR, construida con los agregados, el material cementante y los equipos a usar en el sitio.

CAPÍTULO VI

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.
- Es necesario hacer notar que el CCR puede ser usado en muchas estructuras diferentes a las presas, aunque el mismo nombre es usado en todos los casos y las características esenciales son las mismas, existen diferencias, algunas de ellas considerables, entre los varios usos. Esta tesis está relacionada únicamente al CCR para uso en presas.
- En el desarrollo de la metodología de diseño de mezclas CCR han surgido dos filosofías: la Filosofía de Suelos o Geotécnica y la Filosofía de Concreto, dependiendo del tratamiento que se le ha dado al agregado. No es el propósito de esta tesis juzgar cual filosofía es mejor, debido a que ambas han funcionado satisfactoriamente. Típicamente el diseñador que está más familiarizado a trabajos con ensayos geotécnicos, seleccionará la Filosofía de Suelos. La presente tesis describe los principios, metodologías y características únicas de esta filosofía para el diseño de mezclas.
- La Filosofía de Suelos para proporcionamiento de mezclas de Concreto Compactado con Rodillo, considera al CCR como un agregado enriquecido con cemento, compactado a su máxima densidad. La densidad del CCR es determinada para al menos cuatro diferentes contenidos de humedad usando ensayos de compactación de laboratorio Proctor Modificado, lo que permite el cálculo de la máxima densidad seca y el contenido de humedad óptimo a utilizar en la mezcla CCR.
- La propuesta del diseño de mezcla de CCR utilizando Conceptos de Compactación de Suelos es simple y está basada en procedimientos de ensayos estándar que están familiarizados con la mayoría de pruebas de laboratorio convencionales. Todos los ensayos para el diseño y control de calidad de un

proyecto de CCR pueden ser realizados utilizando equipos y procedimientos familiares a alguna firma competente en ingeniería geotécnica y ensayos de laboratorio. Este diseño de mezcla es considerado adecuado para proyectos CCR de tamaño pequeño a medio, para los cuales un gran presupuesto para ensayos, típicamente no es disponible.

- 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. Los resultados de los ensayos indican que el diseño de mezclas y la preparación de especímenes, usando técnicas de compactación de laboratorio, provee una alternativa viable para evaluar mezclas de CCR.
- La compactación de las mezclas CCR en el laboratorio debe realizarse con un equipo adecuado, de tal manera que se obtenga la misma densidad que se alcanzará con el equipo de campo, típicamente un rodillo vibratorio de 10 Ton. Para lograr este objetivo, en la presente investigación, las probetas de CCR se elaboraron utilizando un martillo Hilti, adaptándole en el extremo un disco plano de diámetro ligeramente menor al de la probeta.
- Las probetas de CCR se elaboraron compactando la mezcla en 4 capas con 15 segundos de compactación por capa, obteniéndose de este modo probetas con densidades máximas cercanas a las del Proctor Modificado, poca avería del agregado durante el proceso de compactación y una buena apariencia superficial.
- Los pesos unitarios de las probetas de CCR son uniformes y superiores a 2400 Kg/m³, mayores a los valores típicos del concreto convencional, debido a la poca cantidad de vacíos que son reducidos por la gran compactación.
- Los valores de tiempo VeBe encontrados en los ensayos de consistencia, realizados en todas las mezclas investigadas, son mayores a 45 segundos. Estos valores son típicos en las mezclas con aproximación a suelos e indican la poca cantidad de agua presente en las mezclas.
- 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. Los resultados conseguidos en los ensayos de resistencia a la compresión realizados a las probetas de CCR son muy alentadores debido a que las resistencias alcanzadas con ambos tipos de cementos investigados son suficientes para el diseño de presas pequeñas; es así, que a la edad de 90 días las probetas fabricadas con 2% de ambos tipos de cemento alcanzaron resistencias mayores de 50 Kg/cm².

- La medida del módulo de elasticidad se realizó en todas las probetas que fueron elaboradas para el ensayo de resistencia a la compresión, encontrándose que el valor del módulo aumenta a medida que el contenido de cemento y la edad de curado se incrementa, pero no de manera constante, observándose algunas subidas y bajadas en los valores debido a variaciones en los resultados obtenidos en especímenes del mismo tipo de mezcla y edad de curado. A partir de la edad de 56 días el valor del módulo se mantiene aproximadamente constante. A edades avanzadas los módulos de elasticidad de los especímenes fabricados con 2, 3 y 4% de cemento Portland Tipo I son menores que los obtenidos con la misma proporción del cemento Puzolánico Tipo IP, en el caso de la proporción de 5 % este comportamiento se invierte.
- 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/cm². Esto significa que las mezclas CCR son menos frágiles y menos susceptibles al agrietamiento, mostrándose este comportamiento con ambos tipos de cementos investigados.
- 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.
- Las mezclas CCR examinadas en el ensayo de durabilidad ante el congelamiento y deshielo, presentaron pérdidas más bajas a las permisibles. Los resultados indican que esta pérdida es menor cuando el contenido de cemento en los especímenes se incrementa.
- 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 para la mezcla de diseño. La condición de durabilidad y la preparación de los especímenes necesarios para este ensayo se tendrán en cuenta dependiendo de las condiciones extremas a las que estará expuesta la

obra.

- 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 contenido de material cementante así obtenido puede ser incrementado en 1 a 2 % para considerar las diferencias de las condiciones de campo y laboratorio.
- 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.
- Los resultados de los ensayos indican que el diseño de mezclas y la preparación de especímenes usando técnicas de compactación de laboratorio provee una alternativa viable para evaluar mezclas de CCR.
- El Concreto Compactado con Rodillo (CCR) es el avance más importante en la tecnología de presas en los últimos 20 años. En el Perú su desarrollo es incipiente, el CCR se ha utilizado en las estructuras de cierre (presas, diques) del reservorio Antacoto, proyecto Maracapomacocha-Marca III y en dos presas pequeñas perteneciente a la mina Yanacocha, en las que se utilizó un tipo de CCR de muy bajo contenido de cemento (hardfill), sin embargo, la experiencia que se tiene es muy limitada.
- 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.
- 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.
- 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.

REFERENCIAS

1. ACI Committee 207 (1999), "Roller-Compacted Mass Concrete", ACI 207.5R-99, American Concrete Institute, Detroit.
2. Arnold, T.E.; Felsher, T.B. y Hansen, K.D. (1992), "RCC Test Specimen Preparation – Developments Toward a Standard Method", Proc. Roller Compacted Concrete III, ASCE, San Diego, California, February, 341-357.
3. Casias, T.J.; Goldsmith, V.D. y Benavidez, A.A. (1988), "Soil Laboratory Compaction Methods Applied to RCC", Proc. Roller Compacted Concrete II, ASCE, New York, 107-122.
4. Choi, Y.K. (1995), "RCC Mix Design with Aggregate Base Course", Proc. Ist. Int. Conf., Water Resour. Engrg., ASCE, New York, 328-332.
5. Choi, Y.K. y Groom, J.L. (2001), "RCC Mix Design – Soil Approach", Journal of Materials in Civil Engineering, January/February, 71-76.
6. Dunstan, M.R. (1994), "The State of the Art of RCC Dams", Hydropower & Dams, March, 44-50.
7. Dunstan, M.R. (1999), "Recent Developments in RCC Dams", Issue One, Hydropower & Dams, 40-45.
8. Dunstan, M.R. (2003), "The State of the Art of RCC Dams in 2003 – An Update of ICOLD Bulletin N° 125", Proc. 4th. Int. Symp. on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams in Spain, 39-48.
9. Gaekel, L. y Schrader, E. (1992), "RCC Mixes and Properties Using Poor Quality Materials – Concepcion Dam", Proc. Roller Compacted Concrete III, ASCE, New York, 358-373.
10. Hansen, K.D. (1992), "RCC for Rehabilitation of Dams in the USA – An Overview", Proc. Roller Compacted Concrete III, ASCE, New York, 22-46.
11. Hansen, K.D. y Reinhardt, W.G. (1991), "Roller-Compacted Concrete Dams", McGraw-Hill, New York.
12. Hansen, K.D. y Lynch, J.B. (1995), "Controlling Floods in the Desert with Soil Cement", Proc., 2º CANMET/ACI Int. Symp. in Concrete Technol., American Concrete Institute, Detroit.
13. Lemons, R.M. (1988), "A Combined RCC and Reinforced Concrete Spillway", Roller Compacted Concrete II, ASCE, New York, February, 51-60.
14. Nagayama, I., Watanabe, K. y Niitaka, Y. (1995), "A Study on the Compaction Mechanism of RCC Using Large-sized Specimens and Standard Specimens", Proc. International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, 193-208.

15. Oberholtzer, G.L. (1985), "Galesville Project Materials Engineering for Roller Compacted Concrete", Roller Compacted Concrete Seminar, ASCE, Southern Idaho Section.
16. Oberholtzer, G.; Lorenzo, A, y Schrader, E. (1988), "Roller Compacted Concrete Design for Urugua-I Dam" Proc. Roller Compacted Concrete, ASCE, New York, 357-368.
17. Omram, M.E., Nayak, G.C. y Jain, S.C.(1995), "Experimental Studies on Roller Compacted Concrete for Dams" Proc. International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, 179-192.
18. Raphael, J.M. (1970), "The Optimum Gravity Dam", Proc. Rapid Construction of Concrete Dams", ASCE, New York, 221-244.
19. Reeves, G.N. y Yates, L.B., Jr. (1985), "Simplified Design and Construction Control for Roller Compacted Concrete", Proc. Roller Compacted Concrete, ASCE, New York, 48-61.
20. Rodriguez Andriolo, F. (1998), "The Use of Roller Compacted Concrete" Brasil, Sao Paulo.
21. Santana, T. M. "A Geotechnical Methodology for Roller Compacted Concrete Mixture Design", Universidad Nova de Lisboa, Portugal, 243-249.
22. Schrader, E. (2003), "Appropriate Laboratory Methods for Different Types of Roller Compacted Concrete (RCC)" , Proc. 4th. Int. Symp. on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams in Spain, 1037-1044.
23. U.S. Army Corps Of Engineers (1992), "Engineering and Design, Roller-Compacted Concrete", EM 1110-2-2006, Department of the Army, Washington, D.C. February.
24. U.S. Army Corps Of Engineers (2000), "Roller-Compacted Concrete", EM 1110-2-2006, Department of the Army, Washington, D.C. 15 January.
25. Wong, N.C., Bischoff, J.A. Y Johnson, D.H. (1988), "Strengthening and Raising Gibraltar Dam with RCC", Proc. Roller Compacted Concrete II, ASCE, New York, 92-106.

ANEXO I

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS A LOS AGREGADOS



GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO ASTM D 422

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

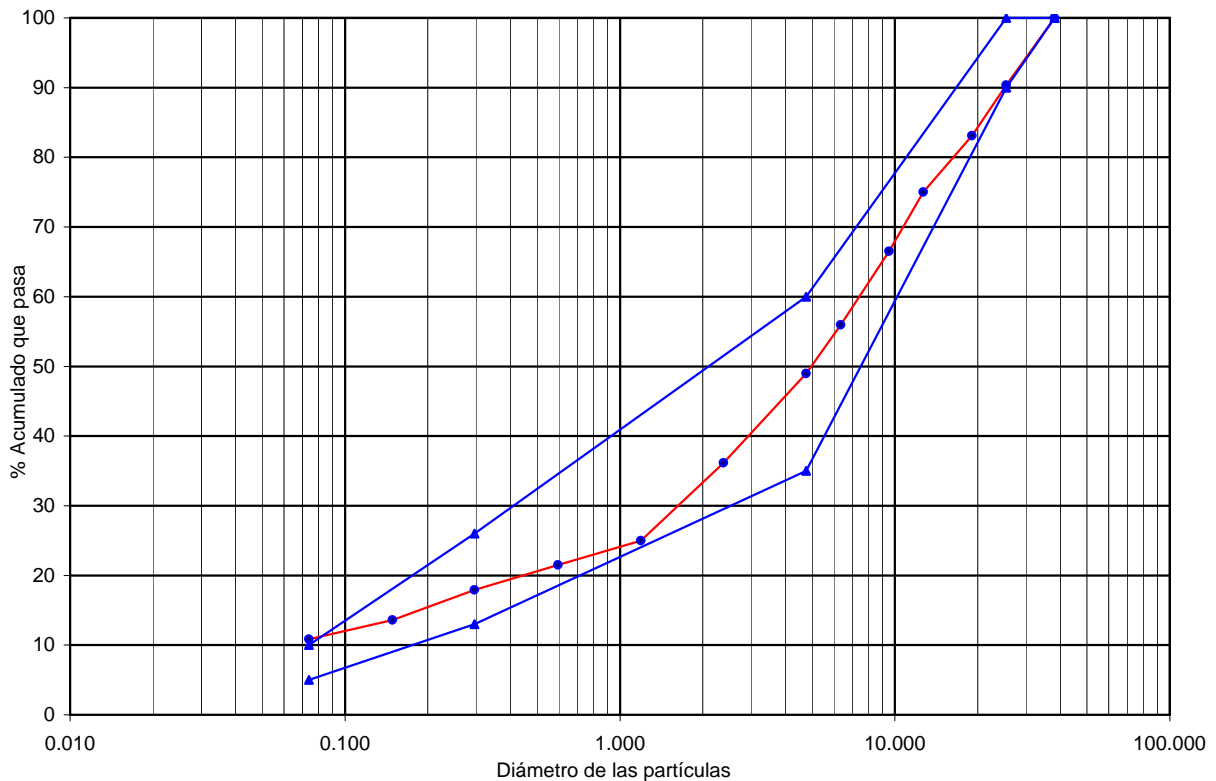
TESISTA : **ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA**

MATERIAL : **CANTERA JICAMARCA**

FECHA : **JULIO, 2003**

TAMIZES ASTM	PESO RETENIDO	%			TAMAÑO MÁXIMO 1 1/2"
		RETENIDO PARCIAL	RETENIDO ACUMULADO	QUE PASA	
2"					DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: La obtención de los agregados apropiados para la investigación se hizo mediante una reconstitución previa del material en las siguientes proporciones: MAT > 1/2" = 25% 1/2" < MAT < N° 16 = 50 % MAT < N° 16 = 25% CLASIF. S.U.C.S. = GP - GM I.G. = 0 AASHTO = A1 - a % FINOS= 10,82%
1 1/2"	0	0.00	0.00	100.00	
1"	578.01	9.63	9.63	90.37	
3/4"	435.32	7.26	16.89	83.11	
1/2"	486.68	8.11	25.00	75.00	
3/8"	509.16	8.49	33.49	66.51	
1/4"	634.86	10.58	44.07	55.93	
N° 4	418.89	6.98	51.05	48.95	
N°8	766.86	12.78	63.83	36.17	
N° 16	670.23	11.17	75.00	25.00	
N°30	210.69	3.51	78.51	21.49	
N°50	214.88	3.58	82.09	17.91	
N°100	259.13	4.32	86.41	13.59	
N°200	166.20	2.77	89.18	10.82	
PASA N° 200	649.00	10.82	100.00	0.00	

Curva Granulométrica



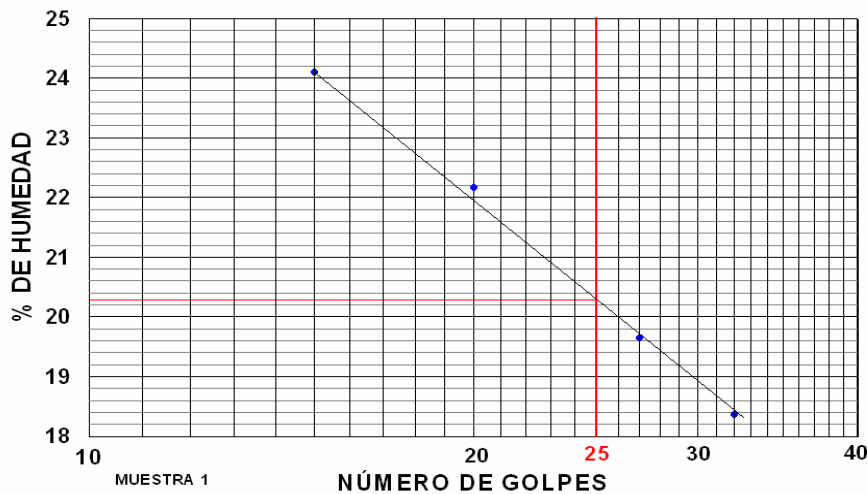


TESIS : **DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS**
 TESISTA : **ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA**
 FECHA : **AGOSTO, 2003**

LÍMITE DE PLASTICIDAD

LÍMITE LÍQUIDO ASTM D 4318						
TARA No	81	47	332	513		
No DE GOLPES	15	20	27	32		
T + S. HÚMEDO	33.38	32.35	28.79	33.72		
T + S. SECO	29.30	28.96	26.21	30.63		
PESO DEL AGUA	4.08	3.39	2.58	3.09		
PESO DE TARA	12.37	13.67	13.08	13.81		
PESO DEL S.SECO	16.93	15.29	13.13	16.82		
% DE HUMEDAD	24.10%	22.17%	19.65%	18.37%		

LÍMITE PLÁSTICO NORMA ASTM D 4318						
TARA N°						
T + S. HÚMEDO						
T + S. SECO						
PESO DEL AGUA						
PESO DE TARA						
PESO DEL S.SECO						
% DE HUMEDAD	NP	NP	NP	NP		



MUESTRA N° 01	
L.L.	20.23%
L.P.	N.P.
I.P.	0.00%



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS

AGREGADO GRUESO ASTM C 127

TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

FECHA : 18 DE JULIO DEL 2003

			M-1	M-2	M-3
A	PESO MAT.SAT.SUP.SECA (EN AIRE) (gr)		3000.00	3000.00	3000.00
B	PESO MAT.SAT.SUP.SECA (EN AGUA) (gr)		1892.00	1893.50	1891.50
C	VOL.DE MASA+VOL.DE VACIOS =A - B (gr)		1108.00	1106.50	1108.50
D	PESO MATERIAL SECO (gr)		2975.50	2975.50	2976.50
E	VOL.DE MASA = C - (A - D) (gr)		1083.50	1082.00	1085.00
F	P.e.BULK (BASE SECA) = D/C		2.69	2.69	2.69
G	P.e.BULK (BASE SATURADA) = A/C		2.71	2.71	2.71
H	P.e. APARENTE (BASE SECA) = D/E		2.75	2.75	2.74
I	% DE ABSORCIÓN = ((A - D)/D) *100		0.82	0.82	0.79

AGREGADO FINO ASTM C 128

			M-1	M-2	
A	PESO MAT.SAT.SUP.SECA (EN AIRE) (gr)		500	500	
B	PESO FRASCO + AGUA + A (gr)		989.5	988.9	
C	PESO DEL FRASCO (gr)		174.50	174.50	
D	PESO DEL AGUA (gr)		315.00	314.40	
E	PESO DE LA ARENA SECA AL HORNO (gr)		497.50	496.00	
F	VOLUMEN DEL FRASCO (gr)		500	500	
G	P.e.BULK (BASE SECA) = E/(F-D) (gr)		2.69	2.67	
H	P.e.BULK (BASE SATURADA) = 500/(F-D)		2.70	2.69	
I	P.e. APARENTE (BASE SECA) = E/((F-D)-(500-E))		2.73	2.73	
J	% DE ABSORCIÓN = (500-E)x100/E		0.50	0.81	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME S04 - 032

SOLICITADO : MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA
PROYECTO : TESIS: DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO
UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS.
FECHA : 15 de Enero de 2004

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Material Natural

I. ENSAYO DE DURABILIDAD CON SULFATO DE SODIO ASTM C-88

Agregado : Grueso Fino
Desgaste (%) : 4.024 2.796

II. ENSAYO DE ABRASIÓN - MÁQUINA DE LOS ANGELES ASTM C131

Gradación : "A"
Desgaste (%) : 17.4

Nota: La muestra fue remitida e identificada por el Solicitante

LUISA E. SHUAN LUCAS
ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



JOSÉ WILFREDO GUTIÉRREZ LAZARETTI
ING. JEFE DEL LAB. N° 2
Mecánica de Suelos - UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
 Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S04 - 032

SOLICITANTE : MIRIAM ROSANINA ESCALAYA ADVÍNCULA
PROYECTO : TESIS: DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS.
FECHA : 15 de Enero de 2004

ENSAYO DE DURABILIDAD CON SULFATO DE SODIO ASTM C-88

Muestra : Material Natural

N°	Tamaño	%	Peso retenido (gr)	Recipiente	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Pérdidas		Escalonado Original	Pérdidas Corregidas (%)
							Peso (gr)	(%)		
1	2 1/2" a 1 1/2"		5000+300							
	2 1/2" a 2"	60	3000+300							
	2" a 1 1/2"	40	2000+300							
2	1 1/2" a 3/4"		1500+50		1012.4	992.2	20.2	2.00	0.189	0.376
	1 1/2" a 1"	67	1000+50		511.2	482.1	29.1	5.69	0.142	0.809
	1" a 3/4"	33	500+30							
3	3/4" a 3/8"		1000+10							
	3/4" a 1/2"	67	670+10		674.8	640.6	34.2	5.07	0.159	0.805
	1/2" a 3/8"	33	330+5		331.6	309.1	22.5	6.79	0.166	1.128
4	3/8" a N°4		300+5		300.4	292.5	7.9	2.63	0.344	0.905
	PERDIDAS TOTALES (%)									
4.024										

N°	Tamaño	%	Peso retenido (gr)	Recipiente	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Pérdidas		Escalonado Original	Pérdidas Corregidas (%)
							Peso (gr)	(%)		
1	3/8" a N°4		100		100.8	98.1	2.7	2.68	0.264	0.707
	N°4 a N°8		100		100	99.2	0.8	0.80	0.1922	0.154
	N°8 a N°16		100		100	97.5	2.5	2.50	0.1679	0.420
2	N°16 a N°30		100		100	92.4	7.6	7.60	0.0528	0.401
	N°30 a N°50		100		100	79.3	20.7	20.70	0.054	1.114
PERDIDAS TOTALES (%)										
2.796										



LUISA E. SIKON LUCAS
 ING. RESPONSABLE DE AREA
 Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

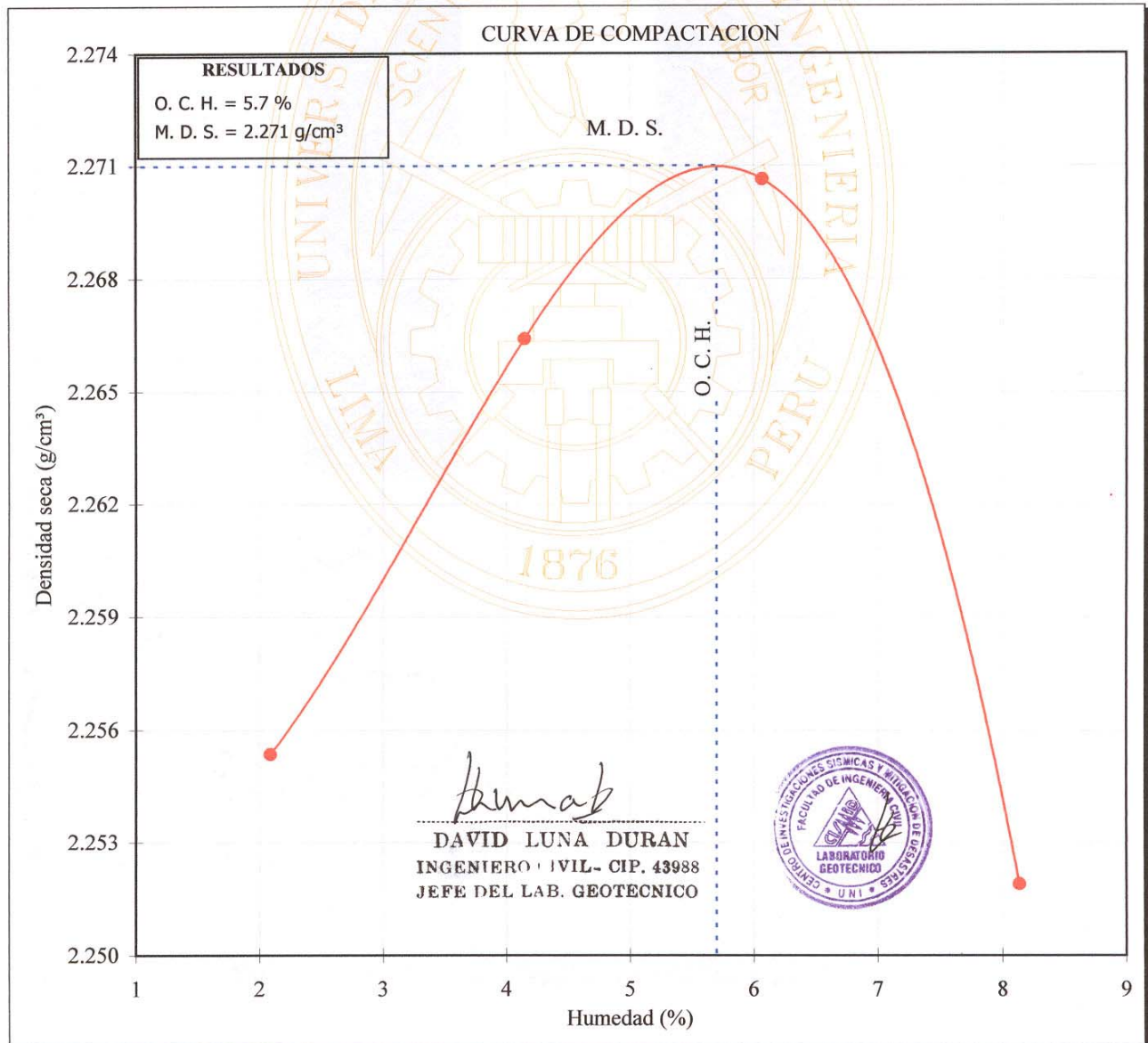
CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTECNICO



PROCTOR MODIFICADO (ASTM - D1557 C)

INFORME : LG03-168
 SOLICITANTE : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVINCULA
 PROYECTO : Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos
 FECHA : Julio, 2003
 Muestra : Natural

Datos				
Humedad (%)	2.1	4.1	6.1	8.1
Densidad Seca (g/cm ³)	2.255	2.266	2.271	2.252





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

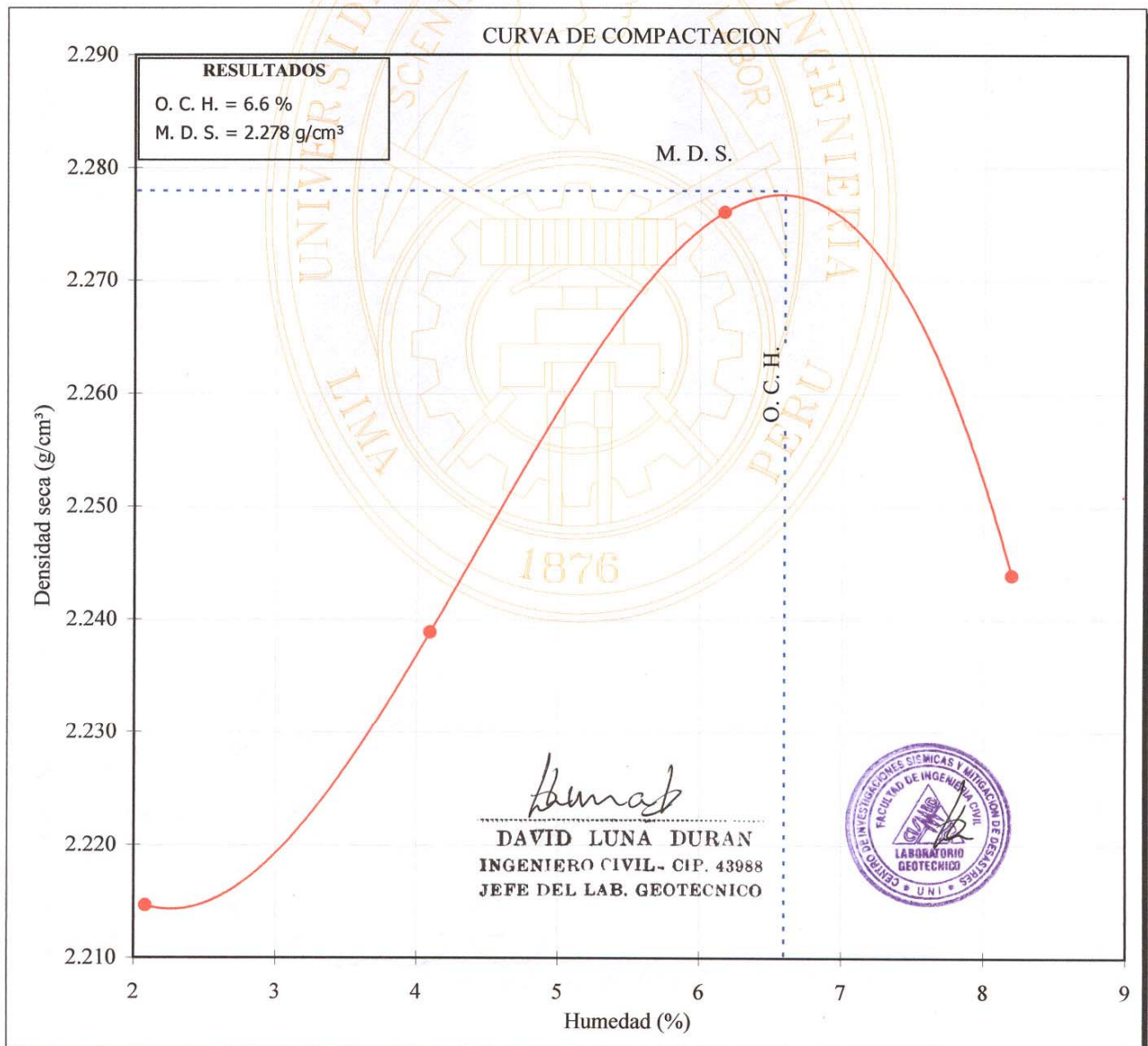
CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTECNICO



PROCTOR MODIFICADO
(ASTM - D1557 C)

INFORME : LG03-168
SOLICITANTE : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVINCULA
PROYECTO : Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos
FECHA : Julio, 2003
Muestra : Natural
Cemento Sol (2.0 %)

Datos				
Humedad (%)	2.1	4.1	6.2	8.2
Densidad Seca (g/cm ³)	2.215	2.239	2.276	2.244





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

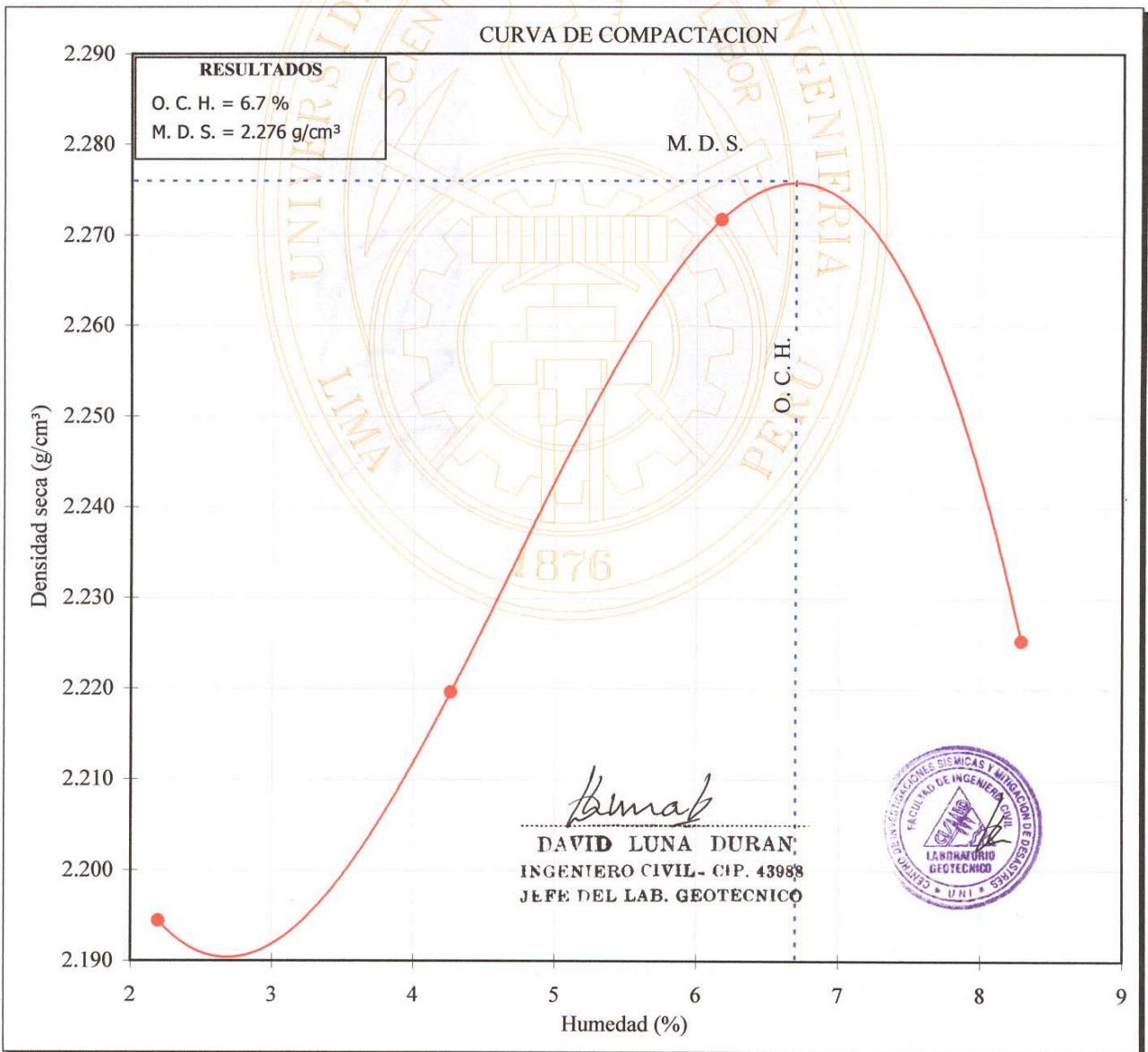
CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTECNICO



PROCTOR MODIFICADO
(ASTM - D1557 C)

INFORME : LG03-168
 SOLICITANTE : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVINCULA
 PROYECTO : Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos
 FECHA : Julio, 2003
 Muestra : Natural
 Cemento Sol (3.0 %)

Datos				
Humedad (%)	2.2	4.3	6.2	8.3
Densidad Seca (g/cm ³)	2.194	2.220	2.272	2.225





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

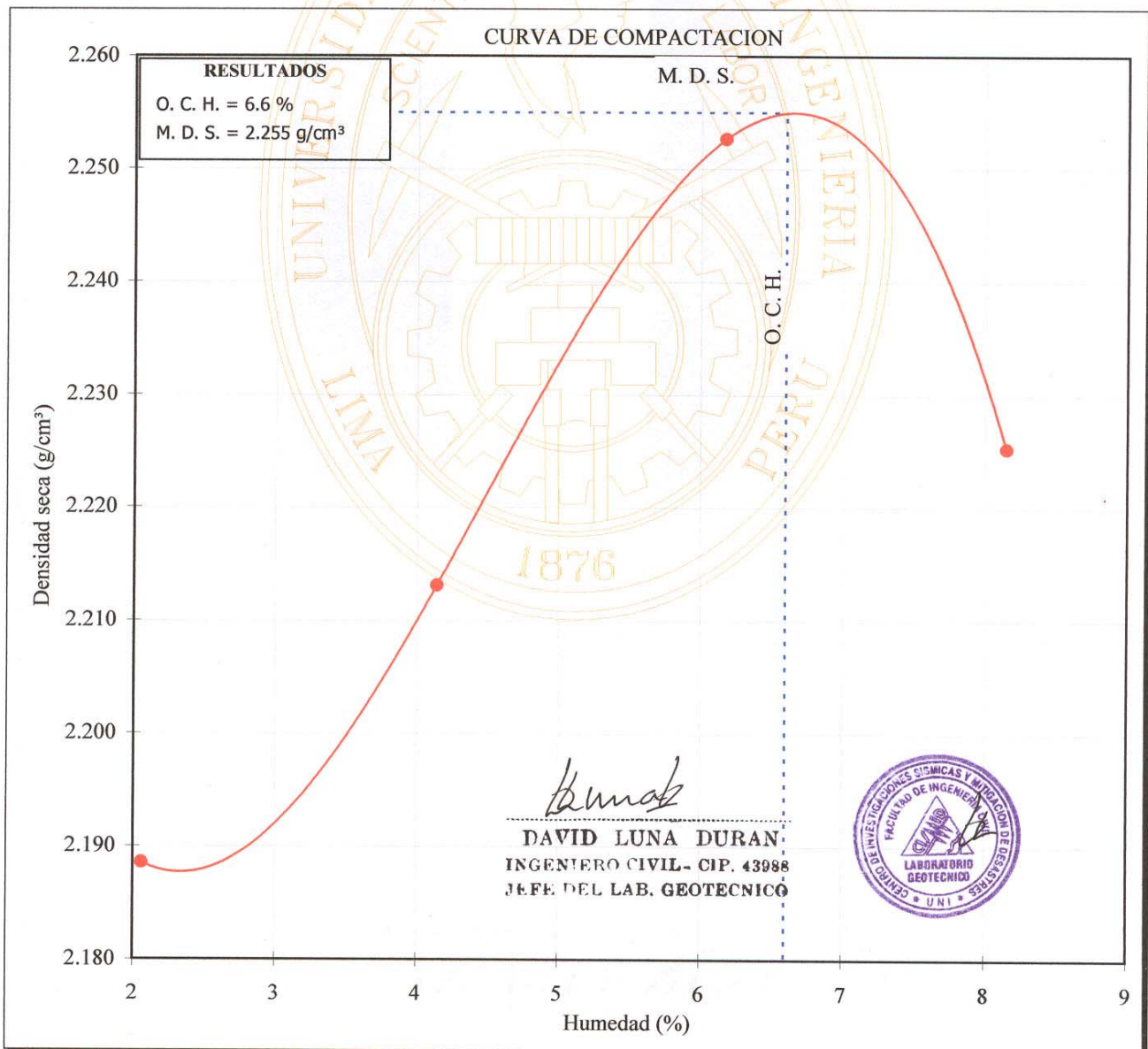
CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTECNICO



PROCTOR MODIFICADO (ASTM - D1557 C)

INFORME : LG03-168
SOLICITANTE : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVINCULA
PROYECTO : Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos
FECHA : Julio, 2003
Muestra : Natural
Cemento Sol (4.0 %)

Datos				
Humedad (%)	2.1	4.1	6.2	8.1
Densidad Seca (g/cm ³)	2.189	2.213	2.253	2.225





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

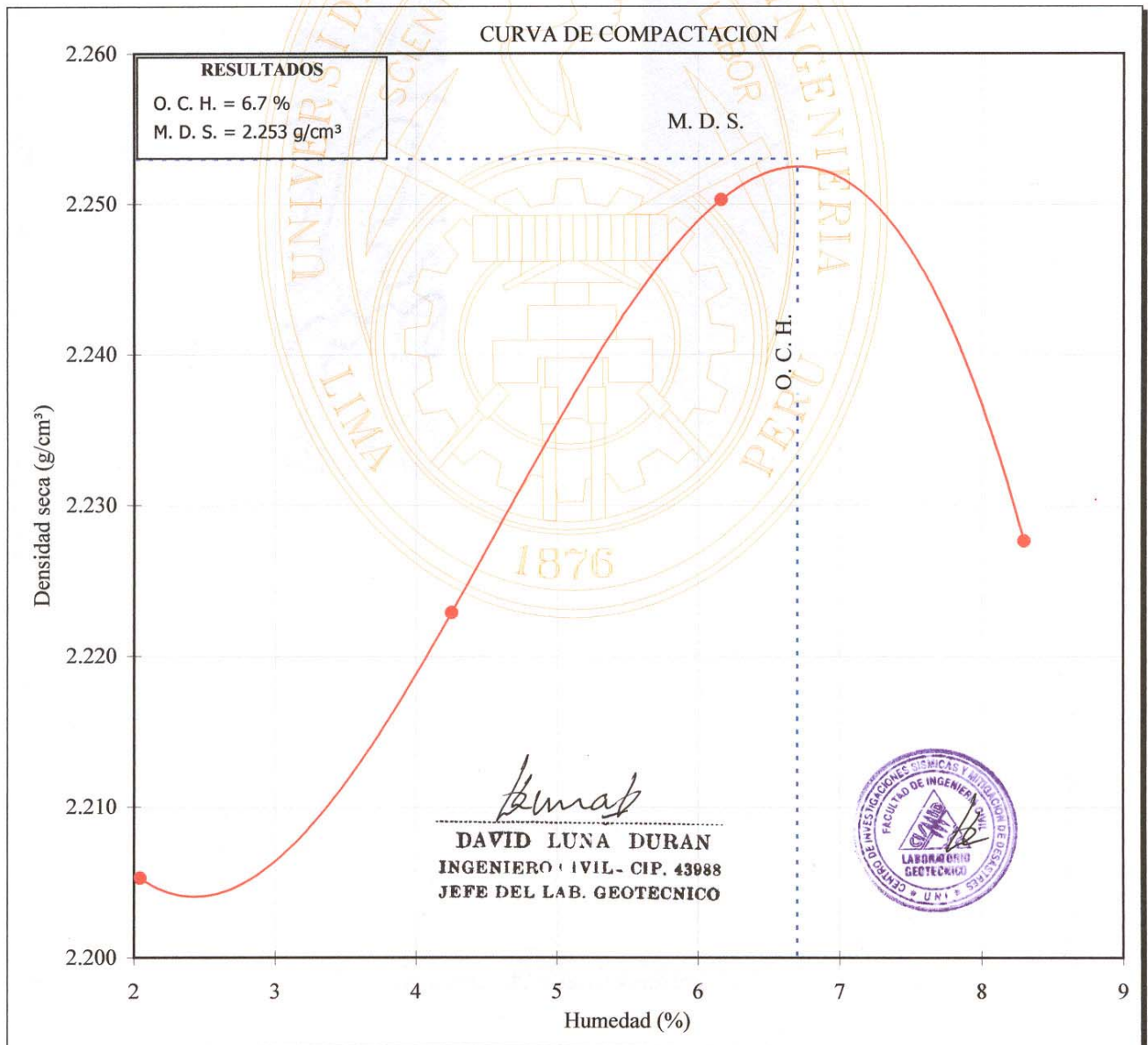
CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTECNICO



PROCTOR MODIFICADO
(ASTM - D1557 C)

INFORME : LG03-168
SOLICITANTE : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVINCULA
PROYECTO : Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos
FECHA : Julio, 2003
Muestra : Natural
Cemento Sol (5.0 %)

Datos				
Humedad (%)	2.0	4.3	6.2	8.3
Densidad Seca (g/cm ³)	2.205	2.223	2.250	2.228





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES

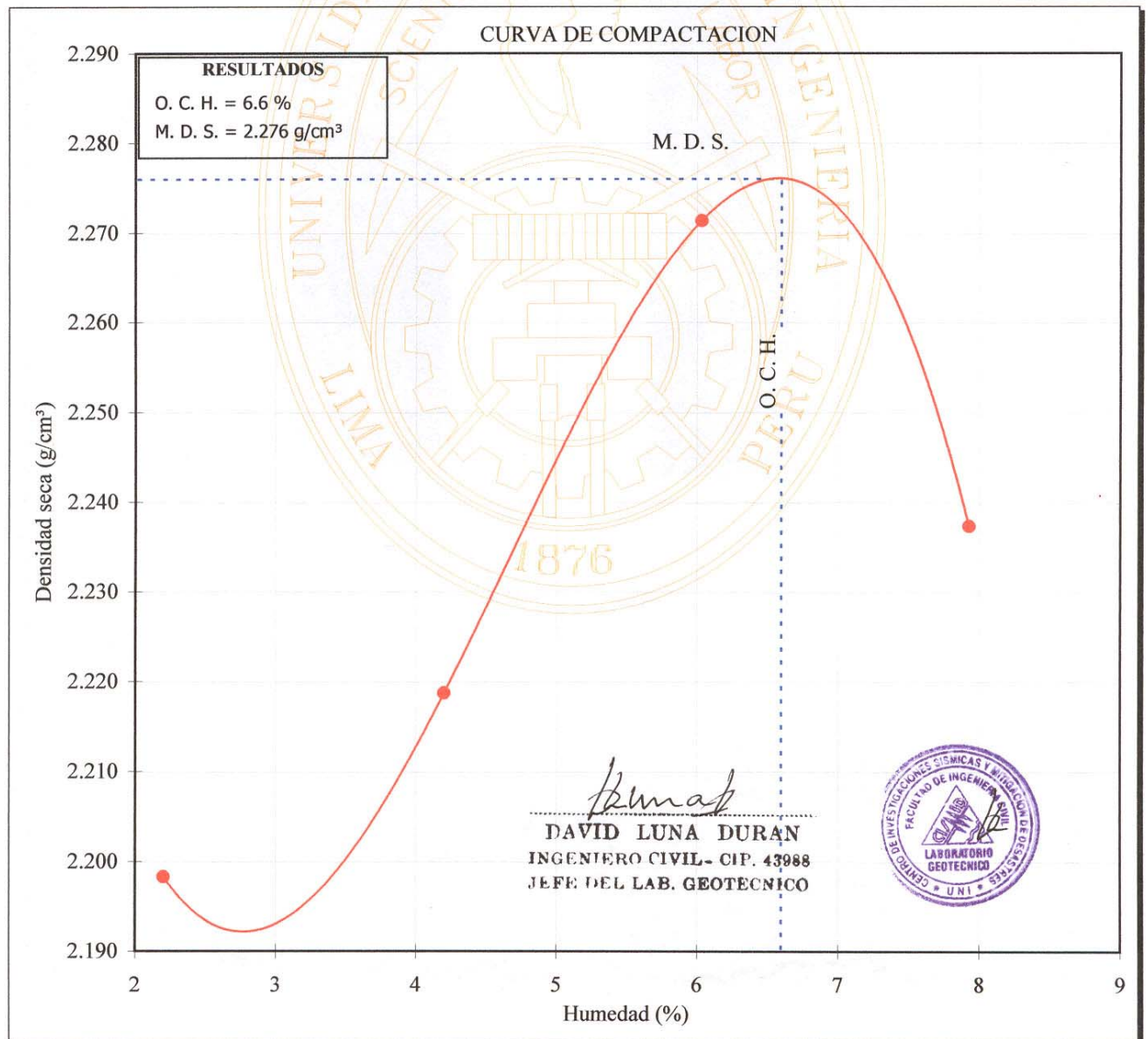
LABORATORIO GEOTECNICO



PROCTOR MODIFICADO (ASTM - D1557 C)

INFORME : LG03-168
SOLICITANTE : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVINCULA
PROYECTO : Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos
FECHA : Julio, 2003
Muestra : Natural
Cemento Atlas (2.0 %)

Datos				
Humedad (%)	2.2	4.2	6.0	7.9
Densidad Seca (g/cm ³)	2.198	2.219	2.271	2.237





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES

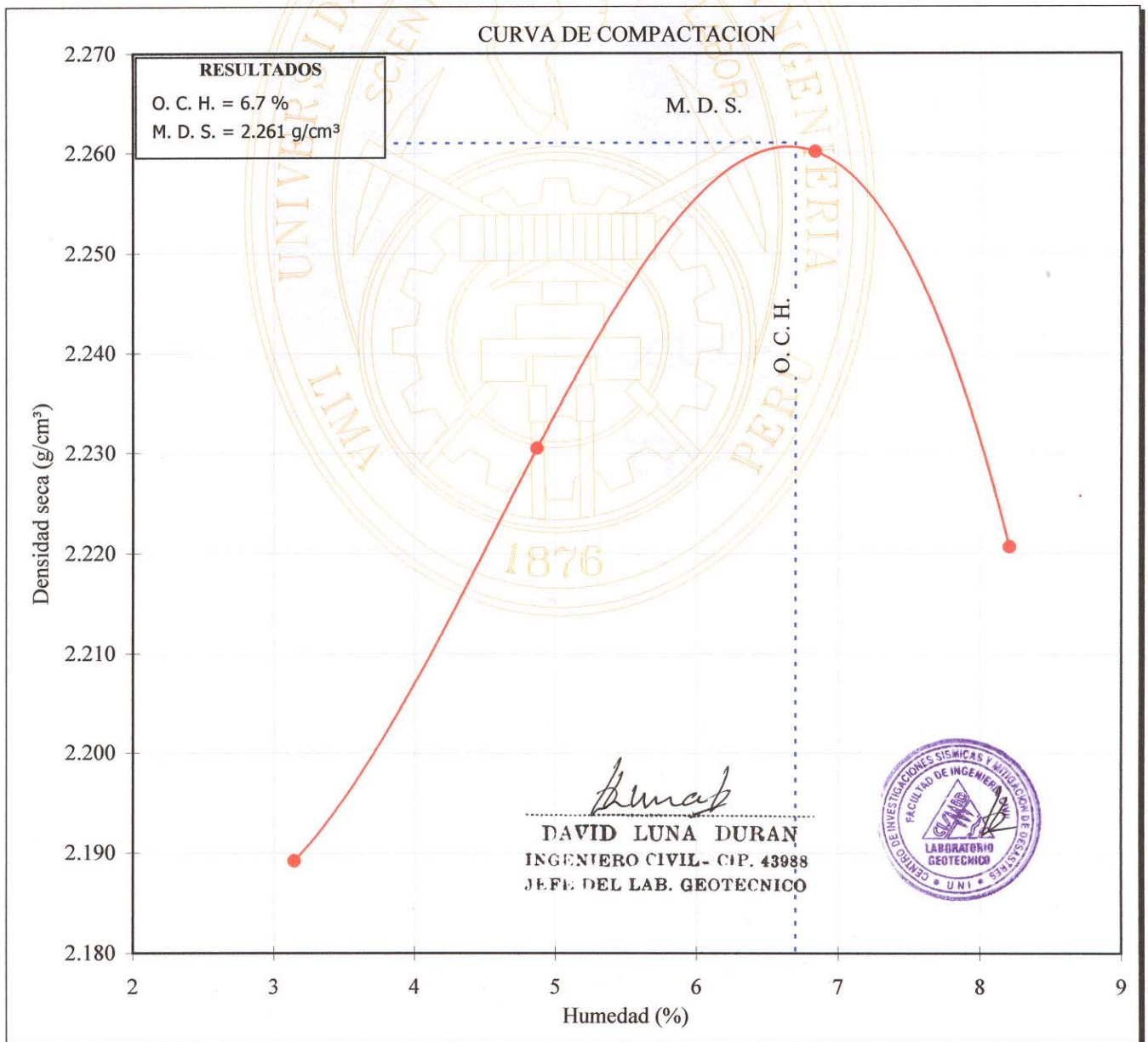
LABORATORIO GEOTECNICO



PROCTOR MODIFICADO (ASTM - D1557 C)

INFORME : LG03-168
 SOLICITANTE : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVINCULA
 PROYECTO : Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos
 FECHA : Julio, 2003
 Muestra : Natural
 Cemento Atlas (3.0 %)

Datos				
Humedad (%)	3.1	4.9	6.8	8.2
Densidad Seca (g/cm ³)	2.189	2.231	2.260	2.221





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES

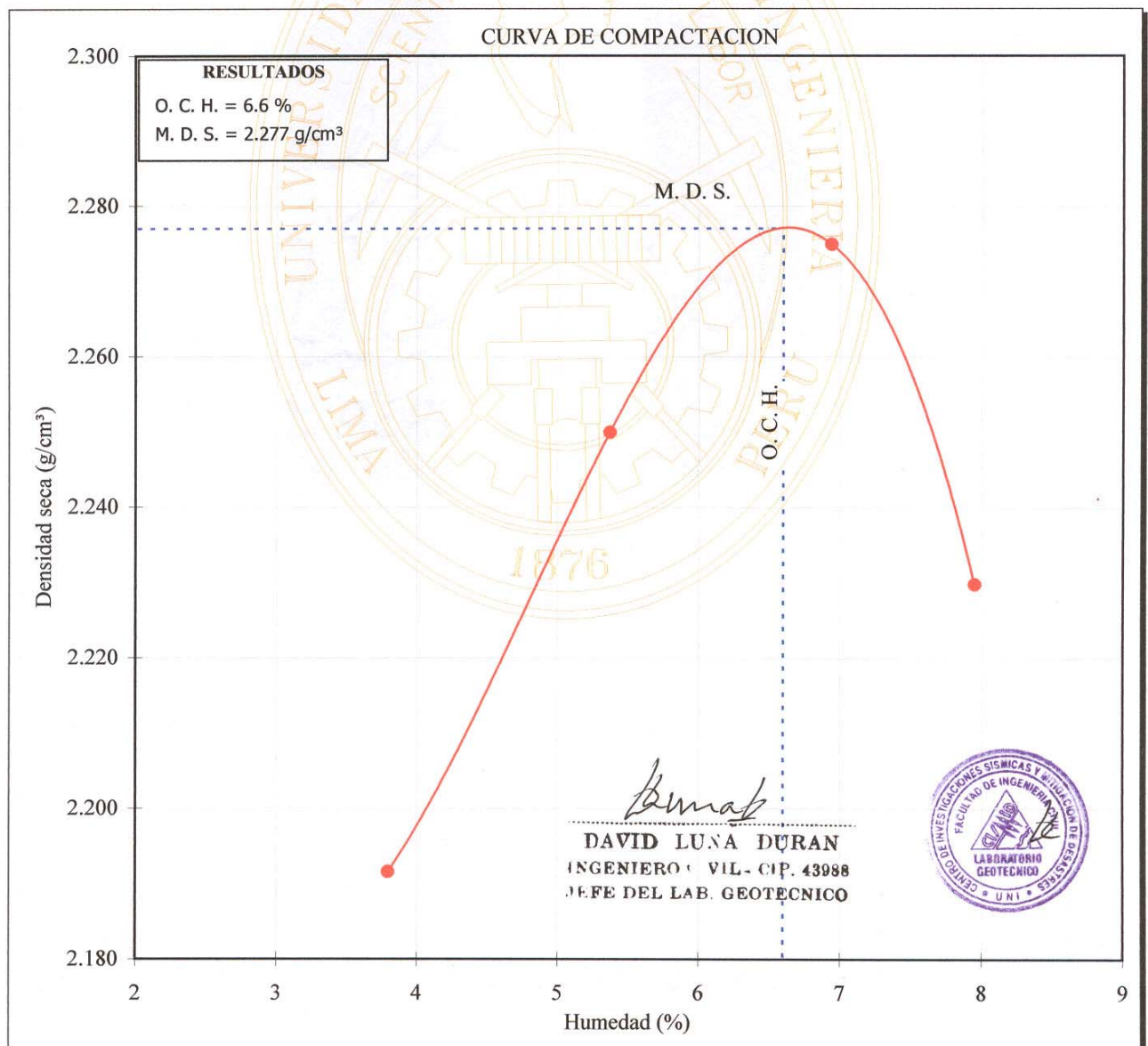
LABORATORIO GEOTECNICO



PROCTOR MODIFICADO (ASTM - D1557 C)

INFORME : LG03-168
 SOLICITANTE : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVINCULA
 PROYECTO : Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos
 FECHA : Julio, 2003
 Muestra : Natural
 Cemento Atlas (4.0 %)

Datos				
Humedad (%)	3.8	5.4	7.9	6.9
Densidad Seca (g/cm ³)	2.192	2.250	2.230	2.275





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES

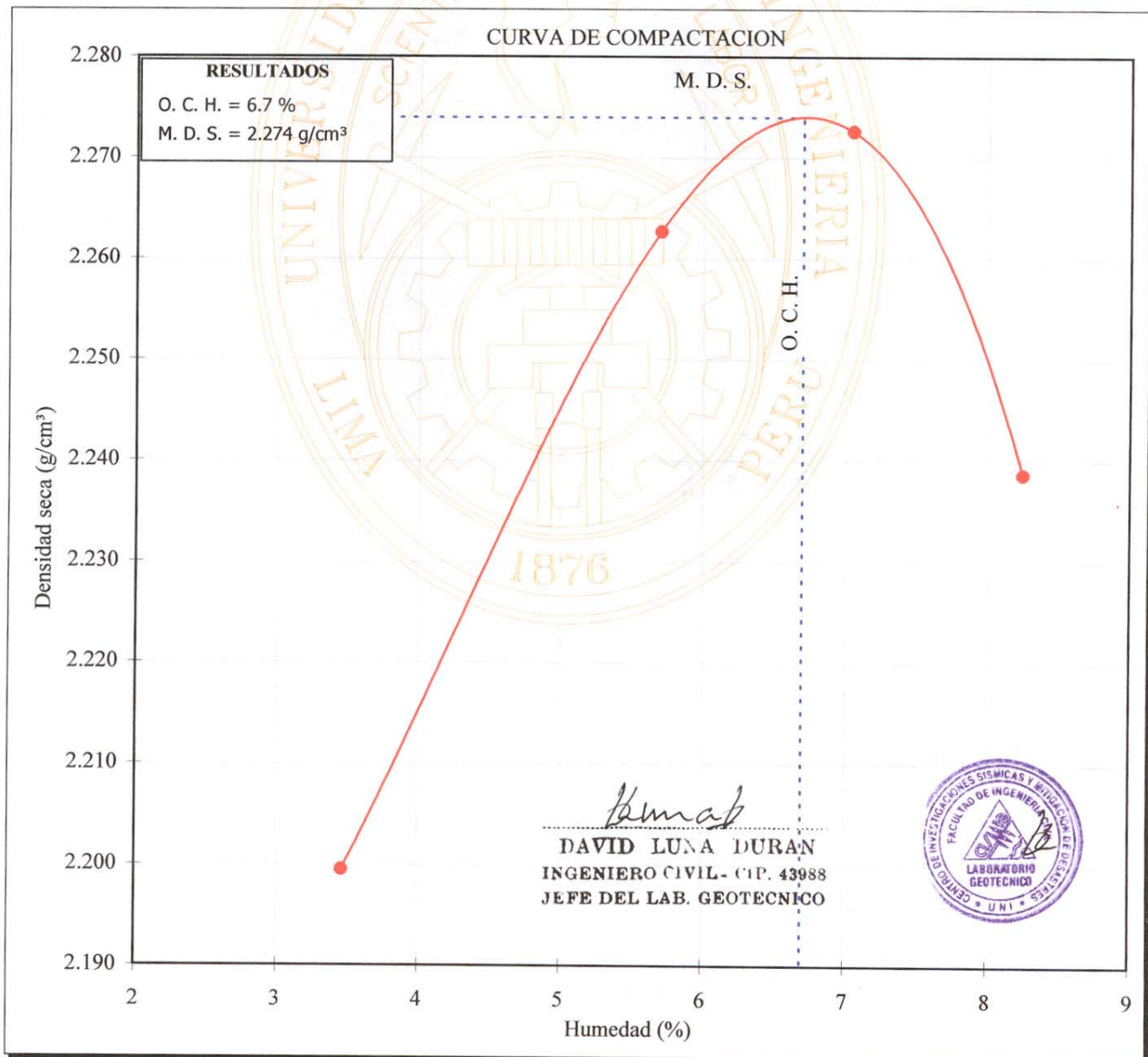
LABORATORIO GEOTECNICO



PROCTOR MODIFICADO (ASTM - D1557 C)

INFORME : LG03-168
 SOLICITANTE : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVINCULA
 PROYECTO : Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos
 FECHA : Julio, 2003
 Muestra : Natural
 Cemento Atlas (5.0 %)

Datos				
Humedad (%)	3.5	5.7	7.0	8.2
Densidad Seca (g/cm ³)	2.200	2.263	2.273	2.239



ANEXO II

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS A LAS MEZCLAS CCR

**RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y
MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS PROBETAS DE CCR**

Identificación de Probetas	Tipo de Cemento	Contenido de Cemento (% en peso)	Peso Unitario (gr/cm ³)	Edad de Ensayo (días)	Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)
10-G2-SOL-2	SOL	2	2.45	7	36.84	808
11-G2-SOL-2		2	2.45	7	32.09	980
12-G2-SOL-2		2	2.43	7	32.43	1068
1-G11-SOL-2	SOL	2	2.44	14	37.97	3811
2-G11-SOL-2		2	2.41	14	40.23	5786
3-G11-SOL-2		2	2.46	14	37.80	5961
4-G11-SOL-2	SOL	2	2.45	28	44.49	6041
5-G11-SOL-2		2	2.43	28	39.73	7619
6-G11-SOL-2		2	2.43	28	38.37	6072
7-G11-SOL-2	SOL	2	2.40	56	44.42	3938
8-G11-SOL-2		2	2.43	56	45.84	2925
9-G11-SOL-2		2	2.40	56	43.01	6538
13-G2-SOL-2	SOL	2	2.46	90	55.00	4076
15-G2-SOL-2		2	2.43	90	54.78	3978
16-G2-SOL-2		2	2.43	90	51.50	4253
17-G2-SOL-2	SOL	2	2.43	180	65.02	3917
18-G2-SOL-2		2	2.45	180	71.81	7450
1-G1-SOL-3	SOL	3	2.44	7	47.63	9110
2-G1-SOL-3		3	2.47	7	41.31	3816
3-G1-SOL-3		3	2.46	7	44.32	4385
10-G12-SOL-3	SOL	3	2.46	14	54.72	---
11-G12-SOL-3		3	2.45	14	54.27	7509
12-G12-SOL-3		3	2.45	14	51.27	9070
13-G12-SOL-3	SOL	3	2.46	28	57.38	7427
14-G12-SOL-3		3	2.44	28	53.42	9566
15-G12-SOL-3		3	2.44	28	59.36	---
16-G12-SOL-3	SOL	3	2.43	56	65.81	10624
17-G12-SOL-3		3	2.44	56	60.83	10380
18-G12-SOL-3		3	2.45	56	62.08	11600
5-G1-SOL-3	SOL	3	2.44	90	84.49	6288
6-G1-SOL-3		3	2.44	90	84.03	7338
7-G1-SOL-3		3	2.43	90	81.94	5938
8-G1-SOL-3	SOL	3	2.45	180	89.13	10003
9-G1-SOL-3		3	2.43	180	95.18	8288
19-G3-SOL-4	SOL	4	2.45	7	68.13	5208
20-G3-SOL-4		4	2.46	7	69.38	23663
22-G3-SOL-4		4	2.44	7	60.32	6413
19-G13-SOL-4	SOL	4	2.42	14	75.09	15517
20-G13-SOL-4		4	2.45	14	81.04	16000
21-G13-SOL-4		4	2.47	14	76.51	---
22-G13-SOL-4	SOL	4	2.45	28	85.17	19865
23-G13-SOL-4		4	2.44	28	77.11	16738
24-G13-SOL-4		4	2.47	28	86.22	21042
25-G13-SOL-4	SOL	4	2.46	56	84.60	19835
26-G13-SOL-4		4	2.47	56	98.41	16304
27-G13-SOL-4		4	2.45	56	96.60	9520

**RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y
MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS PROBETAS DE CCR**

Identificación de Probetas	Tipo de Cemento	Contenido de Cemento (% en peso)	Peso Unitario (gr/cm ³)	Edad de Ensayo (días)	Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)
23-G3-SOL-4	SOL	4	2.45	90	103.05	12240
24-G3-SOL-4		4	2.44	90	102.43	12860
25-G3-SOL-4		4	2.42	90	111.93	17908
26-G3-SOL-4	SOL	4	2.43	180	106.44	13599
27-G3-SOL-4		4	2.42	180	106.67	15546
29-G4-SOL-5	SOL	5	2.47	7	85.17	14681
30-G4-SOL-5		5	2.46	7	89.07	20112
31-G4-SOL-5		5	2.44	7	81.37	3944
1-G15-SOL-5	SOL	5	2.45	14	90.32	21200
2-G15-SOL-5		5	2.45	14	84.29	19882
3-G15-SOL-5		5	2.47	14	94.48	17862
4-G15-SOL-5	SOL	5	2.46	28	97.33	25200
5-G15-SOL-5		5	2.45	28	102.43	25000
6-G15-SOL-5		5	2.44	28	103.56	15685
7-G15-SOL-5	SOL	5	2.61	56	108.76	25853
8-G15-SOL-5		5	2.46	56	116.97	22841
9-G15-SOL-5		5	2.43	56	112.10	---
32-G4-SOL-5	SOL	5	2.44	90	115.67	23508
33-G4-SOL-5		5	2.46	90	117.53	21890
34-G4-SOL-5		5	2.41	90	124.06	23607
35-G4-SOL-5	SOL	5	2.45	180	132.26	---
36-G4-SOL-5		5	2.46	180	126.53	24200
1-G7-AT-2	ATLAS	2	2.42	7	27.16	3981
2-G7-AT-2		2	2.46	7	26.03	3184
3-G7-AT-2		2	2.45	7	23.20	1920
19-G5-AT-2	ATLAS	2	2.44	14	37.18	4755
20-G5-AT-2		2	2.46	14	30.61	2513
21-G5-AT-2		2	2.45	14	28.86	4300
22-G5-AT-2	ATLAS	2	2.44	28	37.01	4289
23-G5-AT-2		2	2.47	28	34.54	5300
24-G5-AT-2		2	2.46	28	40.07	5112
4-G7-AT-2	ATLAS	2	2.42	56	47.20	8443
5-G7-AT-2		2	2.43	56	51.33	10317
6-G7-AT-2		2	2.42	56	40.63	4325
7-G7-AT-2	ATLAS	2	2.43	90	60.89	17208
8-G7-AT-2		2	2.40	90	55.97	12833
9-G7-AT-2		2	2.42	90	60.27	8525
25-G5-AT-2	ATLAS	2	2.45	180	61.34	7877
26-G5-AT-2		2	2.44	180	67.74	15154
28-G6-AT-3	ATLAS	3	2.42	7	39.61	4970
29-G6-AT-3		3	2.42	7	34.83	6430
31-G6-AT-3		3	2.40	7	39.18	5840
10-G8-AT-3	ATLAS	3	2.45	14	49.23	8485
11-G8-AT-3		3	2.44	14	43.01	7509
17-G8-AT-3		3	2.45	14	45.25	3275

**RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y
MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS PROBETAS DE CCR**

Identificación de Probetas	Tipo de Cemento	Contenido de Cemento (% en peso)	Peso Unitario (gr/cm ³)	Edad de Ensayo (días)	Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)
32-G6-AT-3	ATLAS	3	2.45	28	47.84	5986
33-G6-AT-3		3	2.44	28	49.80	7263
34-G6-AT-3		3	2.43	28	47.27	5413
12-G8-AT-3	ATLAS	3	2.44	56	70.28	16291
16-G8-AT-3		3	2.42	56	70.36	11361
18-G8-AT-3		3	2.42	56	71.13	10487
13-G8-AT-3	ATLAS	3	2.42	90	70.74	13168
14-G8-AT-3		3	2.37	90	78.60	20152
15-G8-AT-3		3	2.39	90	73.85	14552
35-G6-AT-3	ATLAS	3	2.45	180	83.28	9847
36-G6-AT-3		3	2.43	180	87.15	15710
28-G14-AT-4	ATLAS	4	2.45	7	43.06	7854
29-G14-AT-4		4	2.43	7	46.02	6140
30-G14-AT-4		4	2.45	7	55.23	5837
31-G14-AT-4	ATLAS	4	2.44	14	56.02	7141
32-G14-AT-4		4	2.44	14	54.89	---
33-G14-AT-4		4	2.44	14	51.50	8121
19-G9-AT-4	ATLAS	4	2.44	28	69.15	15226
20-G9-AT-4		4	2.44	28	65.42	17610
21-G9-AT-4		4	2.43	28	66.77	15316
34-G14-AT-4	ATLAS	4	2.43	56	74.70	17638
35-G14-AT-4		4	2.42	56	75.26	13877
36-G14-AT-4		4	2.45	56	84.14	15621
22-G9-AT-4	ATLAS	4	2.41	90	88.11	19970
23-G9-AT-4		4	2.45	90	79.51	16341
24-G9-AT-4		4	2.44	90	87.15	13944
26-G9-AT-4	ATLAS	4	2.42	180	114.08	15471
27-G9-AT-4		4	2.44	180	110.80	21029
10-G16-AT-5	ATLAS	5	2.47	7	65.64	13965
11-G16-AT-5		5	2.45	7	61.12	5669
12-G16-AT-5		5	2.46	7	68.47	12197
13-G16-AT-5	ATLAS	5	2.43	14	76.90	4663
14-G16-AT-5		5	2.43	14	66.15	16810
15-G16-AT-5		5	2.45	14	64.89	4712
28-G10-AT-5	ATLAS	5	2.44	28	79.22	2736
29-G10-AT-5		5	2.46	28	75.83	13589
30-G10-AT-5		5	2.45	28	70.17	21143
16-G16-AT-5	ATLAS	5	2.42	56	96.37	14650
17-G16-AT-5		5	2.42	56	82.79	14673
18-G16-AT-5		5	2.45	56	74.58	20629
31-G10-AT-5	ATLAS	5	2.45	90	101.86	15815
32-G10-AT-5		5	2.44	90	91.11	20785
33-G10-AT-5		5	2.46	90	96.01	15640
34-G10-AT-5	ATLAS	5	2.43	180	123.02	22384
35-G10-AT-5		5	2.45	180	132.93	15287

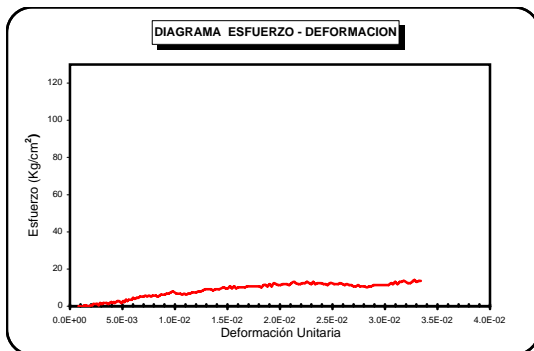


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

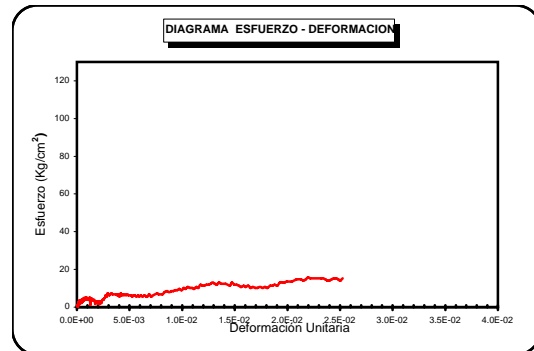
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

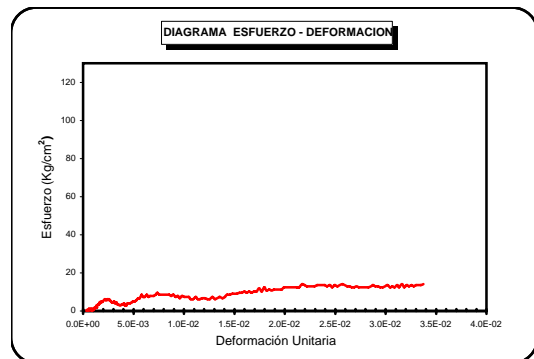
IDENTIFICACIÓN : 10-G2-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 14.15 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 808 Kg/cm²



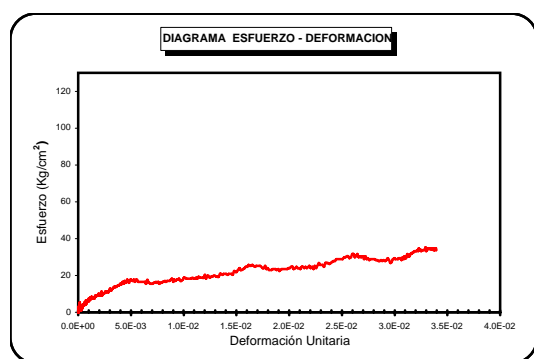
IDENTIFICACIÓN : 11-G2-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 18.67 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 980 Kg/cm²



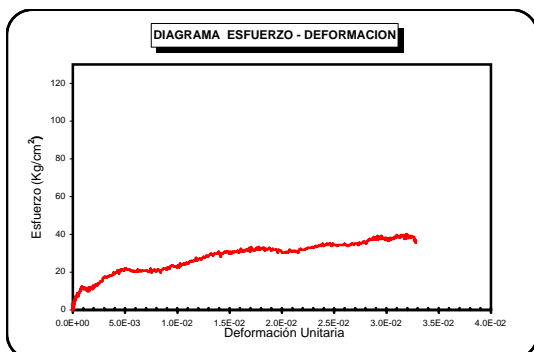
IDENTIFICACIÓN : 12-G2-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 14.15 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 1068 Kg/cm²



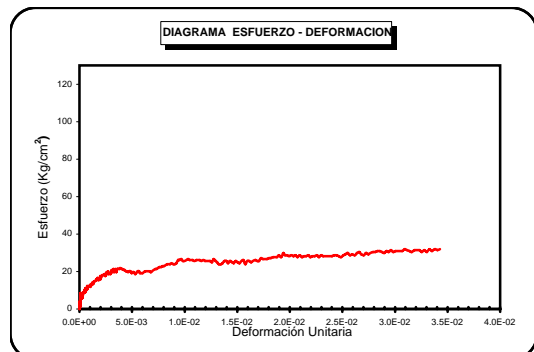
IDENTIFICACIÓN : 1-G11-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 37.97 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 3811 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 2-G11-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 40.23 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5786 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 3-G11-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 37.8 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5961 Kg/cm²



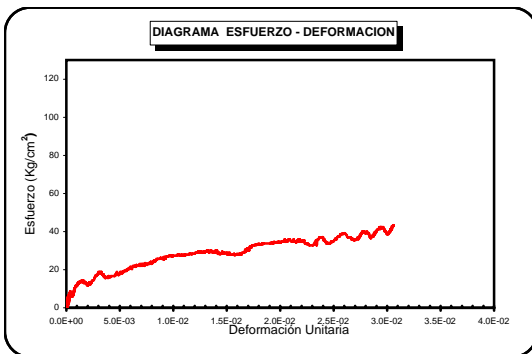


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

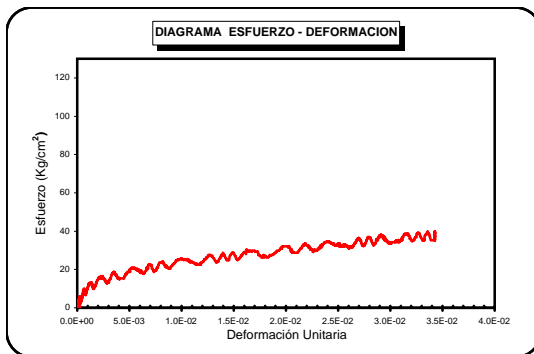
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

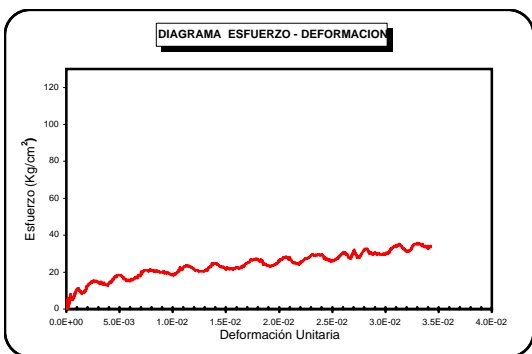
IDENTIFICACIÓN : 4-G11-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 44.49 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 6041 Kg/cm²



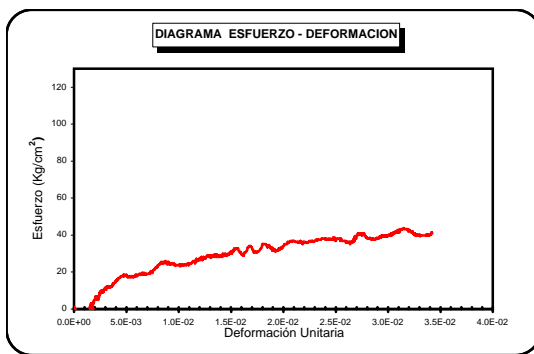
IDENTIFICACIÓN : 5-G11-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 39.73 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7619 Kg/cm²



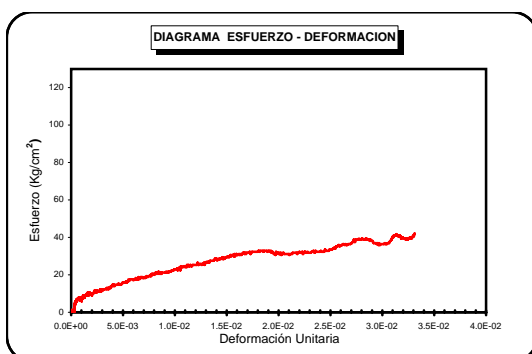
IDENTIFICACIÓN : 6-G11-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 38.37 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 6072 Kg/cm²



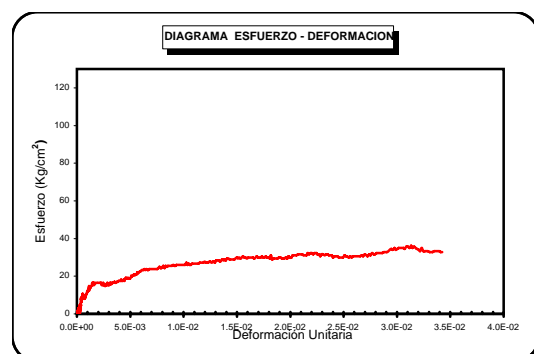
IDENTIFICACIÓN : 7-G11-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 44.42 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 3938 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 8-G11-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 45.84 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 2925 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 9-G11-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 36.22 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 6538 Kg/cm²



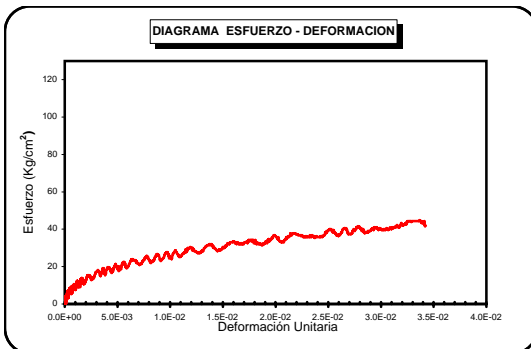


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

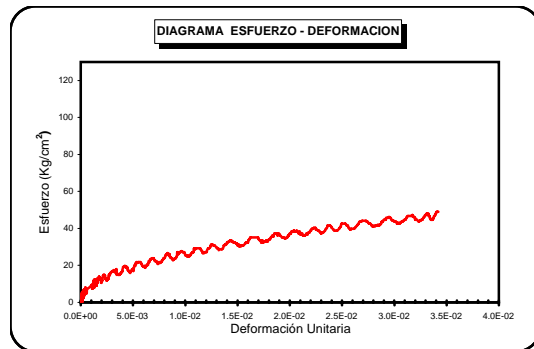
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

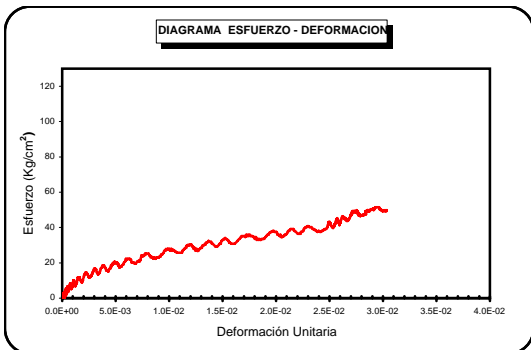
IDENTIFICACIÓN : 13-G2-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 55 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4076 Kg/cm²



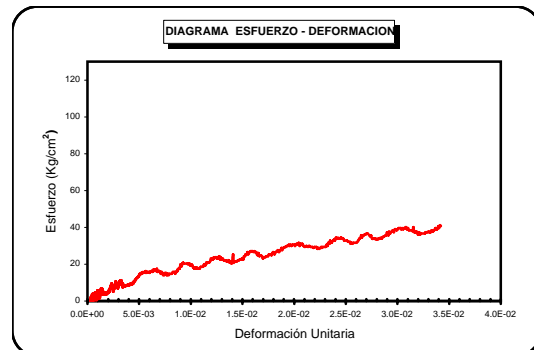
IDENTIFICACIÓN : 15-G2-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 54.78 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 3978 Kg/cm²



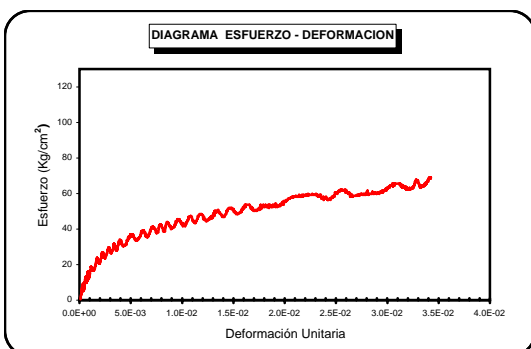
IDENTIFICACIÓN : 16-G2-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 51.5 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4253 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 17-G2-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 41.27 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 3917 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 18-G2-SOL-2
CEMENTO : SOL 2%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 71.81 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7450 Kg/cm²



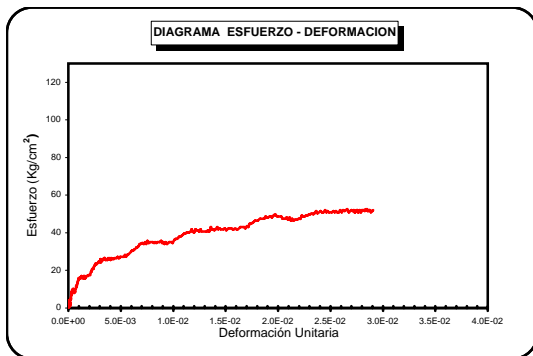


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

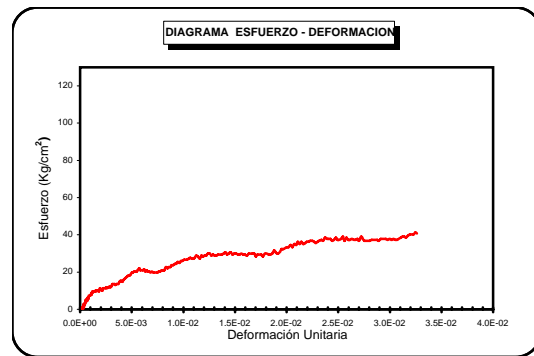
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO
CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

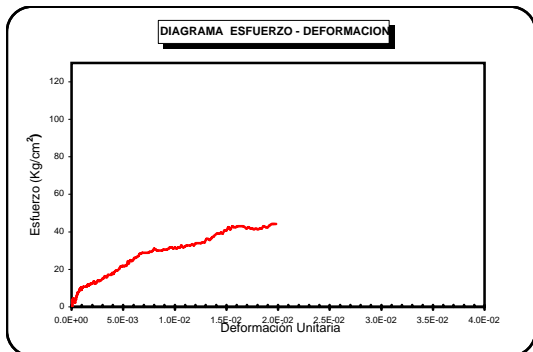
IDENTIFICACIÓN : 1-G1-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 52.63 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 9110 Kg/cm²



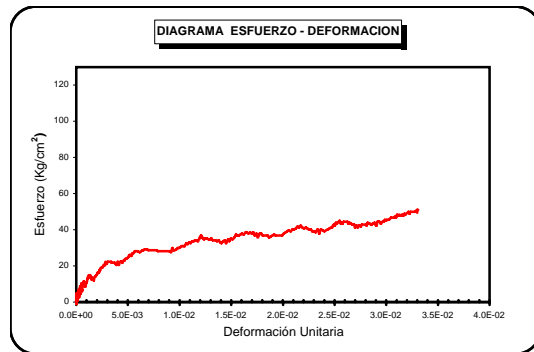
IDENTIFICACIÓN : 2-G1-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 41.31 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 3816 Kg/cm²



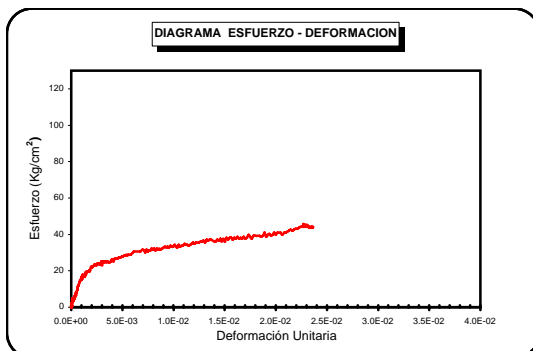
IDENTIFICACIÓN : 3-G1-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 44.14 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4385 Kg/cm²



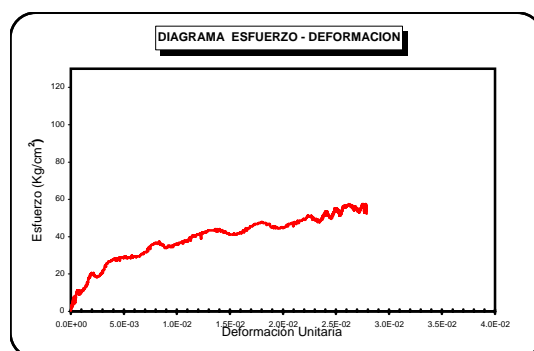
IDENTIFICACIÓN : 11-G12-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 54.27 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7509 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 12-G12-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 45.81 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 9070 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 13-G12-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 57.38 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7427 Kg/cm²



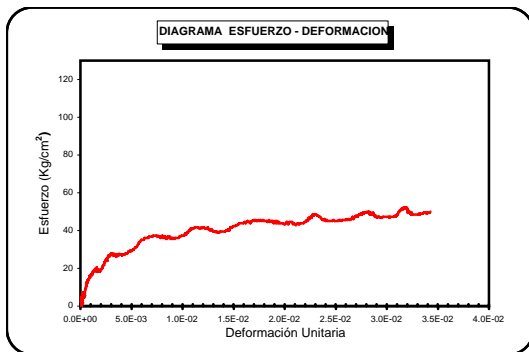


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

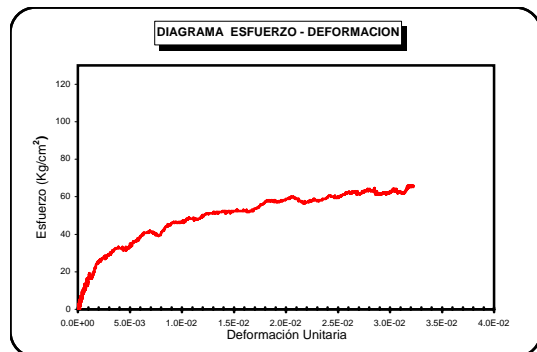
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

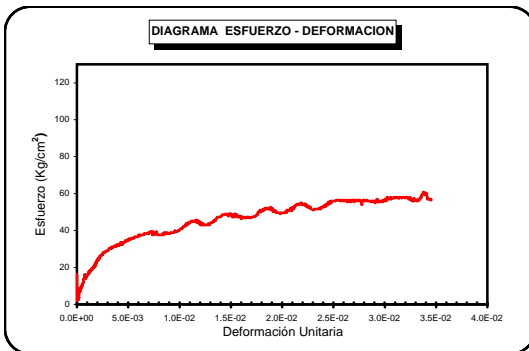
IDENTIFICACIÓN : 14-G12-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 53.42 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 9566 Kg/cm²



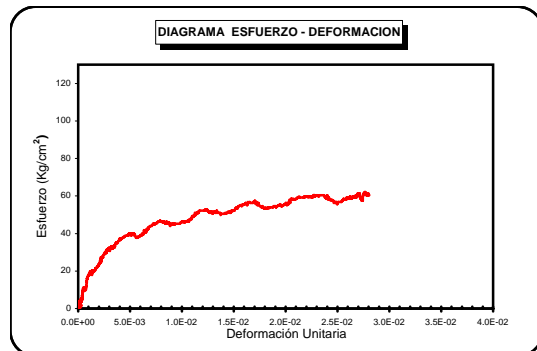
IDENTIFICACIÓN : 16-G12-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 65.81 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 10624 Kg/cm²



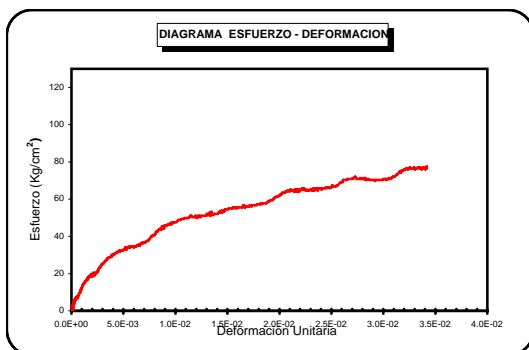
IDENTIFICACIÓN : 17-G12-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 60.83 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 10380 Kg/cm²



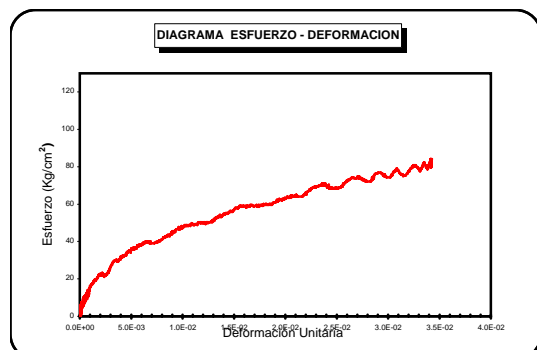
IDENTIFICACIÓN : 18-G12-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 62.08 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 11600 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 5-G1-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 84.49 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 6288 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 6-G1-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 84.03 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7338 Kg/cm²





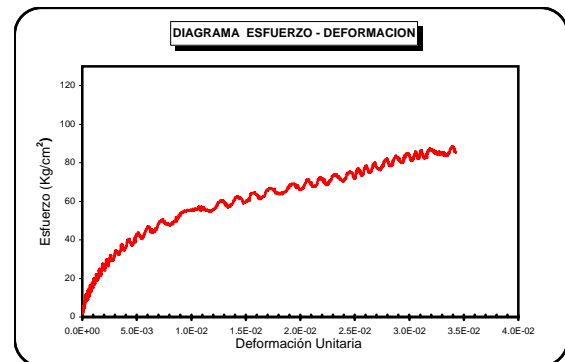
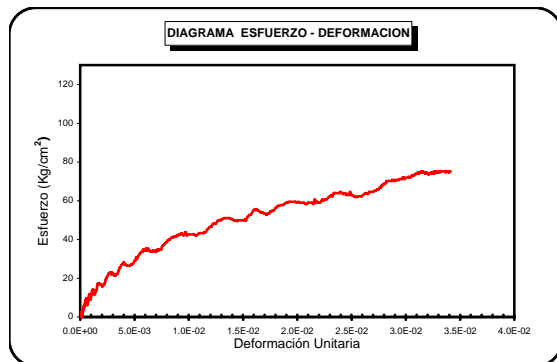
MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO
CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

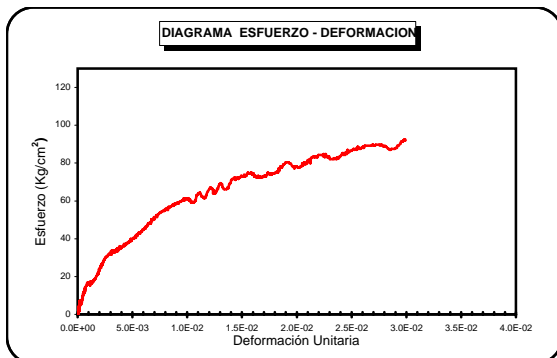
TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

IDENTIFICACIÓN : 7-G1-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 81.94 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5938 Kg/cm²

IDENTIFICACIÓN : 8-G1-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 89.13 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 10003 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 9-G1-SOL-3
CEMENTO : SOL 3%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 95.18 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 8288 Kg/cm²



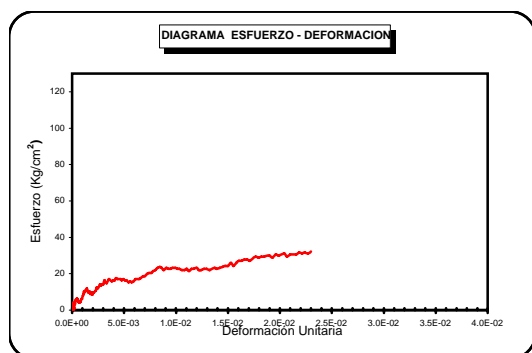


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

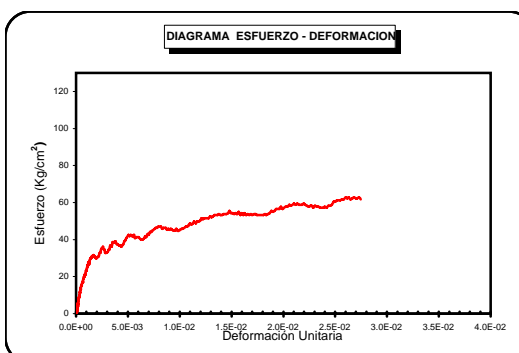
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

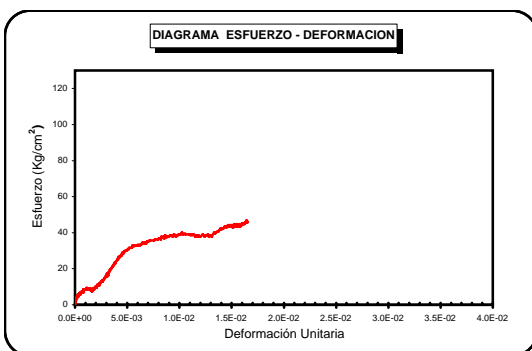
IDENTIFICACIÓN : 19-G3-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 32.26 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5208 Kg/cm²



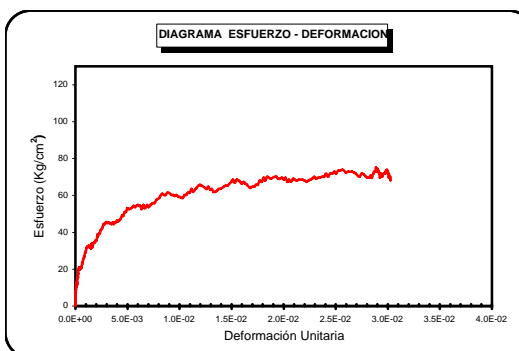
IDENTIFICACIÓN : 20-G3-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 62.81 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 23663 Kg/cm²



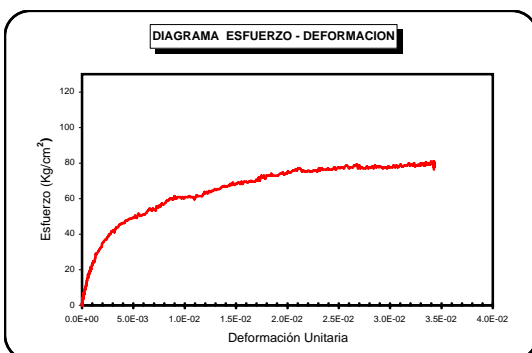
IDENTIFICACIÓN : 22-G3-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 46.97 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 6413 Kg/cm²



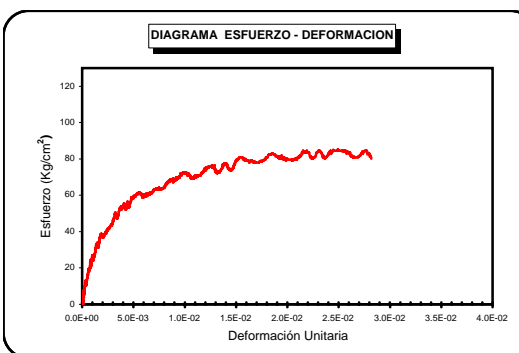
IDENTIFICACIÓN : 19-G13-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 75.09 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15517 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 20-G13-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 81.03 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 16000 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 22-G13-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 85.17 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 19865 Kg/cm²



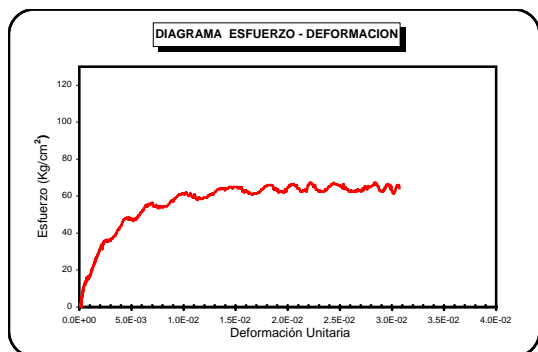


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

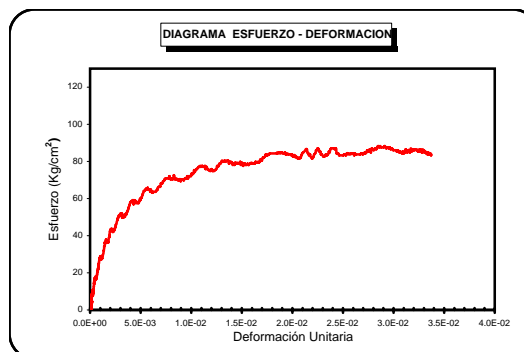
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO
CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

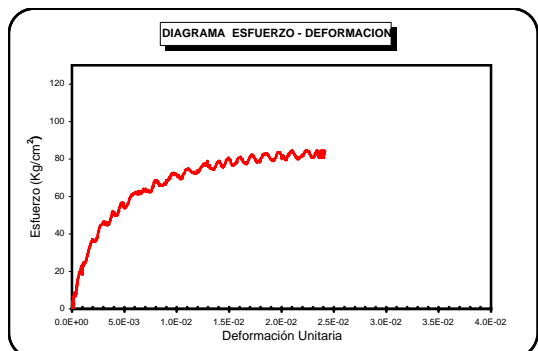
IDENTIFICACIÓN : 23-G13-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 67.11 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 16738 Kg/cm²



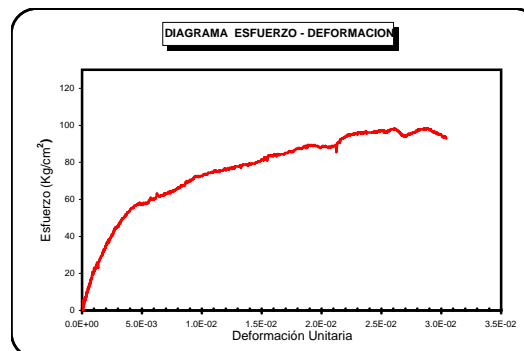
IDENTIFICACIÓN : 24-G13-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 86.22 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 21042 Kg/cm²



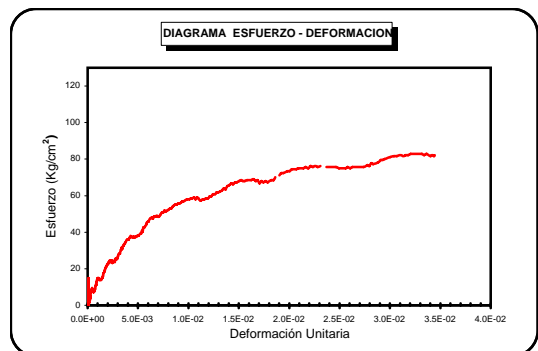
IDENTIFICACIÓN : 25-G13-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 84.6 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 19835 Kg/cm²



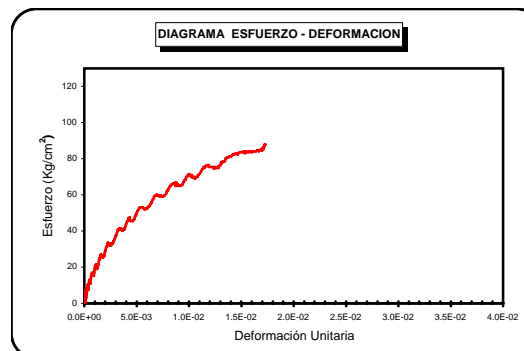
IDENTIFICACIÓN : 26-G13-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 98.41 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 16304 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 27-G13-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 82.6 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 9520 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 23-G3-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 87.86 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 12240 Kg/cm²





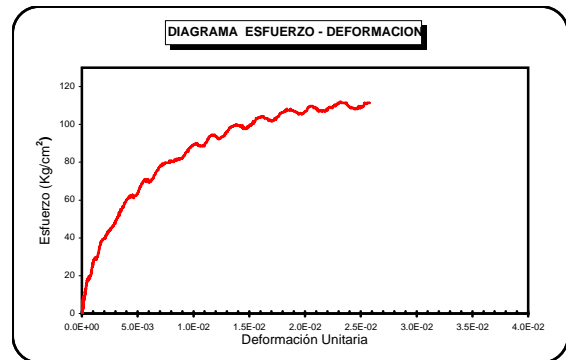
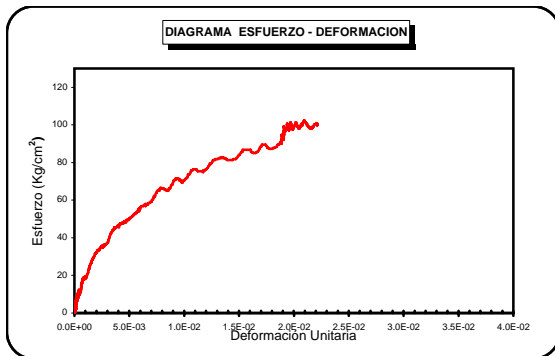
MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

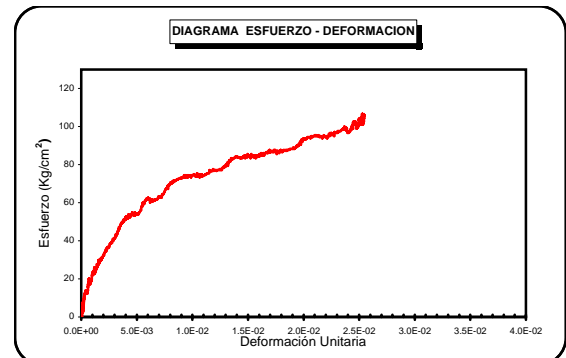
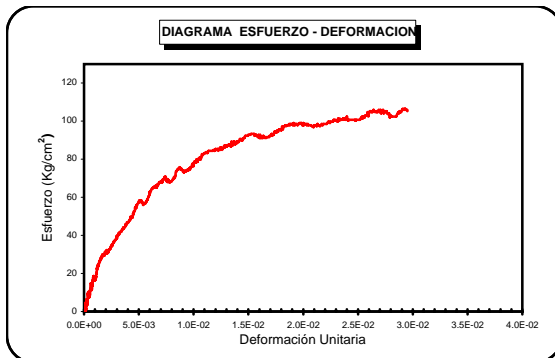
IDENTIFICACIÓN : 24-G3-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 102.43 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 12860 Kg/cm²

IDENTIFICACIÓN : 25-G3-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 111.93 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 17908 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 26-G6-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 106.44 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 13599 Kg/cm²

IDENTIFICACIÓN : 27-G3-SOL-4
CEMENTO : SOL 4%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 106.67 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15546 Kg/cm²



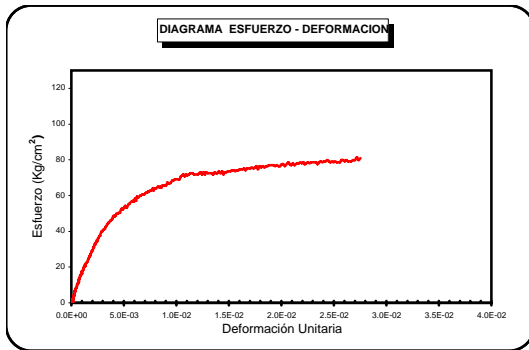


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

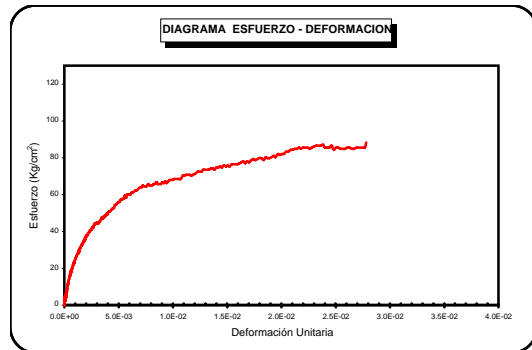
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

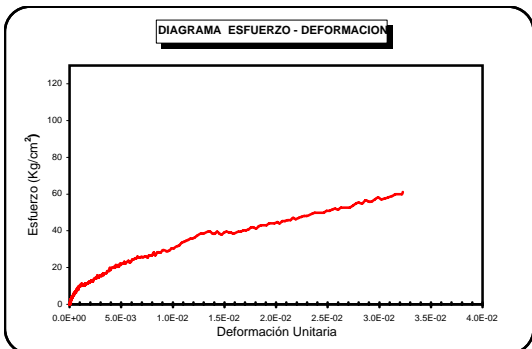
IDENTIFICACIÓN : 29-G4-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 81.49 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 14681 Kg/cm²



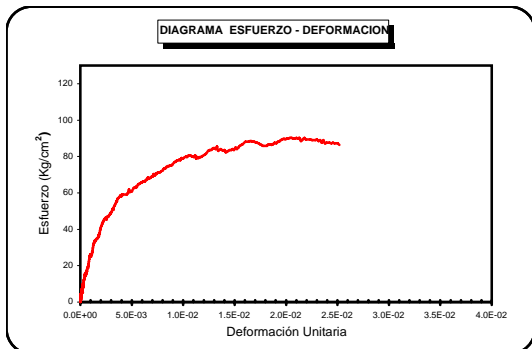
IDENTIFICACIÓN : 30-G4-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 88.28 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 20112 Kg/cm²



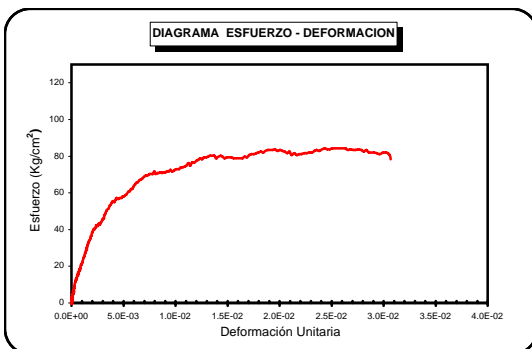
IDENTIFICACIÓN : 31-G4-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 60.51 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 3944 Kg/cm²



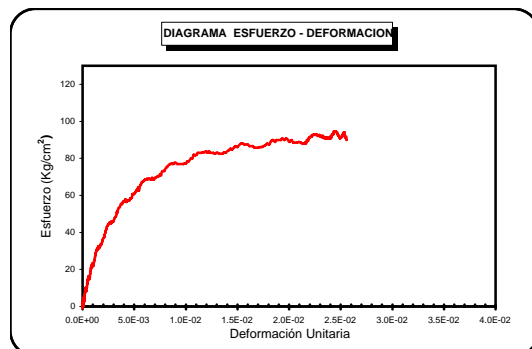
IDENTIFICACIÓN : 1-G15-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 90.32 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 21200 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 2-G15-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 84.29 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 19882 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 3-G15-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 94.48 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 17862 Kg/cm²



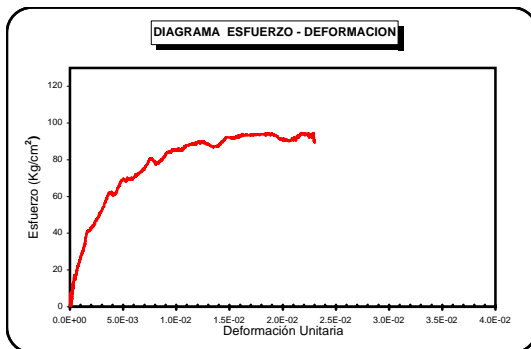


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

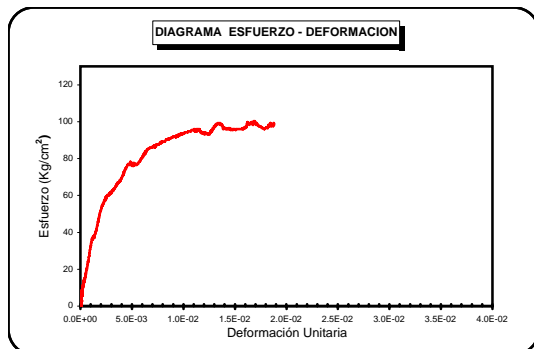
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

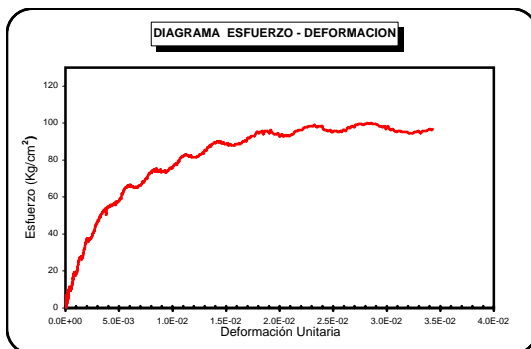
IDENTIFICACIÓN : 4-G15-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 94.45 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 25200 Kg/cm²



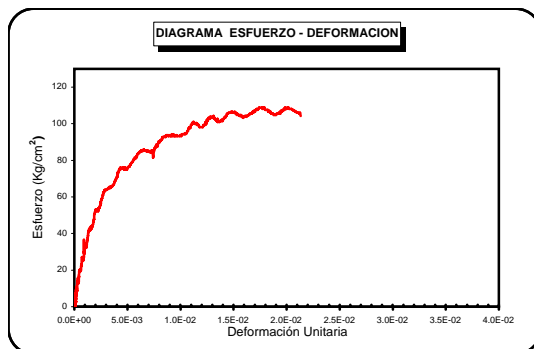
IDENTIFICACIÓN : 5-G15-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 100.39 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 25000 Kg/cm²



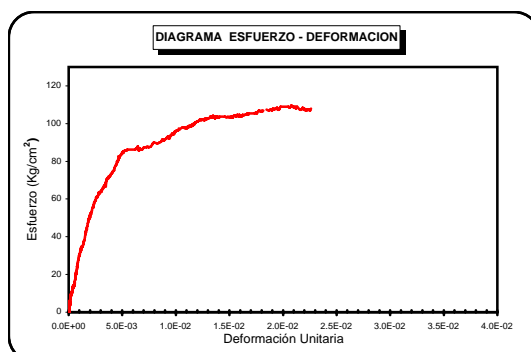
IDENTIFICACIÓN : 6-G15-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 100.05 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15685 Kg/cm²



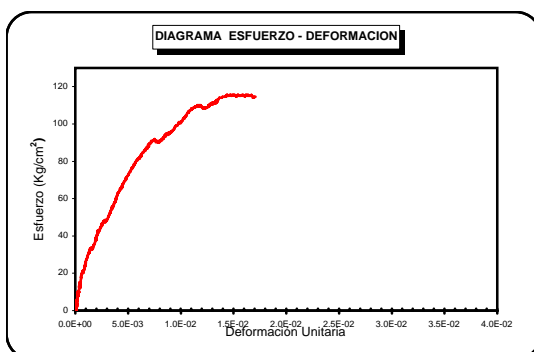
IDENTIFICACIÓN : 7-G15-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 108.76 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 25853 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 8-G15-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 109.56 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 22841 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 32-G4-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 115.67 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 23508 Kg/cm²





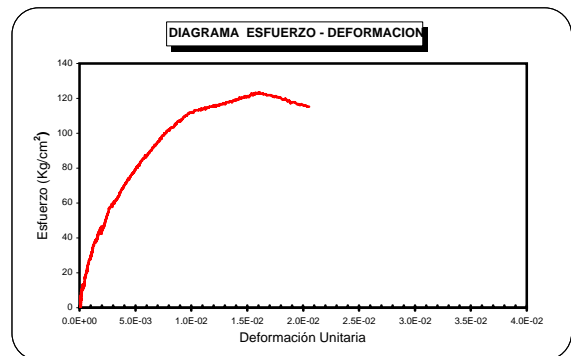
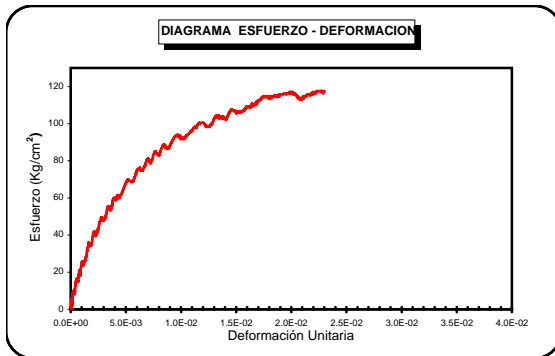
MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

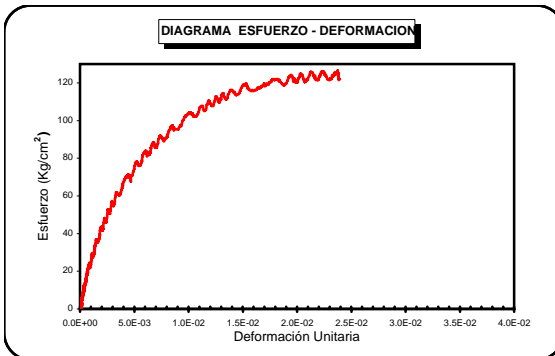
TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

IDENTIFICACIÓN : 33-G4-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 117.53 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 21890 Kg/cm²

IDENTIFICACIÓN : 34-G4-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 124.01 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 23607 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 36-G4-SOL-5
CEMENTO : SOL 5%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 126.53 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 24200 Kg/cm²



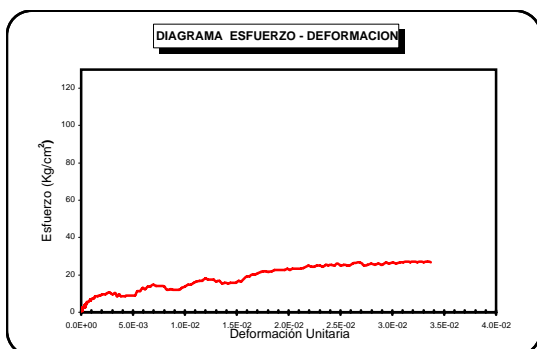


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

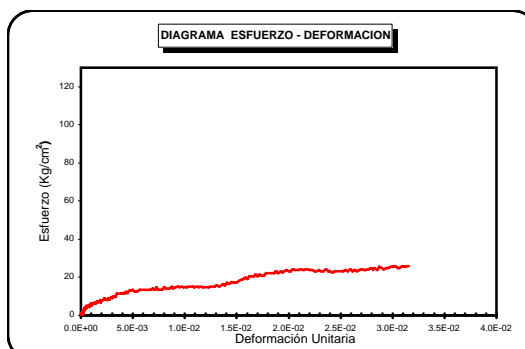
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

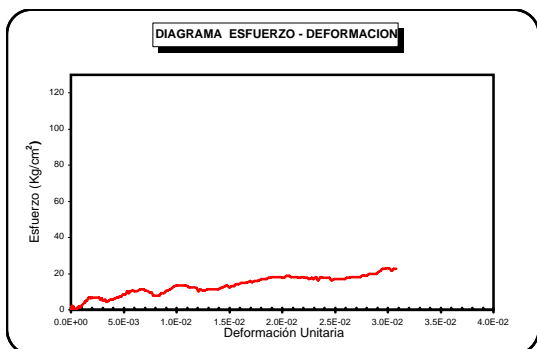
IDENTIFICACIÓN : 1-G7-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 27.16 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 3981 Kg/cm²



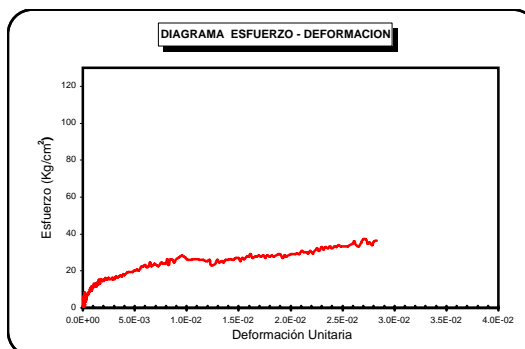
IDENTIFICACIÓN : 2-G7-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 26.03 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 3184 Kg/cm²



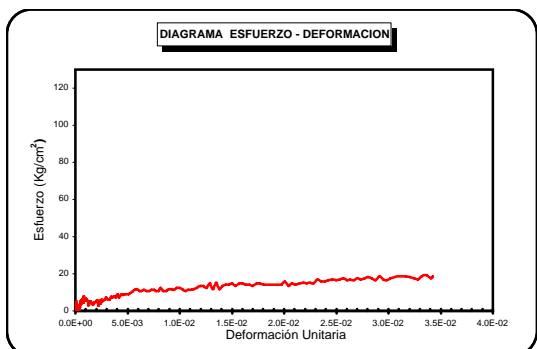
IDENTIFICACIÓN : 3-G7-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 23.2 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 1920 Kg/cm²



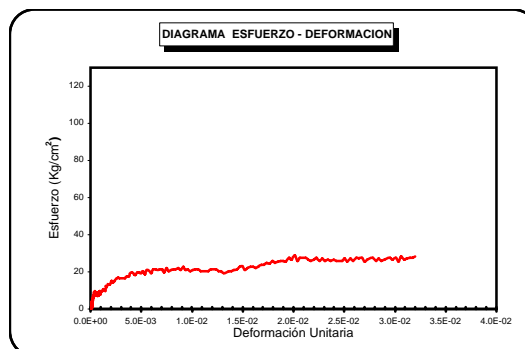
IDENTIFICACIÓN : 19-G5-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 37.18 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4755 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 20-G5-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 19.24 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 2513 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 21-G5-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 28.86 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4300 Kg/cm²



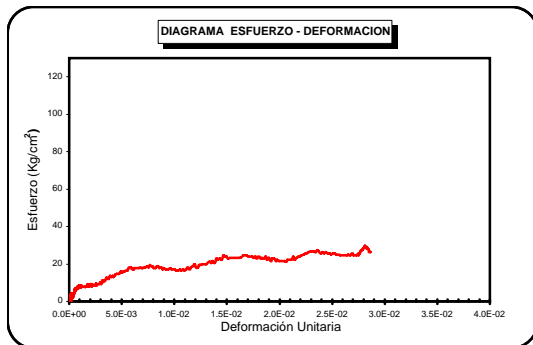


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

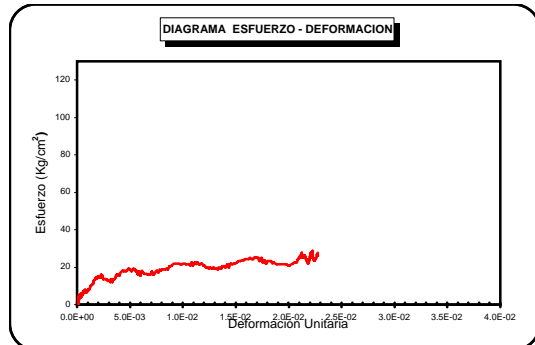
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO
CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

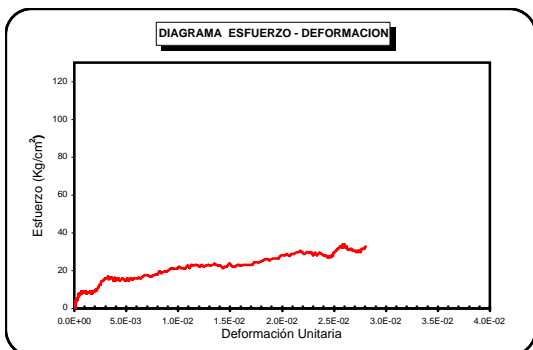
IDENTIFICACIÓN : 22-G5-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 37.01 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4289 Kg/cm²



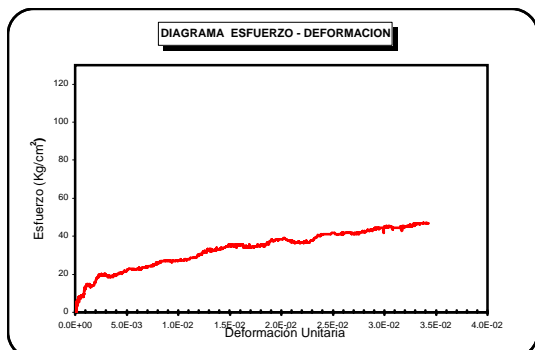
IDENTIFICACIÓN : 23-G5-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 34.54 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5300 Kg/cm²



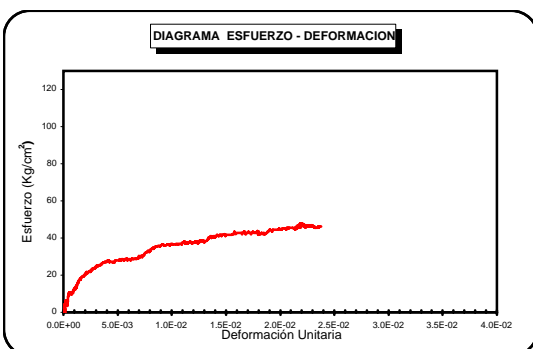
IDENTIFICACIÓN : 24-G5-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 36.36 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5112 Kg/cm²



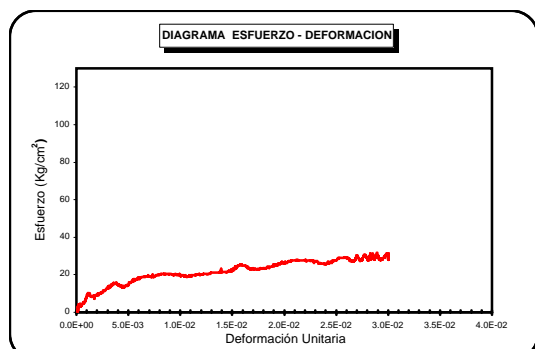
IDENTIFICACIÓN : 4-G7-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 47.19 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 8443 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 5-G7-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 51.33 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 10317 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 6-G7-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 31.7 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4325 Kg/cm²



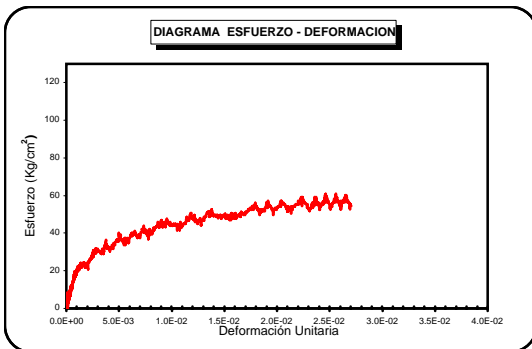


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

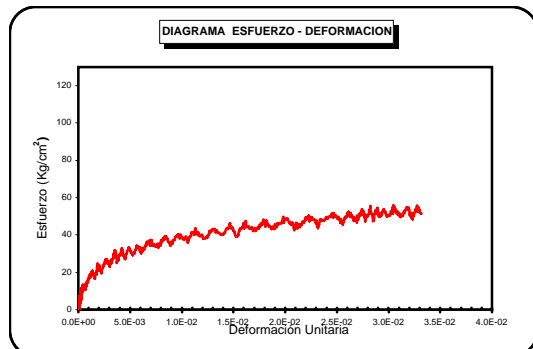
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO
CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

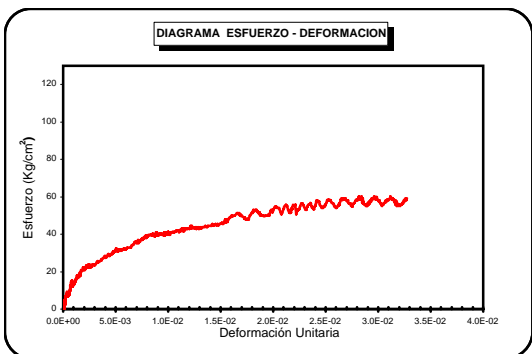
IDENTIFICACIÓN : 7-G7-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 60.89 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 17208 Kg/cm²



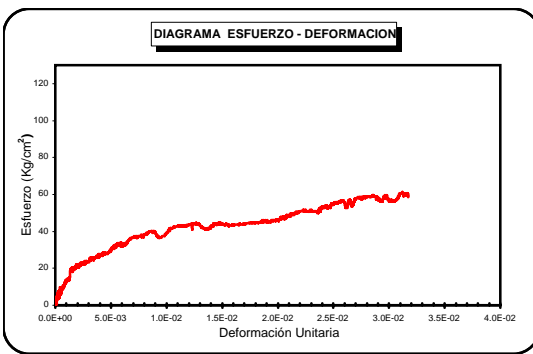
IDENTIFICACIÓN : 8-G7-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 55.97 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 12833 Kg/cm²



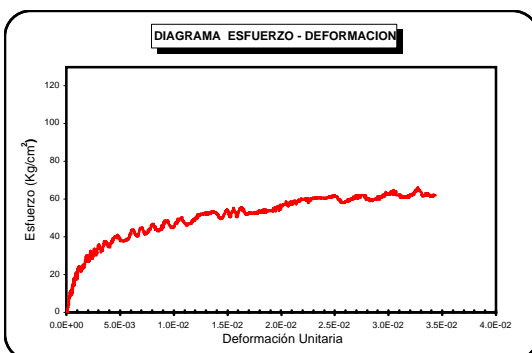
IDENTIFICACIÓN : 9-G7-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 60.27 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 8525 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 25-G5-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 61.34 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7877 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 26-G5-AT-2
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 67.74 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15154 Kg/cm²



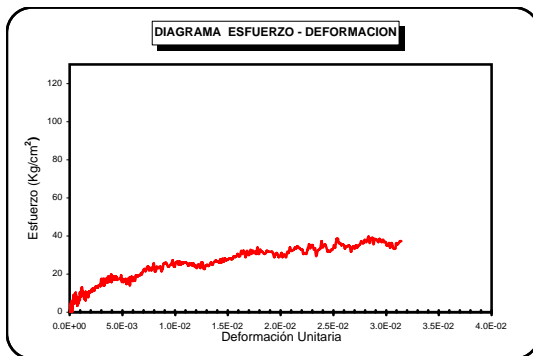


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

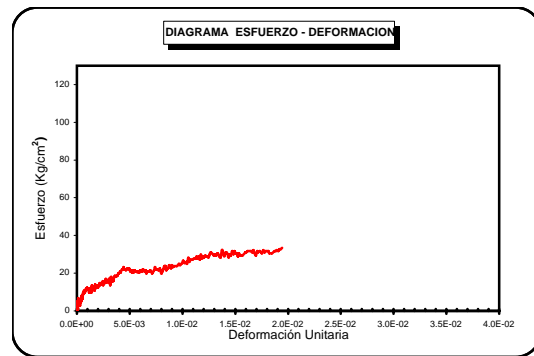
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

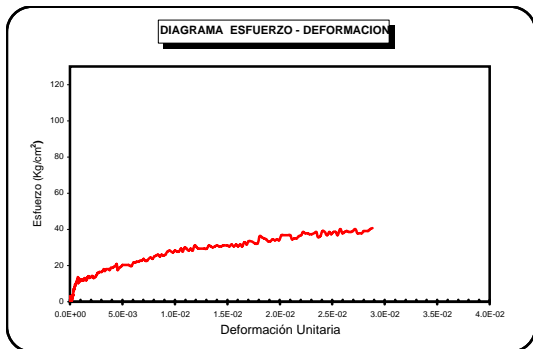
IDENTIFICACIÓN : 28-G6-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 39.61 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4970 Kg/cm²



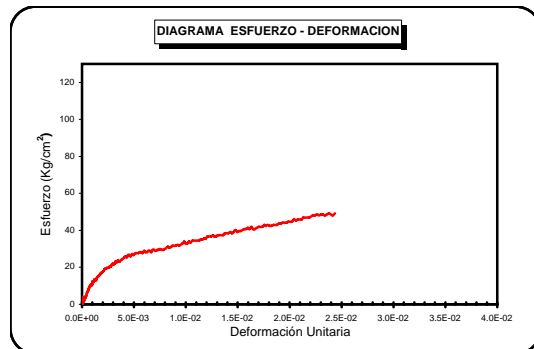
IDENTIFICACIÓN : 29-G6-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 33.39 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 6430 Kg/cm²



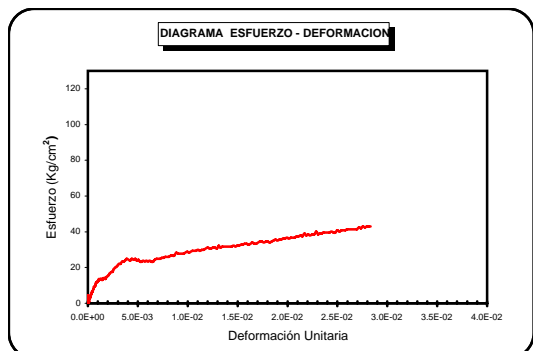
IDENTIFICACIÓN : 31-G6-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 39.18 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5840 Kg/cm²



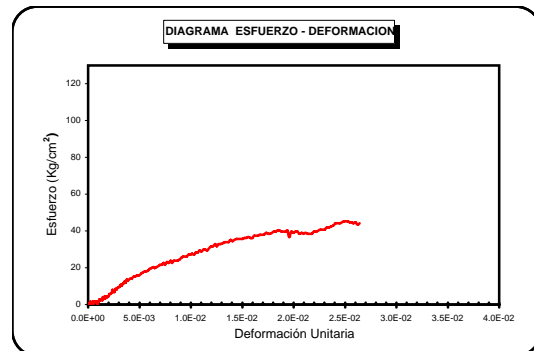
IDENTIFICACIÓN : 10-G8-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 49.23 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 8485 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 11-G8-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 43.01 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7509 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 17-G8-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 45.25 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 3275 Kg/cm²



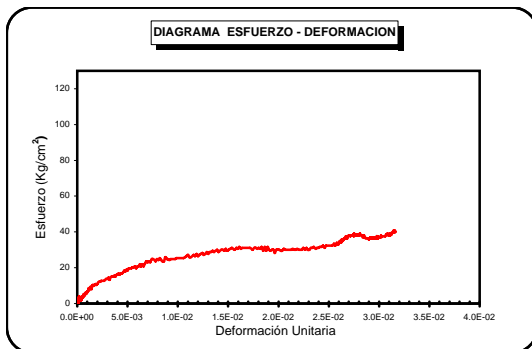


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

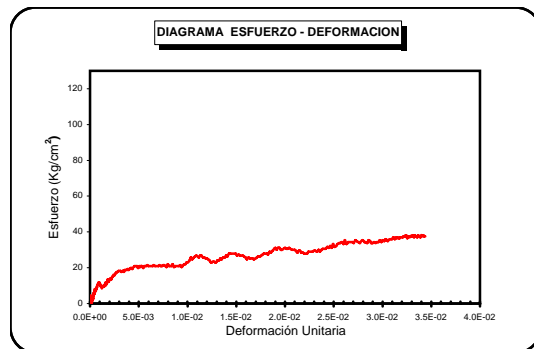
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

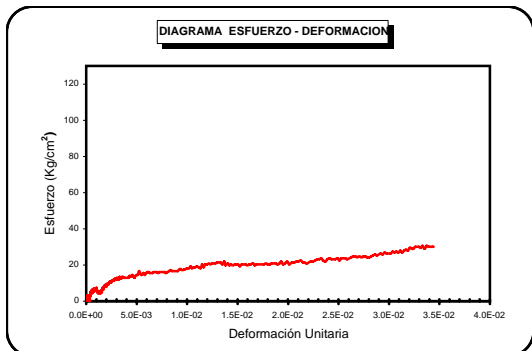
IDENTIFICACIÓN : 32-G6-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 47.84 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5986 Kg/cm²



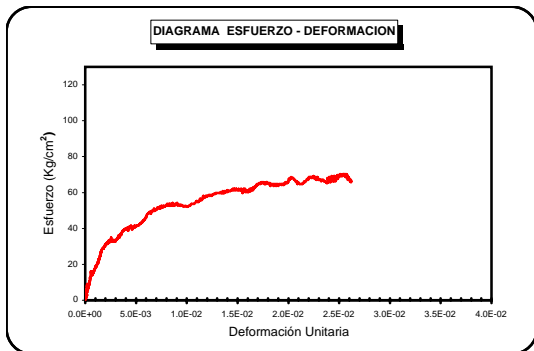
IDENTIFICACIÓN : 33-G6-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 37.95 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7263 Kg/cm²



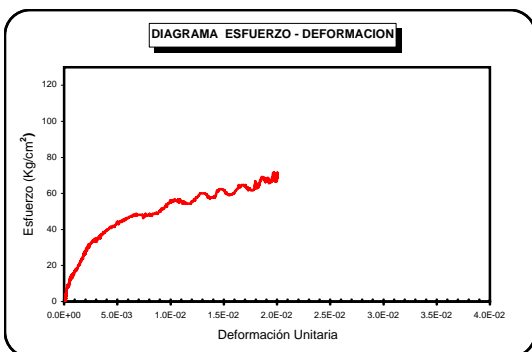
IDENTIFICACIÓN : 34-G6-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 32.15 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5413 Kg/cm²



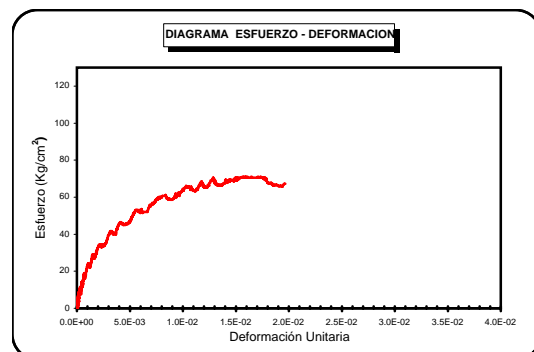
IDENTIFICACIÓN : 12-G8-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 70.28 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 16291 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 16-G8-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 70.36 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 11361 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 18-G8-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 71.13 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 10487 Kg/cm²



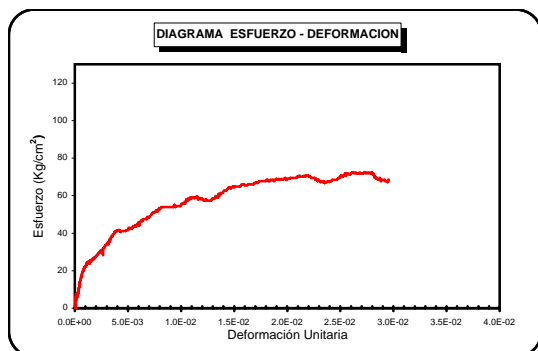


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

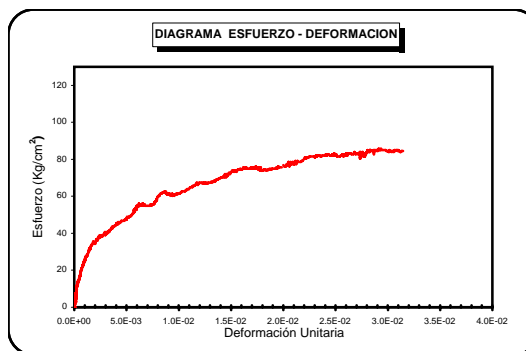
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

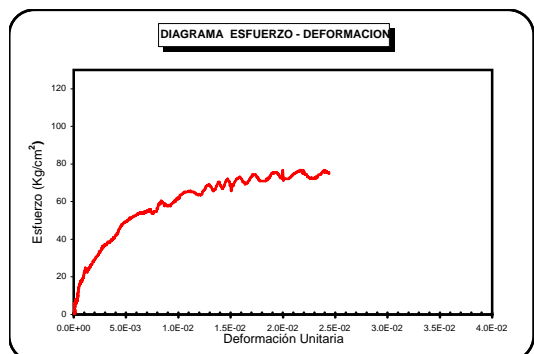
IDENTIFICACIÓN : 13-G8-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 70.74 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 13168 Kg/cm²



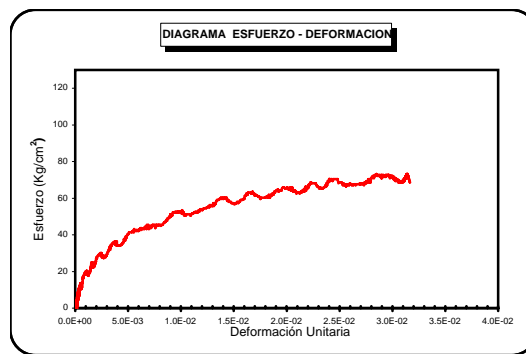
IDENTIFICACIÓN : 14-G8-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 78.6 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 20152 Kg/cm²



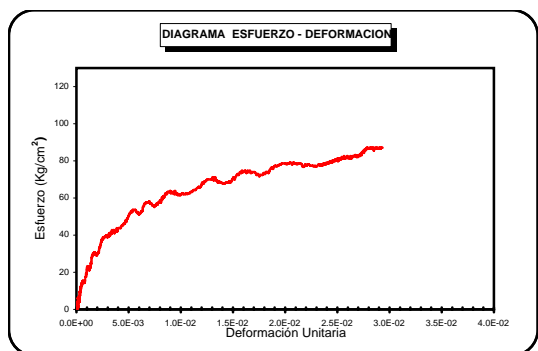
IDENTIFICACIÓN : 15-G8-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 73.85 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 14552 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 35-G6-AT-3
CEMENTO : ATLAS 3%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 73.25 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 9847 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 36-G6-AT-3
CEMENTO : ATLAS 2%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 87.15 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15710 Kg/cm²



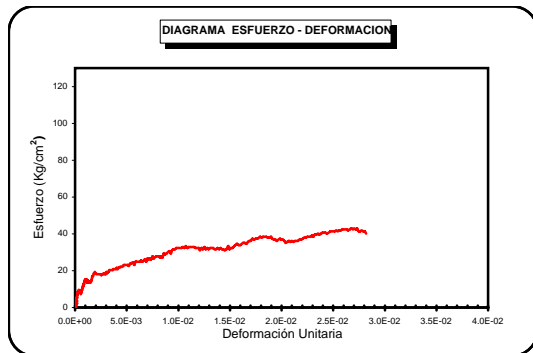


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

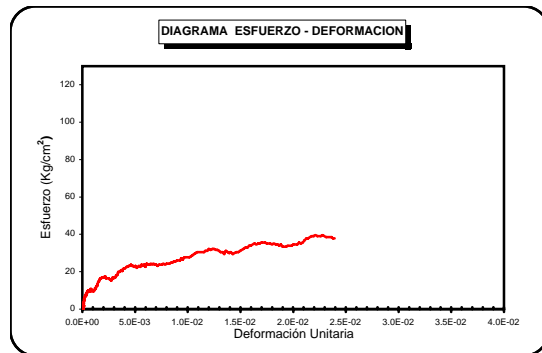
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

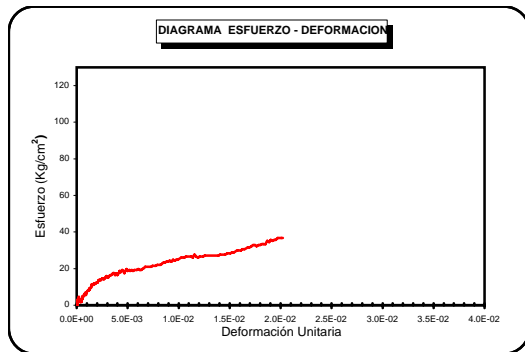
IDENTIFICACIÓN : 28-G14-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 43.01 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7854 Kg/cm²



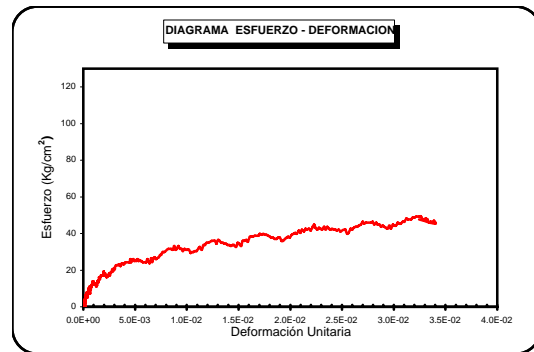
IDENTIFICACIÓN : 29-G14-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 39.61 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 6140 Kg/cm²



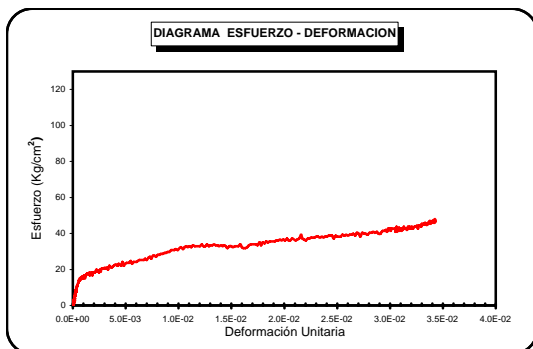
IDENTIFICACIÓN : 30-G14-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 36.78 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5837 Kg/cm²



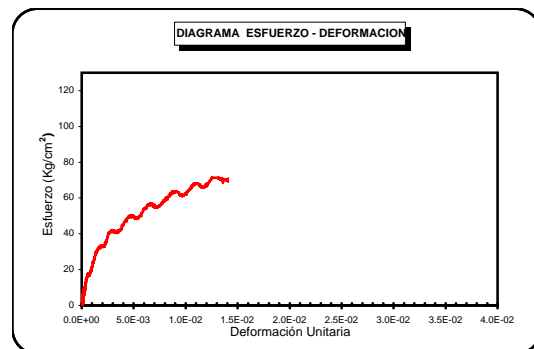
IDENTIFICACIÓN : 31-G14-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 54.83 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 7141 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 33-G14-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 49.06 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 8121 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 19-G9-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 69.15 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15226 Kg/cm²



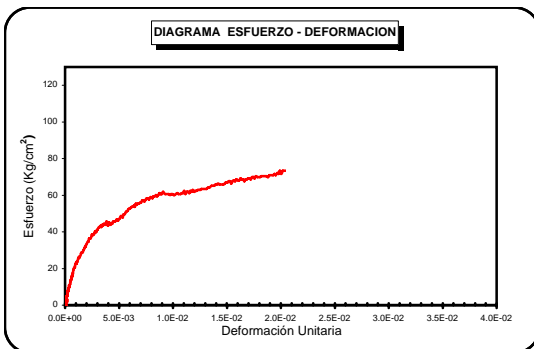


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

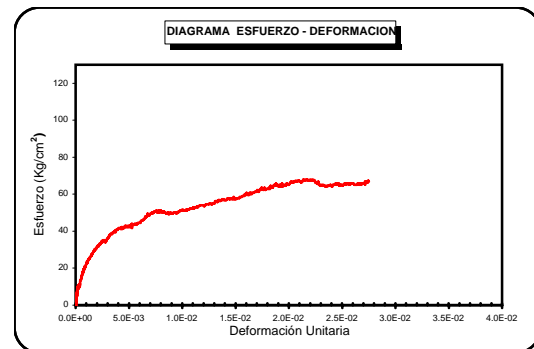
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO
CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

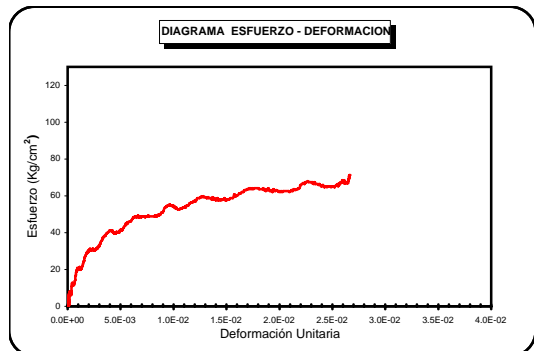
IDENTIFICACIÓN : 20-G9-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 65.41 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 17610 Kg/cm²



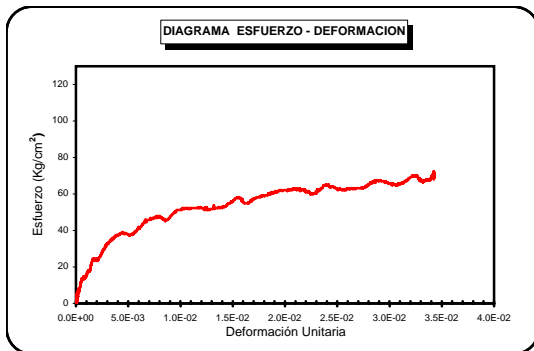
IDENTIFICACIÓN : 21-G9-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 66.77 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15316 Kg/cm²



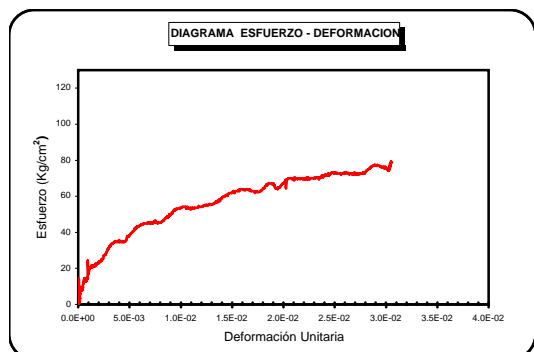
IDENTIFICACIÓN : 34-G14-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 72.38 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 17638 Kg/cm²



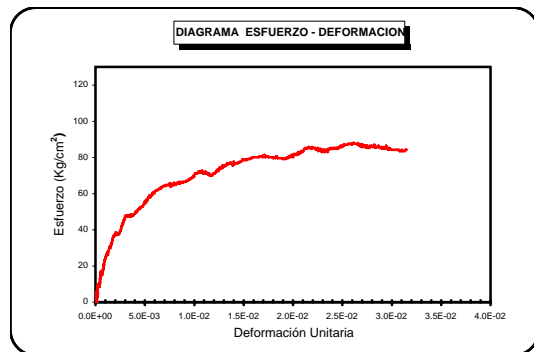
IDENTIFICACIÓN : 35-G14-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 72.38 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 13877 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 36-G14-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 80.75 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15621 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 22-G9-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 88.11 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 19970 Kg/cm²





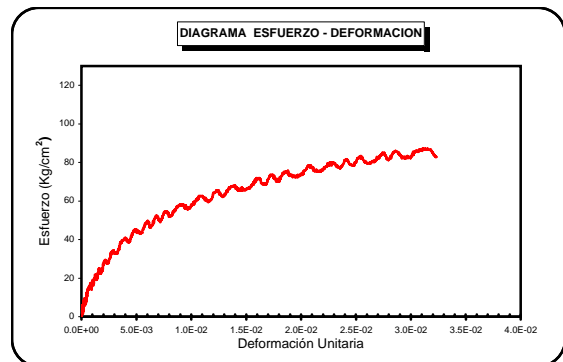
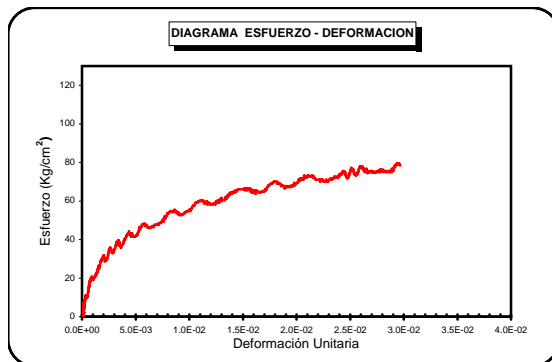
MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO
CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

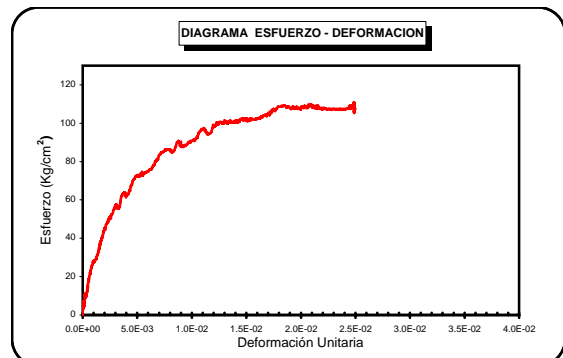
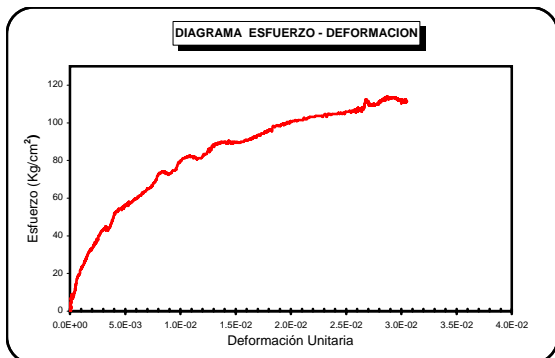
IDENTIFICACIÓN : 23-G9-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 79.51 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 16241 Kg/cm²

IDENTIFICACIÓN : 24-G9-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 87.15 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 13944 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 26-G9-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 114.08 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15471 Kg/cm²

IDENTIFICACIÓN : 27-G9-AT-4
CEMENTO : ATLAS 4%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 110.8 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 21029 Kg/cm²



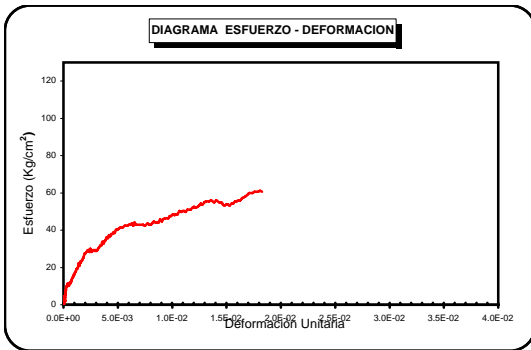


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

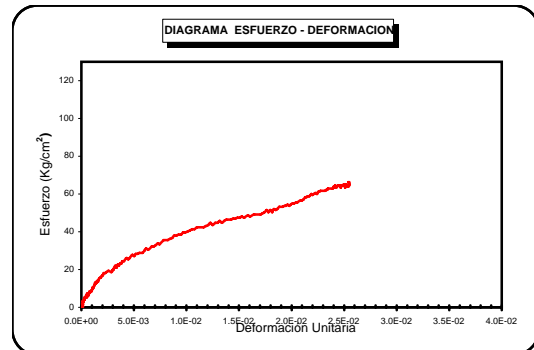
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

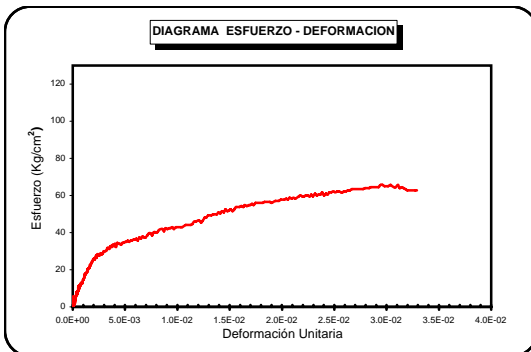
IDENTIFICACIÓN : 10-G16-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 62.23 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 13965 Kg/cm²



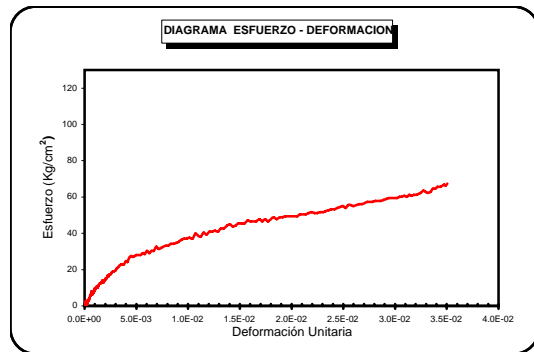
IDENTIFICACIÓN : 11-G16-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 61.12 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 5669 Kg/cm²



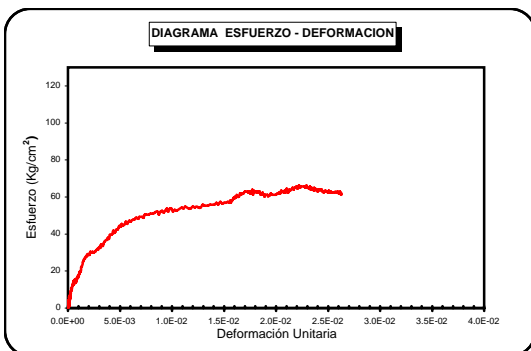
IDENTIFICACIÓN : 12-G16-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 7 DÍAS
RESISTENCIA : 62.3 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 12197 Kg/cm²



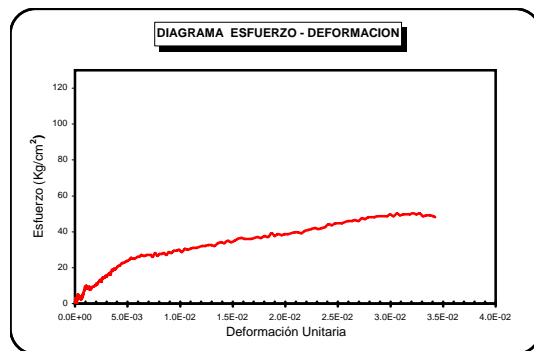
IDENTIFICACIÓN : 13-G16-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 63.8 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4663 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 14-G16-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 66.15 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 16810 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 15-G16-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 14 DÍAS
RESISTENCIA : 49.8 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 4712 Kg/cm²



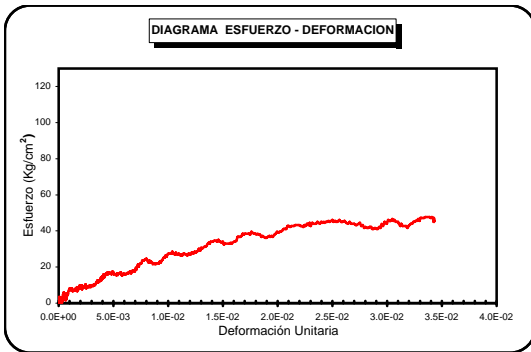


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

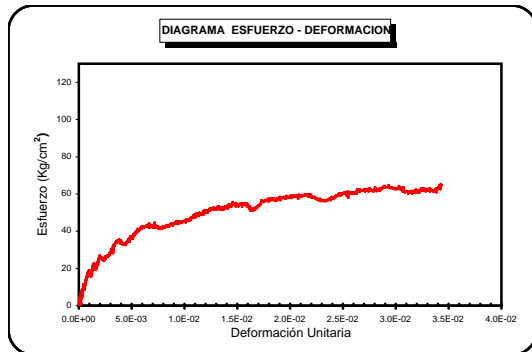
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO
CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

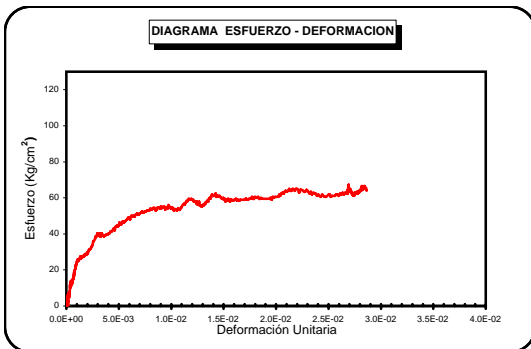
IDENTIFICACIÓN : 28-G10-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 43.8 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 2736 Kg/cm²



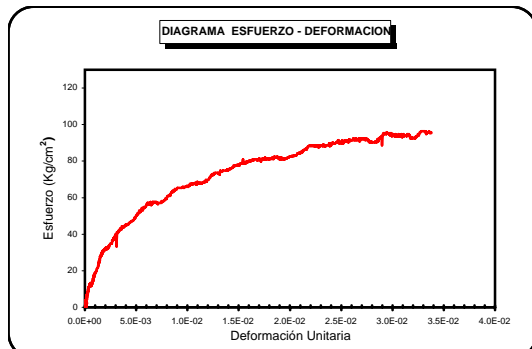
IDENTIFICACIÓN : 29-G10-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 65.42 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 13589 Kg/cm²



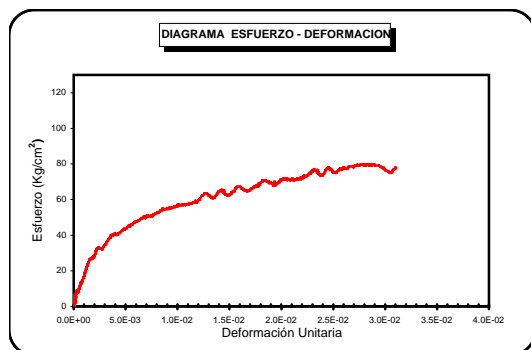
IDENTIFICACIÓN : 30-G10-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 28 DÍAS
RESISTENCIA : 67.23 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 21143 Kg/cm²



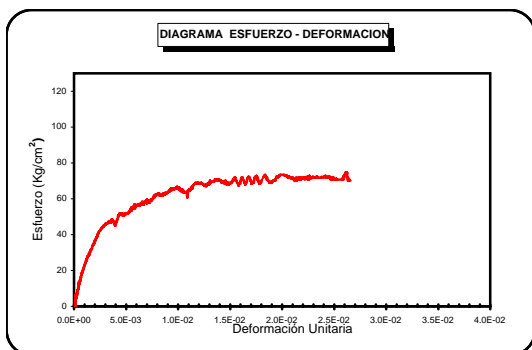
IDENTIFICACIÓN : 16-G16-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 96.37 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 14650 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 17-G16-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 79.66 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 14673 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 18-G16-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 56 DÍAS
RESISTENCIA : 74.58 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 20629 Kg/cm²



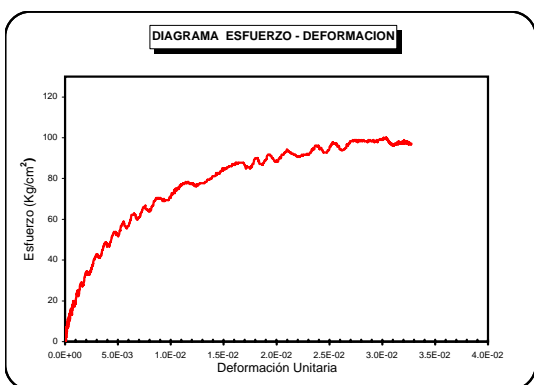


MÓDULO DE ELASTICIDAD DE CCR EN COMPRESIÓN

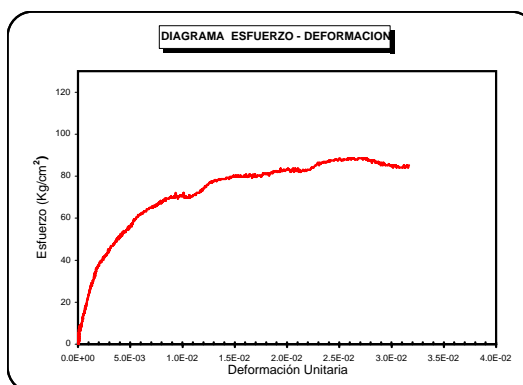
TESIS : DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO UTILIZANDO
CONCEPTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

TESISTA : ING. MIRIAM ROSANNA ESCALAYA ADVÍNCULA

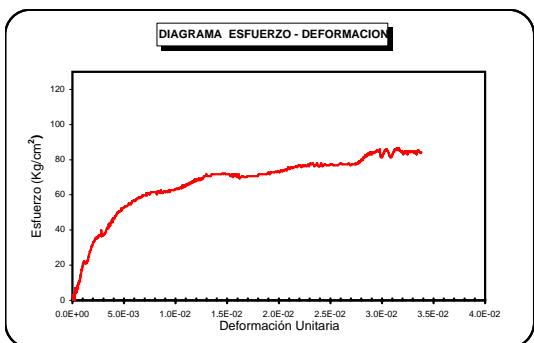
IDENTIFICACIÓN : 31-G10-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 99.99 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15815 Kg/cm²



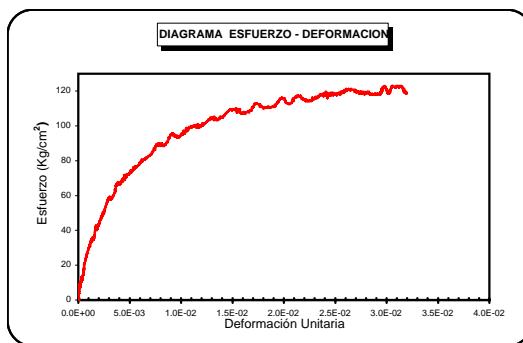
IDENTIFICACIÓN : 32-G10-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 88.56 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 20785 Kg/cm²



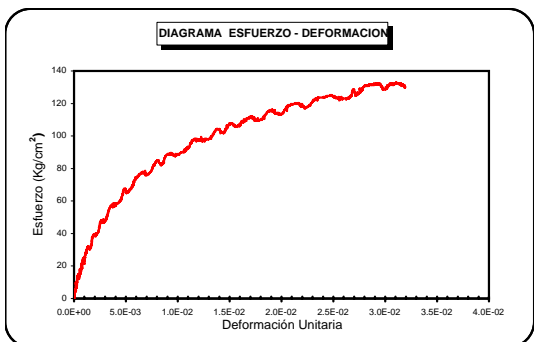
IDENTIFICACIÓN : 33-G10-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 90 DÍAS
RESISTENCIA : 86.52 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15640 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 34-G10-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 123.02 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 22384 Kg/cm²



IDENTIFICACIÓN : 35-G10-AT-5
CEMENTO : ATLAS 5%
EDAD DE ENSAYO : 180 DÍAS
RESISTENCIA : 132.93 Kg/cm²
MOD.ELASTICIDAD : 15287 Kg/cm²



ANEXO III

PANEL FOTOGRAFICO

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD



FOTO Nº 1 : Mezcla del agregado con el cemento para la realización del ensayo Proctor Modificado. El porcentaje de cemento utilizado fue con respecto al peso seco de los agregados.

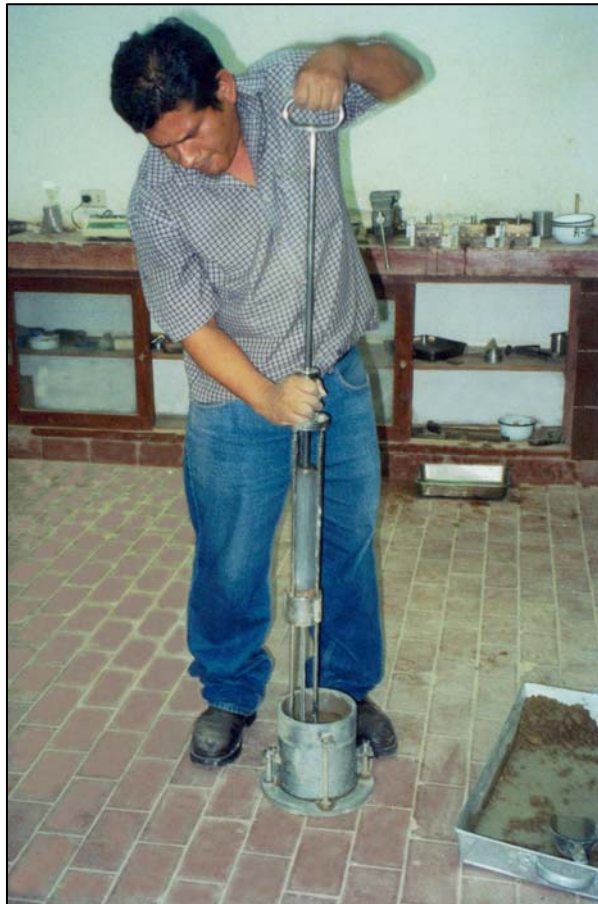


FOTO Nº 2 : Determinación del contenido de humedad mediante el ensayo Proctor Modificado, según Norma ASTM D 1557. Apisonado del material con el martillo estándar de 10 lb.



FOTO N° 3 : Obtención del peso del molde con la mezcla compactada, después de haber sido enrasado.



FOTO N° 4 : Toma de muestras representativas para la obtención del contenido de humedad de la mezcla utilizada en el ensayo Proctor Modificado.

DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS Y TIEMPO DE COMPACTACIÓN A SER EMPLEADO EN LA ELABORACIÓN DE PROBETAS



Foto Nº 5 : Probetas elaboradas mediante la compactación del CCR con un martillo Hilti en 3 capas, utilizándose los tiempos de compactación de 10, 15, 20 y 25 segundos para cada una de las capas. Las probetas se realizaron para la obtención de su densidad, proporcionarle un puntaje de apariencia y determinar el porcentaje del material averiado después del proceso de compactación.



Foto Nº 6 : Probetas elaboradas mediante la compactación del CCR con un martillo Hilti en 4 capas, utilizándose los tiempos de compactación de 10, 15, 20 y 25 segundos para cada una de las capas. Las probetas se realizaron para la obtención de su densidad, proporcionarle un puntaje de apariencia y determinar el porcentaje del material averiado después del proceso de compactación.

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



Foto N° 7 : CCR luego de ser vaciado de la mezcladora. El tamaño máximo de agregado utilizado fue de 1 ½ pulg. Se observa la consistencia seca de la mezcla.



Foto N° 8 : Posteriormente el CCR es vaciado sobre una superficie impermeable y se procede a mezclar en forma manual.

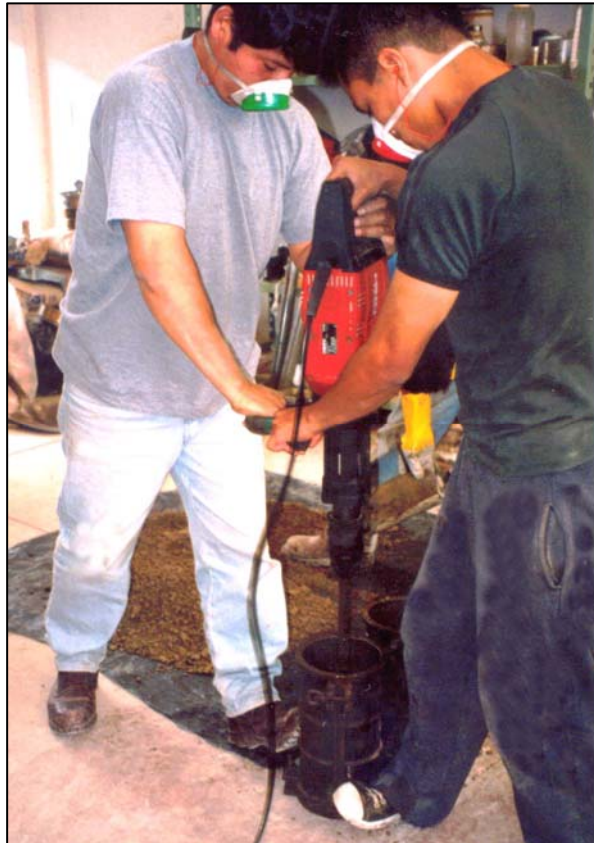


Foto N° 9: Elaboración de probetas de 6 pulg de diámetro por 12 pulg de altura. La colocación de la muestra se realizó en cuatro capas y se compactaron utilizando un martillo Hilti con un tiempo de 15 segundos por capa.



Foto N° 10 : Para la compactación de la última capa de las probetas se utilizó un collarín de extensión de 2 pulg de altura.



Foto Nº 11 : Escarificado realizado después de la compactación de cada una de las capas para permitir la adherencia entre ellas.



Foto Nº 12 : Una vez terminadas de elaborar las probetas se pesaron. Este peso y el volumen interior del molde metálico sirvieron para el cálculo del peso unitario de cada una de las probetas.



Foto N° 13 : Tanda de probetas debidamente identificada.



Foto N° 14: Desmolde de probetas CCR. Se observan los moldes partidos que se utilizaron para permitir el fácil desmoldaje.



Foto N° 15 : Una vez desmoldadas las probetas, se cubrieron con bolsas plásticas para evitar la pérdida de humedad. Inmediatamente después se colocaron en la cámara húmeda.



Foto N° 16 : Cámara húmeda de curado. Se adaptaron paredes de tecknoport y en el fondo se mantuvo un espejo de agua para mantener la temperatura y humedad controlada ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $95\% \pm 5\%$).



Foto N° 17 : Cámara húmeda de curado. En ocasiones se utilizaron focos para mantener la temperatura. Se observa el dispositivo utilizado para la medición de la humedad y temperatura dentro de la cámara.



Foto N° 18 : Ensayo de consistencia VeBe realizado con cada una de las muestras CCR investigadas, según norma ASTM C 1170. Se observa el vaciado de la muestra a la olla del VeBe.



Foto Nº 19: Aplicación de la carga y vibrado de la mesa VeBe. Se observa el anillo de pasta formado en el borde interior de la olla.



Foto Nº 20 : Mezcla CCR, después de realizado el ensayo de consistencia.

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD



Foto N° 21 : Colocación de anillos y sensores en la probeta para medir la deformación.



Foto N° 22 : Luego de colocar la probeta en la prensa se desajustaron los tornillos nivelantes para dar inicio a la aplicación de la carga.



Foto N° 23 : Ensayo de resistencia a la compresión, según Norma ASTM C 39. Se observa la prensa con la probeta colocada en el momento del ensayo.



Foto N° 24 : Probeta CCR en la prensa. Se observa los dispositivos colocados para la medida de la deformación.



Foto Nº 25 : Vista de equipo completo utilizado en la medida de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad: prensa y equipo adquiridor de datos

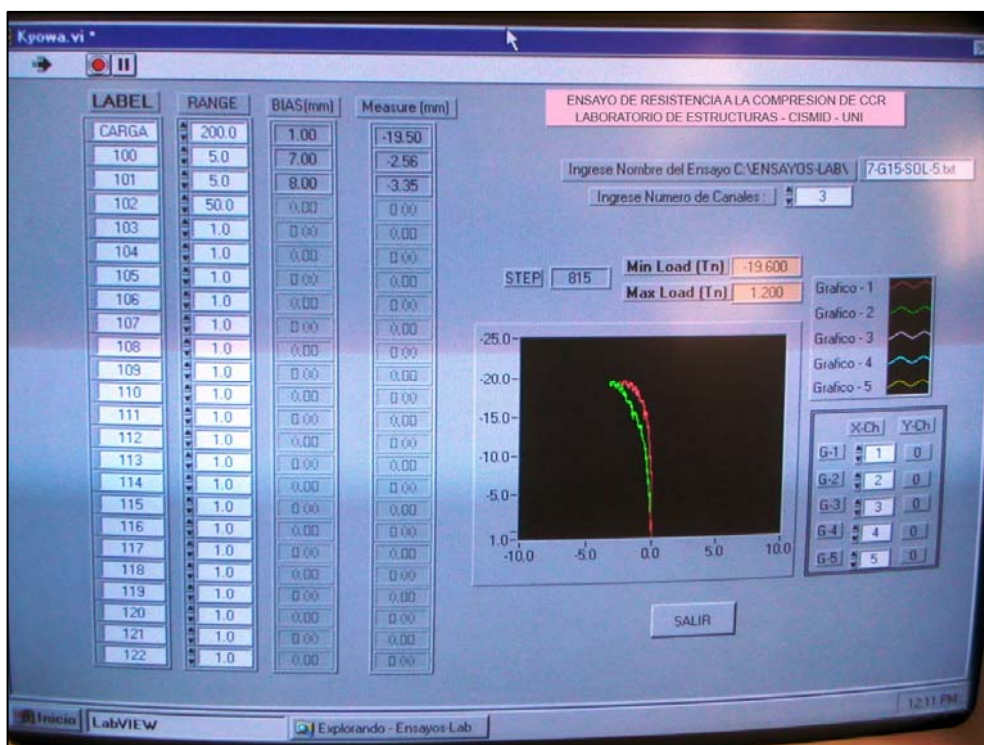


Foto Nº 26 : Se aprecian las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas en el equipo adquiridor de datos. Cada una de las curvas es obtenida por los transductores de deformación.

ENSAYO DE CONGELAMIENTO-DESHIELO



Foto N° 27 : Cortado de probeta de 7 días de edad de curado para la obtención de especímenes a utilizar en el ensayo de congelamiento/deshielo. Se fabricaron dos especímenes por cada tipo de mezcla investigada.



Foto N° 28 : Medida de las dimensiones de los especímenes. La medición se realizó al inicio del ensayo y cada vez que se retiraban de la congeladora y de la cámara húmeda



Foto N° 29 : El pesado de los especímenes se realizó al inicio del ensayo y después de retirarlos de la congeladora y de la cámara húmeda en cada uno de los ciclos para controlar la pérdida de material.



Foto N° 30 : Cada vez que los especímenes son llevados a la congeladora o a la cámara húmeda se colocaron en una bandeja y entre ellas se colocó un fieltro saturado con agua. Se observan las marcas en el lugar que se realizaron las mediciones en cada uno de los ciclos.



Foto N° 31 : Etapa de congelamiento. Los especímenes se colocaron en una congeladora a una temperatura constante de -23°C por un tiempo de 24 horas en cada uno de los ciclos.



Foto N° 32 : Etapa de deshielo. Los especímenes se colocaron en la cámara húmeda por 23 horas en cada uno de los ciclos.



Foto Nº 33 : Escobillado de especímenes, después de ser retirados de la cámara húmeda. Se dieron dos pasadas firmes sobre toda su área con una escobilla de alambre. El escobillado se realizó en uno de los especímenes representativos de cada mezcla, el segundo espécimen sirvió de control.



Foto Nº 34 : . El escobillado se realizó en algunas oportunidades sobre una balanza para verificar la presión aplicada.



Foto N° 35 : Después de los doce ciclos de ensayo, los especímenes se secaron en el horno a 110 °C, hasta peso constante.



Foto N° 36 : Estado final de especímenes fabricados con cemento Pórtland Tipo I (Sol), después de los 12 ciclos de congelamiento/deshielo.



Foto N° 37 : Estado final de especímenes fabricados con cemento Pozolánico Tipo IP (Atlas), después de los 12 ciclos de congelamiento/deshielo. Obsérvese la rajadura en el espécimen con 2% de cemento.



Foto N° 38 : Vista del espécimen elaborado con 2% de cemento puzolánico Tipo IP (Atlas). Este espécimen es el que mostró mayores pérdidas.