

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES

1.1. El problema

1.1.1. Antecedentes

Actualmente el Hormigón Compactado con Rodillo Vibratorio (HCR) en lo que refiere a construcción de presas está reemplazando al enrocado y al hormigón convencional, debido a que garantiza la seguridad de una presa de gravedad de hormigón convencional con la economía de una presa de materiales sueltos.

El HCR obedece a dos filosofías de diseño, la filosofía de suelos que basa su criterio en la relación “densidad máxima-humedad óptima” utilizada en la compactación de suelos tomando al HCR como un suelo mejorado; la filosofía de concreto por su parte utiliza la relación “agua/cemento”, reduciendo la cantidad de agua y compactando al hormigón mediante vibrado disminuyendo al máximo el porcentaje de vacíos de la mezcla.

1.1.2. Planteamiento

La dificultad en la elección de la mejor alternativa de diseño de mezclas HCR está dada, entre otros, por los siguientes aspectos:

- Poco estudio relacionado a las filosofías de diseño de HCR en el medio.
- Poca experiencia en la construcción de represas de HCR.
- Similitud en algunas características obtenidas por ambas filosofías de diseño de HCR.

Para la correcta elección de la filosofía a utilizar en el diseño de una mezcla de HCR se puede tomar la siguiente alternativa:

- Estudiar y comparar a detalle las diferencias de ambos criterios de diseño.

1.1.3. Formulación

En el planteamiento de este trabajo surge la siguiente pregunta como punto de partida de la investigación:

¿Cómo realizar la correcta elección de la filosofía de diseño a emplear en presas de HCR?

Al estudiar a detalle ambas filosofías de diseño se podrá obtener valores y rangos para que faciliten la correcta decisión.

1.1.4. Sistematización

Al momento de elegir una filosofía de diseño se deberá tomar en cuenta los factores que difieren entre ambas alternativas, así como las ventajas y desventajas de cada criterio, y los requerimientos propios del proyecto.

Por lo tanto, se ve por conveniente estudiar cada caso para llegar a conclusiones concretas que disponen la filosofía adecuada para el diseño de mezclas que satisfagan adecuadamente los requerimientos de la presa.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

- Determinar la mejor alternativa de diseño a utilizar en la construcción de presas de HCR, a través de un análisis comparativo de las filosofías de diseño del concreto y del suelo.

1.2.2. Específicos

- Identificar y definir las características, factores y técnicas que permitan establecer las ventajas y desventajas en la utilización de cada una de las filosofías de diseño de HCR estudiadas.
- Especificar granulometrías óptimas para agregado grueso, que garanticen la calidad de las muestras de HCR a realizar.
- Delimitar en base a la relación agua cemento, el grado de trabajabilidad para hormigones compactados con rodillo.
- Señalar grados de impermeabilidad experimental vs grados de impermeabilidad obtenidos por las filosofías de diseño del concreto y del suelo.
- Analizar la resistencia mecánica a compresión, permeabilidad y precios unitarios obtenidos por las filosofías del suelo y concreto para el diseño de HCR.

1.3. Justificación

Las razones por las cuáles se elaboró el trabajo de investigación son las siguientes.

1.3.1. Teórica

La investigación propuesta, tiene la finalidad de definir los conceptos y fundamentos de ambas filosofías de diseños de HCR desde el punto de vista técnico.

1.3.2. Metodológica

Para comparar ambas filosofías de diseño de mezclas de HCR, se pretende realizar pruebas de laboratorio, de resistencia a compresión y permeabilidad, a probetas elaboradas con cada filosofía de diseño y obtener los parámetros necesarios para el análisis comparativo de las mismas.

1.3.3. Práctica

Al analizar comparativamente las filosofías de diseño de HCR, se podrá obtener rangos y criterios que faciliten la correcta elección de la mejor alternativa diseño a utilizar, según los requerimientos básicos de cada proyecto, reduciendo así, los gastos imprevistos posteriores a la ejecución de la obra.

1.4. Hipótesis

En la construcción de presas de Hormigón Compactado con Rodillo (HCR), la utilización de la filosofía del suelo presenta características físico-mecánicas favorables entre un 10 y 15 % con relación a la filosofía del cemento.

1.5. Alcance del estudio

1.5.1. Tipo de Estudio

La presente investigación será comparativa y experimental, tomando como muestra dos tipos de HCR con diferentes criterios de diseño, para el posterior análisis de muestras sometidas a ensayos de laboratorio, tanto de la resistencia mecánica a compresión como de succión capilar, para así, obtener datos que permitan la comparación, tabulación e interpretación de resultados y conclusiones desde diferentes puntos de vista.

1.5.2. Alcance y/o Restricciones

Se pretende obtener datos comparativos de muestras de HCR con diferentes criterios de diseño, para poder determinar rangos y nuevos criterios que faciliten la elección de la alternativa más favorable para el proyecto que se quiera realizar.

El presente trabajo se encuentra dirigido solamente al estudio del HCR aplicado en la construcción de represas.

Todos los agregados que se utilizarán en las pruebas de laboratorio, serán tomados del mismo banco, por lo que los resultados que se obtendrán estarán sujetos a las propiedades de los mismos. De igual manera se manejará el mismo tipo de cemento, estando los resultados, también, sujetos a sus propiedades.

Este trabajo se limitará a pruebas de laboratorio, por lo que, debido al corto periodo de tiempo disponible, sólo se estudiarán los resultantes de las pruebas de resistencia a la compresión y absorción por capilaridad del hormigón, con estos resultados se realizarán las respectivas correlaciones entre ellas.

No se contemplará el uso de puzolanas ni aditivos para los ensayos materializados durante esta investigación.

El presente trabajo se concentrará en el estudio del HCR en una sección completa, dejando de lado, por falta de tiempo y disponibilidad de equipos, el estudio de las juntas de dilatación de dos secciones de HCR.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Hormigón compactado con rodillo (HCR)

En la búsqueda de un nuevo tipo de presa que combinara la seguridad de las presas de concreto y la economía de aquellas con núcleo de arcilla y caras en enrocado, se llegó al Hormigón Compactado con Rodillo. En 1970 Jerome Raphael presentó un artículo en el que proponía el uso de un nuevo material cuyo esfuerzo de corte mejorado, permitía optimizar la sección de la estructura. (Martínez Bernardo, 2010)

El Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) 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 HCR se desarrolló no sólo a partir del esfuerzo de algunos diseñadores de presas de concreto, sino también del trabajo de ingenieros geotécnicos, quienes tradicionalmente han diseñado terraplenes de tierra y enrocado. Esta combinación de esfuerzos ha originado la construcción de presas de concreto por métodos usualmente asociados con la construcción de presas de tierra. El producto es una presa menos costosa con la misma inherente seguridad de una presa de concreto convencional.

El Instituto Americano del Concreto (ACI) define HCR como: "Hormigón compactado por rodillo de compactación; al hormigón que, en su estado no endurecido, puede soportar un rodillo mientras se compacta". Las propiedades del HCR endurecido pueden ser similares a las del concreto colocado convencionalmente, sin embargo, el HCR también puede fabricarse con propiedades de dureza que están fuera del alcance de las propiedades típicas de concreto colocado convencionalmente. El término "Rodillo Compactador" lo define el ACI como "Un proceso de compactación de hormigón utilizando un rodillo, a menudo un rodillo vibrante". (ACI, 1999)

El HCR es conocido comúnmente en la literatura como una mezcla de concreto de cemento Portland de cero revenimiento. Así mismo es importante mencionar que la técnica del HCR no maneja acero de refuerzo ni formaletas. (Carrillo Vásquez, 2003)

El HCR 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 HCR 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)

El HCR es un hormigón con características muy similares al hormigón convencional en cuanto a su comportamiento estructural y apariencia, pero con diferencias importantes en las características de la mezcla y en su proceso de fabricación y colocación. En el proceso constructivo se busca altos rendimientos, similares a los obtenidos en los movimientos masivos de materiales sueltos. Esto conduce a diseñar una mezcla que genere muy bajos calores de hidratación y que a pesar de los altos volúmenes de colocación, se ha controlado el fisuramiento posterior del hormigón. Para lograr tal objetivo, el HCR exige un diseño de mezcla de bajos contenidos de cemento y consistencias secas, así como la inclusión de materiales cementantes de lenta generación de resistencia y calor, principalmente las puzolanas. En su fabricación es usual el enfriamiento previo de agua y los agregados. Su transporte y colocación se realiza con los equipos convencionales para los movimientos de tierra. (CIC Costa Rica, 2010)

2.2. Evolución de la técnica del HCR

El hormigón compactado con rodillo tuvo sus inicios en 1970, en el décimo Congreso Mundial de Grandes Presas en Montreal, Canadá, donde el profesor Wallingford V. M. presentó su artículo "Propuesta de Nueva Técnica para la Construcción de Presas de Gravedad de Concreto", proponiendo que la utilización de suelo-cemento en la construcción de presas resultaba muy económica.

En ese mismo año, en el Congreso de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles en Asilomar, California, el profesor Jerome M. Raphael presentó un artículo titulado "La Presa Óptima de Gravedad", en el que propuso el enriquecimiento del suelo-cemento, a fin de mejorar sus propiedades, principalmente su resistencia, postulando que esto haría

posible la construcción de cortinas, con reducción significativa en la sección de la misma, finalmente, el artículo indica la forma en que debe aplicarse la nueva mezcla (suelo-cemento enriquecido), para obtener mayor rendimiento y trabajabilidad, y propone su aplicación por medio de maquinaria pesada.

Durante el desarrollo del último congreso citado, el Ing. Robert W. Connan presentó el artículo “Construcción de presas de concreto utilizando equipo para compactación de tierra”, en donde propone la aplicación de una mezcla ya graduada: grava, arena, finos, cemento y agua, a diferencia del suelo-cemento propuesto por el profesor Raphael un año después, el mismo Connan se dedicó a experimentar el vibrocompactador para grandes cantidades de concreto.

En 1972, en el Simposium de “Nuevos Métodos de Mezclado y Colocado de Concreto”, en Dallas, Texas, organizado por el ACI (Instituto Americano del Concreto), Connan presentó otro artículo titulado “Compactación de Concreto Masivo con Rodillo Vibratorio”, en el que expuso los resultados de sus experimentos en 1971, sobre el concreto transportado en camiones estándar de volteo, colocado con tractor Buldozer y compactado con rodillo vibrador. Para ello utilizó una mezcla de bajo contenido de cemento y alto contenido de agregados, al cual llamo cemento-pobre, confirmando un incremento de resistencia, atribuida a la compactación obtenida por dicho rodillo.

Para entonces el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos ya se encontraba realizando sus propias investigaciones con el hormigón compactado con rodillo y fue en 1974, cuando decidió emplear, por primera vez, el hormigón compactado con rodillo en la construcción de una sección de la cortina Lower Grant, situada en la frontera entre los Estados de Washington y Oregón. No se cuenta con los resultados de esta primera experiencia, puesto que la armada nunca los publicó.

En 1975, los mismos ingenieros realizaron un bordo de prueba en la presa Lost Creek, en Oregón, se obtuvieron muestras del corazón del bordo compactado y fraguado, cuyas pruebas indicaron no existir ninguna diferencia con el hormigón convencional, pero detectaron variabilidad en la resistencia de las muestras, esta se presentaba al ensayar muestras compuestas por dos capas, ocurriendo fallas en las juntas entre ambas, lo cual se atribuyó a la segregación de materiales. Se concluyó, que para mejorar las juntas

entre las capas, debería evitarse la segregación utilizando agregados máximos más pequeños y en capas de menor espesor.

Para esa época, 1975, varios centros de investigación del mundo, como el Instituto de Investigación de Trabajos Públicos de Japón, la Asociación Americana de Ingeniería Civil y el Instituto Americano del Concreto, empezaron a hacer estudios sobre el concreto compactado con rodillo.

Previo a la construcción de la presa Milton Brook, en la Gran Bretaña, en abril de 1978 se inició un proyecto de investigación bajo la dirección de la Asociación de Información e Investigación de la industria de la construcción (CIRIA), que consistía en investigaciones de laboratorio que conduciría la Cement And Concrete Association y una serie de pruebas a escala natural que efectuaría la South West Water Authority.

El principal objetivo de la investigación de laboratorio, era medir las propiedades del concreto con elevado contenido de ceniza volante, diseñado para lograr la alta densidad relativa y la buena adherencia entre capas sucesivas deseadas para una presa de concreto compactado con rodillo.

Se observó que la proporción óptima de ceniza volante es del 60 a 80 % del contenido cementante, lo que depende del tipo de agregado (es decir que la relación ceniza volante/contenido cementante sería 0.6 y 0.8). Para la piedra caliza triturada utilizada como agregado tipo en el proyecto, la óptima fue de 0.75.

Se llevaron a cabo pruebas de compresión de cubos hechos de mezclas con tres relaciones diferentes ceniza volante/cementante, observándose que podía obtenerse concreto satisfactorio con una relación ceniza volante/material cementante de 0.8 durante todo el proyecto se practicó la prueba de tensión directa con el objeto de precisar la capacidad de esfuerzo de tensión del concreto, ya que se consideró que esta era la medida de la resistencia del concreto para soportar el agrietamiento térmico. Se midieron las propiedades térmicas del concreto con contenido elevado de ceniza volante, observando que todas eran similares a las del concreto convencional, el calor generado con el concreto con elevado contenido de ceniza volante fue aproximadamente la mitad del generado con el concreto pobre con el mismo contenido total de cementante. Se estudió la permeabilidad, la contracción y la resistencia a la congelación, observando muy poca contracción por secado, del orden de 130 a 190

microesfuerzos después de un año de secado, las escasas pruebas realizadas parecen indicar que la resistencia a la congelación deshielo puede relacionarse con la resistencia a la compresión de los cubos de concreto, en el momento de la prueba.

En conclusión, las pruebas a escala natural mostraron que la compactación con rodillos en el concreto con elevado contenido de ceniza volante, crea una estructura casi monolítica en el centro de una presa con poca debilidad en las juntas.

Del 29 de febrero al 2 de mayo de 1988 se celebró en San Diego California la II conferencia sobre hormigón compactado con rodillos (HCR), siendo esta una secuela a la celebrada en Denver, Colorado el 1° y 2 de mayo de 1985, como parte de la convención de la ASCE.

Se presentaron trabajos de especialistas de diversos países que analizaron con detalle las aplicaciones del HCR en la construcción de presas y pavimentos en Estados Unidos, Japón, Australia, Alemania, Inglaterra, Francia, Italia, Pakistán, Sudáfrica, Argentina y Brasil, destacando las ventajas que puede ofrecer la aplicación del HCR en determinados tipos de obras civiles.

Se coincidió en definir al HCR como una tecnología constructiva que utiliza una mezcla de concreto con revenimiento cero, bajo contenido de cemento (de 80 a 100 kg. Por metro cúbico), presencia opcional de puzolanas (de 20 a 30 kg por metro cúbico), relación agua/cemento muy baja, buena graduación de agregados con un tamaño máximo de 3", que generalmente se mezcla en planta de proceso continuo y se transporta y coloca usando equipos para movimiento de tierras, en capas del orden de 15 cm. Y sometiendo cada capa a compactación con equipo vibratorio. (Rivera Martínez, 1999)

Muchas de las presas del principio de los ochenta demostraron con éxito la alta velocidad de producción posible con la construcción de HCR. Cerca de 1.1 millones de m³ de HCR fueron colocados en la presa Upper Stillwater en 11 meses de construcción entre 1985 y 1987. La presa Stagecoach de 46 m de alto fue construida solamente en 37 días calendario de colocación esencialmente continua; una velocidad promedio de avance en la altura de 1.2 m/día. En la presa Elk Creek, la velocidad de colocación del HCR excedió los 9 200 m³/día.

El uso de HCR para presas de tamaño pequeño y mediano continuó en los Estados Unidos durante los años ochenta y principio de los noventa y fue expandido a proyectos más grandes en todo el mundo. Un rápido avance en la construcción con HCR se ha dado en las naciones en desarrollo para cubrir sus necesidades de aumento de agua y energía.

La primera presa de arco-gravedad de HCR fue construida en África del Sur por el Department of Water Affairs and Forestry para las presas Knellport y Wolwedans. El Capítulo 1 de Roller-Compacted Concrete Dams (Hansen, y otros, 1991) proporciona información adicional sobre la historia y desarrollo de las presas de HCR.

El uso del HCR para la rehabilitación de las presas existentes de concreto y terraplén comenzó en los Estados Unidos a mitad de los ochenta y continuó para florecer en los noventa. El uso principal para mejorar las presas de concreto ha sido para poner contrafuertes en una estructura existente para mejorar su estabilidad sísmica. Para las presas de tierra y enrocamiento, el HCR se ha usado principalmente como una sobrecapa en el talud aguas abajo para permitir un sobrepaso seguro del agua por la cresta de la presa durante inundaciones poco frecuentes.

En 1985 y 1986 dos presas en lados opuestos del mundo, España y China, presentan el concepto de utilizar un contenido de cemento mayor con una alta proporción de aditivos minerales, poco después de esto se comienza la construcción de presas de HCR en África, Brasil y México. Con el paso del tiempo y la confianza adquirida en el material, el siguiente paso se dio para el uso en presas de Arco-gravedad y eventualmente en presas de arco, sustituyendo de manera efectiva y económica al concreto tradicional. (Bilbas, 2007)

Posteriormente, el desarrollo de esta técnica ha sido considerable, siendo numerosas las realizaciones en países como Estados Unidos, Japón, Sudáfrica, Australia, China, Brasil o España. El total de presas de hormigón compactado en servicio, de altura superior a los 15 m a finales de 2001 era de 232, cifra que casi multiplica por 5 las existentes en 1989. Al mismo tiempo, otras 31 presas de HCR se encontraban en construcción.

De acuerdo con el boletín 125 publicado por el ICOLD, a finales de 1996 se tenían 157 presas de HCR terminadas en 20 países, para finales de 2002 esa cifra se elevó a 251 presas terminadas en 35 países y otras 34 presas en construcción en otros cuatro países.

En seis años entre 1997 y 2003 se terminaron 97 presas de HCR y otros 15 países tenían presas bajo construcción (Dunstan, 2003), en la Tabla 2.2.1. se presentan las presas construidas en este periodo.

Tabla 2.2.1. Presas de HCR terminadas hasta 1996 y 2002

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			
ASIA			AMÉRICA DEL NORTE		
CHINA	23	45	USA	23	38
JAPÓN	28	42	CANADA	2	2
TAILANDIA	1	2	TOTAL	30	38
KYRGYZSTAN	1	1	AMÉRICA DEL SUR Y CENTRAL		
TURQUÍA	0	1	BRASIL	9	29
INDONESIA	0	1	MÉXICO	5	6
KAZAKHSTAN	0	1	HONDURAS	2	2
RUSIA	0	1	COLOMBIA	0	2
TOTAL	53	64	CHILE	1	1
EUROPA			ARGENTINA	1	1
ESPAÑA	19	21	GUYANA FRANCESA	1	1
FRANCIA	8	6	REPÚBLICA DOMINICANA	0	1
GRECIA	1	3	BOLIVIA	0	1
RUMANIA	2	2	COSTA RICA	0	1
TOTAL	28	32	TOTAL	12	45
			GRAN TOTAL	157	251

Fuente: Dunstan, 2003

En nuestro país, la construcción de la primera presa utilizando la tecnología del HCR, demora hasta el año 2000. La primera experiencia de HCR en Bolivia, fue la presa de La Cañada, ubicada en la Provincia Manuel María Caballero del Departamento de Santa Cruz, a 10 Km de la población de Comarapa.

Tabla 2.2.2. Parámetros de diseño Presa La Cañada

PARÁMETROS DE DISEÑO	
1 GEOMETRÍA	
• Longitud del coronamiento	155 m
• Ancho del coronamiento	8.00 m
• Ancho del aliviadero	30.00 m
• Longitud del colchón disipador	27.40 m
• Paramento aguas arriba	Vertical
• Paramento aguas abajo	(v:h) 1:0.20 a 1:0.75
• Altura máx. de la presa sobre el nivel de fundación	50.5 m
2 PARÁMETROS DE DISEÑO Y CAPACIDAD	
• Crecida de diseño: Q10.000	320 m ³ /seg
• Caudal específico del aliviadero	10.8 m ³ /seg
• Volumen del embalse	10.00 Hm ³
• Tubería de salida	DN 1200
• Torre de Servicio	3 niveles de toma
• Dispositivo de regulación	Válvula de aguja
3 TRATAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN	
• Volumen de excavación	32.000 m ³
• Inyecciones de impermeabilización	3 líneas
• Diámetro de las perforaciones	75 mm
• Longitud total de las perforaciones para inyecciones	4.000 m
• Perforaciones para drenaje de la cimentación	2 líneas
• Longitud total de perforaciones de drenaje	1.000 m
4 HORMIGÓN	
• Volumen del RCC	66.500 m ³
• Volumen de hormigón convencional	5.000 m ³

Fuente: Álvarez Luzgado, 2002

Figura 2.2.1. Presa La Cañada, primera experiencia de HCR en Bolivia



Fuente: Inventario nacional de presas, Bolivia 2010

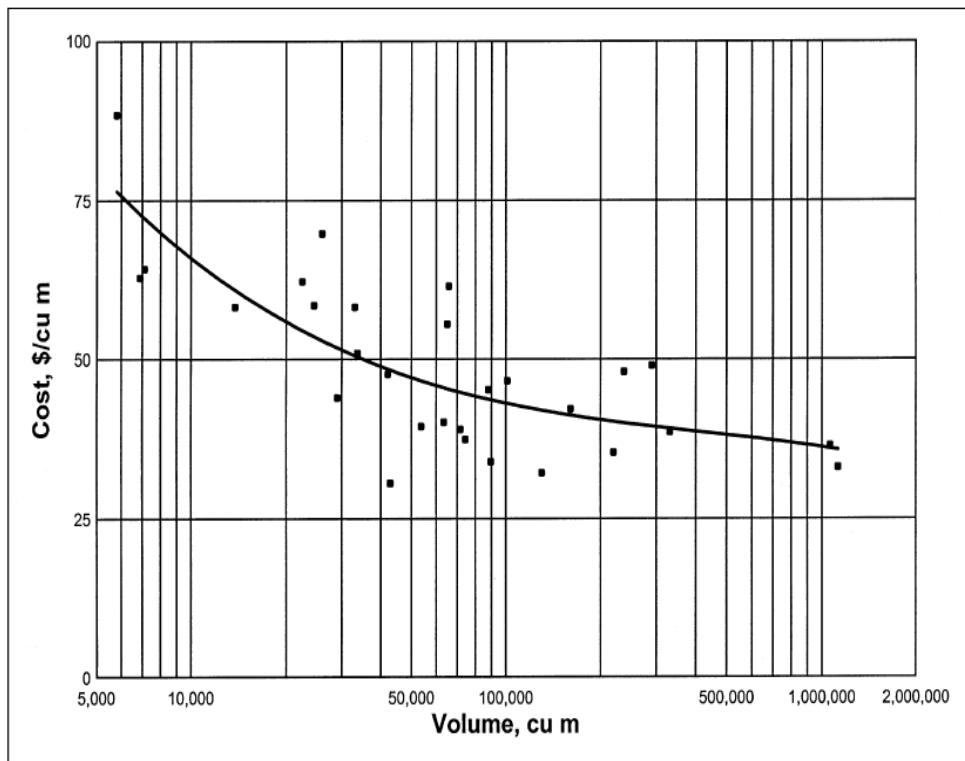
2.3. Ventajas del HCR como método de construcción de presas

La técnica de construcción con HCR ha hecho que las presas de gravedad de HCR 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:

2.3.1. Costo

Costos históricos de construcción de presas de HCR y de concreto convencional muestran que el costo por metro cúbico de HCR 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 HCR son debidos principalmente a la reducción en los costos de encofrados, colocación, compactación y la reducción de tiempos de construcción.

Figura 2.3.1. Relación costo-volumen para presas de HCR



Fuente: US Army Corps of Engineers, 2000

2.3.2. Construcción Rápida

La rápida técnica de construcción (comparadas con la de presas de hormigón convencional y terraplenes) y la reducción de las cantidades de material (comparada con las presas de enrocamiento) ocasionan mayores ahorros en los costos de las presas de HCR. El proceso de construcción con HCR 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 HCR puede ser reducido por varios meses o por varios años. (Escalaya Miriam, 2006)

2.3.3. Vertedor y estructuras anexas integradas

Al igual que con las presas de hormigón convencional, el vertedor se puede incorporar directamente sobre la cortina. Un diseño típico permite la descarga sobre la cresta de la presa y por el paramento de aguas abajo. En contraste, el vertedor de una presa de enrocamiento está normalmente construido en un extremo de la presa o en un puerto natural cercano. Una presa de enrocamiento con un vertedero y obra de toma fuera de la obra de contención es más costoso que una presa de HCR cuyos vertedor y obra de toma se encuentran integrados a la cortina. Para proyectos que requieren múltiples niveles de obra de toma para el control de la calidad del agua o para la sedimentación en los embalses, la estructura de toma puede ser fácilmente anclada en el paramento de aguas arriba de la presa de HCR. Para una presa de enrocamiento, el mismo tipo de estructura de toma sería una torre independiente en el embalse o una estructura construida en el extremo de la cortina cercano al empotramiento y sobre el embalse. El costo de la obra de toma para una presa de HCR es considerablemente menor comparada para una presa de enrocamiento, especialmente en zonas sísmicas. El tamaño del área en la base de la cortina para una presa de HCR es más pequeña comparada con la de una presa de enrocamiento, lo que conlleva a reducir la longitud del conducto de la obra de toma, los tratamientos y los costos en la preparación de la cimentación.

2.3.4. Reducción de desvío y ataguías

Las presas de HCR ofrecen ventajas de costos en el desvío del río durante la construcción y reduce los daños y riesgos asociados con el desbordamiento de la ataguía. La obra de desvío de una presa de HCR es menor que el de las presas de

enrocamiento. Con un período de construcción más corto, la probabilidad de ocurrencia de la avenida de diseño es menor, por lo tanto, el tamaño del conducto de desvío y la altura ataguía son menores. Estas estructuras pueden diseñarse para gastos máximos de la temporada en lugar de los gastos máximos anuales. Con la alta resistencia a la erosión del HCR, el riesgo de falla se minimiza y por consecuencia menos daños, incluso el desbordamiento de la ataguía puede ocurrir. Ventajas significativas se obtienen al utilizar HCR para la construcción de ataguías. Ofrece los beneficios de la rápida construcción, ocupa poco espacio y operatividad continua después de desbordamiento. (Valencia Edgar, 2013)

2.3.5. Reducción de impactos ambientales

Las presas de HCR implican un menor impacto ambiental con relación a las de materiales sueltos, por la menor cantidad de materiales requeridos, que conllevan a una disminución de los problemas de tráfico, producción de polvo y cicatrices en las zonas de préstamos, mientras que en comparación con las presas de hormigón convencional, no precisan excavaciones en las laderas. (Baños Merlin, 2012)

2.3.6. Otras ventajas

Las presas de gravedad de HCR son de por sí más resistentes a la erosión interna y al desbordamiento.

2.4. Desventajas del HCR en la construcción de presas

Del mismo modo, existen ciertas desventajas del HCR en Presas, pero hay que tener en cuenta que estas sólo se aplican a las condiciones del sitio en particular y diseños. Las situaciones en las que el HCR puede no ser apropiado, es cuando los materiales como agregados no están disponibles cerca del lugar o no son apropiados para el tipo de concreto, también cuando la roca base es de mala calidad o no está cerca de la superficie, o cuando el terreno de fundación pueda dar lugar a asentamientos diferenciales excesivos.

Las desventajas más comunes que se dan en Presas son las siguientes:

- Infiltraciones entre las capas debido al carácter permeable y a un nivel de agrietamiento controlado.
- La Adherencia entre capas en razón a las características del material las hace en cierta manera vulnerable ante los eventos sísmicos.

Esto ha ayudado a que se desarrollen nuevas tecnologías con respecto a la impermeabilidad, utilizando el PVC o una membrana sintética sujeta con concreto de alta calidad. Con respecto a los agrietamientos se ha trabajado en nuevas técnicas de juntas transversales o por cortes regulares de series de ranuras que actúan como inductores de grietas.

2.5. Aplicaciones

La utilización del HCR debe considerarse en obras de infraestructura en donde el hormigón de revenimiento escaso o nulo puede transportarse, colocarse y compactarse con equipos de construcción pesada, empleados en movimientos de tierra y roca, en donde implique grandes áreas de colocación, el refuerzo de poco o nada, y poco o ningún trabajo embebido de metal u otras discontinuidades tales como pilas. La aplicación del HCR debe considerarse cuando sea económicamente competitivo con otros métodos de construcción como el proponer bancos de protección en lugar de gaviones o escolleras, especialmente en aquellas zonas donde es escasa la roca. (US Army Corps of Engineers, 2000)

Es recomendable como relleno suave en trabajos grandes, plataformas, o áreas pavimentadas, cimentaciones masivas, bases de losas, ataguías, rellenos masivos, reparaciones de emergencia, y como protección por desbordamiento en presas de enrocamiento. Se puede emplear en lugar del concreto convencional en presas de gravedad y arco-gravedad. El HCR puede utilizarse en diques donde los cimientos son adecuados y puede usarse también en casquillos para los muelles para reducir la cantidad de roca requerida. Para muchos proyectos de presas, el uso de HCR puede permitir un diseño más económico, al contar con estructuras anexas como ser los vertedores, obra de toma y obra desvío, dando la ventaja de que pueden formar parte del cuerpo de la cortina, comparado con una presa de enrocamiento, cuyas obras son independientes a la cortina. En estructuras diseñadas de manera similar a las manejadas

en concreto convencional, puede usarse el HCR con las mismas características. También es posible diseñar estructuras que requieren un rendimiento menor, en consecuencia hacerlos más económicos (US Army Corps of Engineers, 2000).

2.6. Filosofías de diseño

En el desarrollo de la Tecnología del Hormigón Compactado con Rodillo (HCR), 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 otros, 1991).

Las aproximaciones de dosificación de mezclas se diferencian significativamente, dependiendo de la filosofía de tratamiento del agregado, ya sea como agregado para hormigón convencional o como agregado utilizado en la construcción de terraplenes estabilizados.

Las mezclas de HCR 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 “Cero revenimiento”.

Tabla 2.6.1. Comparación general de factores característicos para filosofías de HCR

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 N° 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

Fuente: Hansen y Reinhardt, 1991

2.6.1. Filosofía del concreto

La Filosofía de Concreto considera a la mezcla HCR 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 hormigón completamente consolidado es inversamente proporcional a la proporción agua - cemento. Usando menos agua con una cantidad constante de cemento se produce un hormigón 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 HCR que rellena todos los vacíos en el agregado, haciendo que la mezcla se compacte completamente, produciéndose un hormigón con asentamiento nulo. Sin embargo, la mezcla HCR 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 algunas pasadas del rodillo vibratorio.

Un posible punto de demarcación entre las dos aproximaciones podría ser que las mezclas HCR 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.

A pesar de una amplia investigación sobre este tema, no existe todavía ninguna metodología aceptada por unanimidad para simular las condiciones de campo en la preparación de las muestras de laboratorio. (US Army Corps of Engineers, 2006)

La relación agua / cemento constituye un parámetro importante de la composición del hormigón. Tiene influencia sobre la resistencia, la durabilidad y la retracción del hormigón.

La relación agua / cemento (a/c) es el valor característico más importante de la tecnología del hormigón. De ella dependen la resistencia y la durabilidad, así como

los coeficientes de retracción y de fluencia. También determina la estructura interna de la pasta de cemento endurecida.

La relación agua cemento es el cociente entre las cantidades de agua y de cemento existentes en el hormigón fresco. O sea que se calcula dividiendo la masa del agua por la del cemento contenidas en un volumen dado de hormigón.

$$R = \frac{a}{c}$$

Donde:

R: Relación agua / cemento

a: Masa del agua del hormigón fresco

c: Masa del cemento del hormigón

La relación a/c crece cuando aumenta la cantidad de agua y decrece cuando aumenta el contenido de cemento. En todos los casos, cuanto más baja es la relación agua / cemento tanto más favorables son las propiedades de la pasta de cemento endurecida.

La importancia de la relación agua / cemento fue descubierta hace 60 años por Duff A. Abrams especialista de EE. UU. Después de haber estudiado un gran número de hormigones de diferentes composiciones, anunció la ley que expresa que con un agregado dado, la resistencia depende sólo de la relación agua / cemento del hormigón fresco. Este descubrimiento ha provocado desarrollos importantes puesto que otras propiedades de gran valor del hormigón, también dependen de la relación agua / cemento.

Los trabajos realizados posteriormente por T.C. Powers, han permitido comprender las causas de esta fuerte influencia de la relación agua / cemento.

Estas razones están ligadas al endurecimiento del cemento portland, el que como se sabe se debe a la absorción química de agua por los constituyentes del cemento, especialmente por 3CaOSiO_2 y el 2CaOSiO_2 . La pasta de cemento se endurece entonces formando un gel progresivamente más estable. Como en la mayoría de las transformaciones químicas, las cantidades de elementos que participan en esta relación están en proporción fija. La hidratación completa de 100 g de cemento portland requiere 20 g de agua, aproximadamente, lo que corresponde a una relación

agua / cemento = 0.2. En los minúsculos intersticios del gel en formación se fijan, por adsorción, otras moléculas de agua, a razón también de 20 g de agua por 100 g de cemento, aproximadamente, al final del proceso.

En consecuencia el cemento portland fija, para su endurecimiento, una cantidad de agua correspondiente a una relación agua / cemento = 0.4.

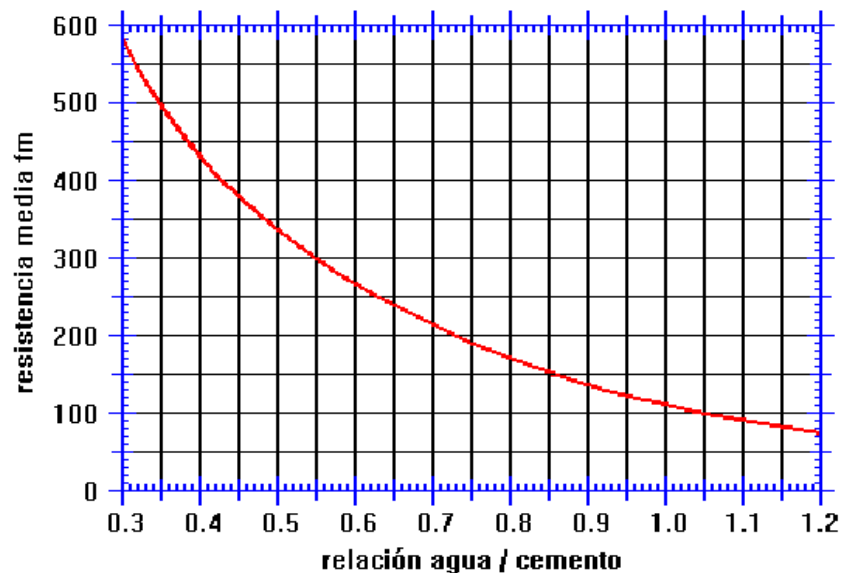
El agua suplementaria no está fijada y ocupa en la pasta de cemento endurecido cierto volumen en forma de poros capilares.

Cuanto mayor sea la existencia de agua en exceso habrá mayor cantidad de capilares en la pasta de cemento. Cuando la cantidad total de capilares corresponde a una relación $a/c = 0.7$, los capilares son tan numerosos que están unidos entre si formando una red permeable. La proporción de capilares con relación a la materia sólida será 1:2.

En consecuencia, si se agregan 70 g de agua a 100 g de cemento ($a/c = 0.7$)

- Los primeros 20 g son fijados químicamente.
- Los 20 g siguientes son fijados por adsorción
- Los 30 g restantes quedan libres en la red de capilares

Figura 2.6.1. Gráfica Resistencia media del hormigón – Relación Agua / Cemento, para hormigones comunes



Fuente: Rodríguez José, 2011

2.6.2. Filosofía del suelo

La Filosofía de Suelos considera al HCR 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 en el 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 HCR 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 y un menor contenido de humedad óptimo.

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:

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

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

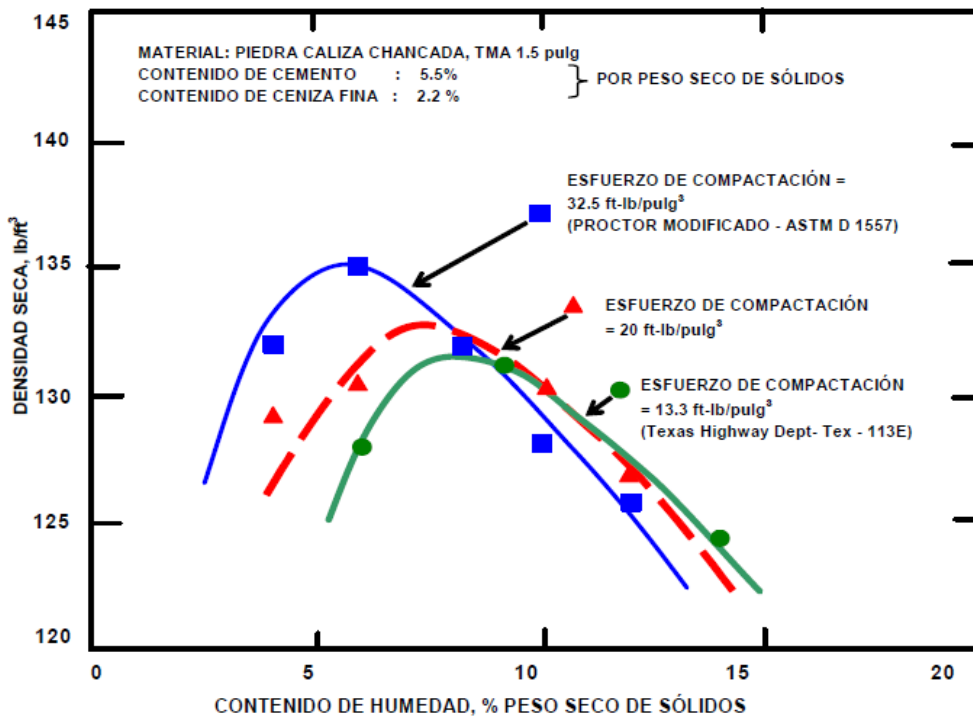
Si se usa un óptimo contenido de humedad, correspondiente al esfuerzo de compactación alcanzado por los rodillos en el campo, se producirá un material en su máxima densidad seca. Para un esfuerzo de compactación dado (constante), el contenido de agua debajo o encima del óptimo puede producir una disminución 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.

En la Figura 2.6.2. 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 2.6.2. Curvas de laboratorio humedad –densidad para mezclas HCR sujetas a varias energías de compactación



Fuente: Reeves y Yates, 1985

2.7. Materiales para mezclas HCR

Los materiales usados para producir HCR son similares a los que se conocen para la elaboración del concreto convencional, los componentes utilizados son cemento, agua, agregado grueso y fino, y algunas veces aditivos químicos. De igual manera que para un concreto convencional los materiales utilizados deben de cumplir con los

requerimientos mínimos aplicables que proporcione una mezcla adecuada, económica y funcional.

Figura 2.7.1. Componentes de HCR



Fuente: Seminario Internacional de Concreto, El Salvador 2011

2.7.1. Cemento

Es un conglomerante que une o da cohesión, producido por la pulverización de la escoria que consiste esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos, que en forma usual contienen una o más formas de sulfatos de calcio que se añade y se muele con ella.

El cemento no es compuesto químico simple, sino una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos forman el 90 % o más del peso del cemento y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminaferrito tetracálcico.

Los cementantes que se utilizan para la fabricación del HCR son hidráulicos, es decir, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aún estando inmersos en ella, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire.

Los principales conglomerantes hidráulicos son las cales y cementos hidráulicos, algunas escorias y ciertos materiales con propiedades puzolánicas. De acuerdo con

el grado de poder cementante y los requerimientos específicos de las aplicaciones, estos cementantes pueden utilizarse para HCR en forma individual o combinados entre sí. (Baños Merlin, 2012)

El Cemento Portland Tipo II es empleado comúnmente en HCR, por sus características de baja generación de calor en edades tempranas y a largo plazo. El uso de cemento portland tipo III no es práctico en HCR, ya que acorta el tiempo para la compactación y la evolución de calor aumenta en edades tempranas. La velocidad lenta en el desarrollo de la resistencia de algunos cementos da como resultado una mayor resistencia determinada por el contenido de cemento.

Tabla 2.7.1. Tipos de Cemento

Tipos de cemento	Denominaciones
I	Cemento Portland
II	Cemento Portland con adiciones
III	Cemento Portland con escorias de horno alto
IV	Cemento puzolánico
V	Cemento compuesto

Fuente: Norma UNE-EN 197-1:2000

La generación de calor debido a la hidratación del cemento usualmente se controla con el uso de cemento de bajo calor de hidratación, usando menos cemento, y reemplazando una porción de cemento con puzolanas, o con una combinación de estos. Se puede alcanzar una reducción en la temperatura máxima del concreto por otros medios, como por ejemplo, con la reducción de la temperatura en la colocación. La selección del tipo de cemento debe considerar aspectos económicos en el abastecimiento del cemento. Para proyectos de tamaños pequeños y medios puede no ser económicamente conveniente especificar cemento de bajo calor de hidratación que no esté disponible localmente.

Debido a la alta capacidad de producción requerida para el HCR, se necesita poner atención especial al abasto continuo de cemento para el proyecto. (Valencia Edgar, 2013)

2.7.2. Puzolanas

Se consideran generalmente como puzolanas los materiales que, carentes de propiedades cementantes y de la actividad hidráulica por sí solos, contienen constituyentes que se combinan con cal a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos.

El uso de escoria volcánica o puzolana es altamente benéfico en el HCR como un relleno mineral y por sus propiedades cementantes, así como proporcionar un grado de lubricación durante la compactación. La puzolana ocupa una parte del volumen de pasta, ocupado por el cemento y el agua. La ceniza volante tipo F es comúnmente utilizada como puzolana o relleno mineral para el HCR, pero la clase C también se maneja. La ceniza volante clase F contribuye a reducir la generación de calor a una edad temprana, puede usarse para reemplazar el cemento (generalmente hasta aproximadamente 50 por ciento en volumen), reduce el costo, actúa como relleno mineral para mejorar la trabajabilidad y retrasos. Por lo tanto, las mezclas de HCR que contienen ceniza volante de clase F tienen un beneficio al incrementar el tiempo de colocación e incrementa la trabajabilidad.

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

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

La selección de una puzolana adecuada para el HCR se debe basar en su conformidad con la norma ASTM C 618 (Especificación estándar para Cenizas Volantes de Carbón y Puzolana Natural Cruda o Calcinada Para Concreto) u otra especificación aplicable, su comportamiento en el concreto y su disponibilidad a la ubicación del proyecto.

Las puzolanas clase F y N usualmente son preferidas, ya que contribuyen con menos calor de hidratación que la clase C y tienen mayor resistencia a los sulfatos.

Para las puzolanas Clase C, se debe poner mayor atención al tiempo de fraguado, la resistencia a los sulfatos y el contenido de cal libre. El uso de puzolanas dependerá del desempeño requerido del material así como de su costo y disponibilidad en cada proyecto.

Tabla 2.7.2. Clasificación puzolanas

Clase	Descripción
N	Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tufos y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias.
F	Ceniza volante producida por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Cenizas que poseen propiedades puzolánicas.
C	Ceniza volante producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementicias.

Fuente: Norma ASTM C 618

La puzolana puede tener una limitada eficacia en mezclas con contenido de agregados que poseen cantidades perjudiciales de arcilla y partículas blandas. Mientras que la cantidad de puzolana aumenta el volumen de pasta de estas mezclas, no puede aumentar el desarrollo de la resistencia a largo plazo, esto causa insuficiente disponibilidad de hidróxido de calcio que se libera del cemento portland para una reacción puzolánicas. (Baños Merlin, 2012)

2.7.3. Agregados

Los agregados se definen como el material granular que abarca aproximadamente el 75 % al 85 % por ciento del volumen de una mezcla de HCR, y cuya finalidad es conformar el esqueleto del concreto y por lo tanto afectan de manera significativa

las propiedades de éste en estado fresco como en estado endurecido. Los agregados deben de consistir en partículas duras, limpias, durables, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimiento de arcilla y otros materiales finos que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta del cemento. La selección adecuada de los agregados dará lugar a diseños económicos y durables. (Baños Merlin, 2012)

La calidad del agregado y la granulometría son factores que influyen en el producto final del HCR. Entre los diseñadores de mezclas HCR, 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 HCR 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. (Escalaya Miriam, 2006)

Clasificación de los agregados

Es necesario realizar esta división de los materiales debido a la condición mínima del concreto de dividir a los agregados en dos grupos, cuya frontera nominal es la malla N° 4 (4.75 mm), obteniendo por resultado lo mostrado en la Tabla 2.7.3.

Tabla 2.7.3. Clasificación de los agregados según los límites granulométricos

Clasificación	Intervalo nominal (mm)	Mallas ASTM correspondientes
Agregado Fino	0.075 - 4.75	N° 200 a N° 4
Agregado Grueso	4.75 - variable	N° 4

Fuente: Norma ASTM C 33

- **Agregado Grueso.-** Por lo general consiste de grava triturada o sin triturar, piedra triturada, o una combinación de los mismos. Algunos depósitos naturales de agregado, a veces llamados gravas de mina, río, lago o lecho marino. El agregado ideal debe ser limpio, cúbico, anguloso, triturado, con un mínimo de partículas planas y alargadas.
- **Agregado Fino.-** Puede consistir en arena natural, arena manufacturada, o una combinación de los dos. La arena manufacturada deberá provenir de rocas sanas y durables, que cumplan los requisitos de calidad necesarios para obtener un HCR de las características exigidas.
- **Finos.-** En mezclas de bajo contenido de materiales cementantes, finos sustituyentes, y material que pasa la malla N° 200, son usualmente requeridos para rellenar los vacíos de los agregados.

Calidad

La calidad requerida de los agregados depende de las propiedades deseadas del HCR, principalmente de su resistencia. Para un HCR 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 la Tabla 2.7.4. 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 proveen una indicación de su calidad.

Para el HCR 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 HCR que se colocará en el interior de la presa.

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

Tabla 2.7.4. Características y ensayos para agregados utilizados en presas de HCR

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.

Fuente: Escalaya Miriam, 2006

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 HCR.

Las diferencias entre las filosofías de diseño de mezclas han producido diferentes tendencias con respecto a los agregados especificados para el HCR. 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 HCR.

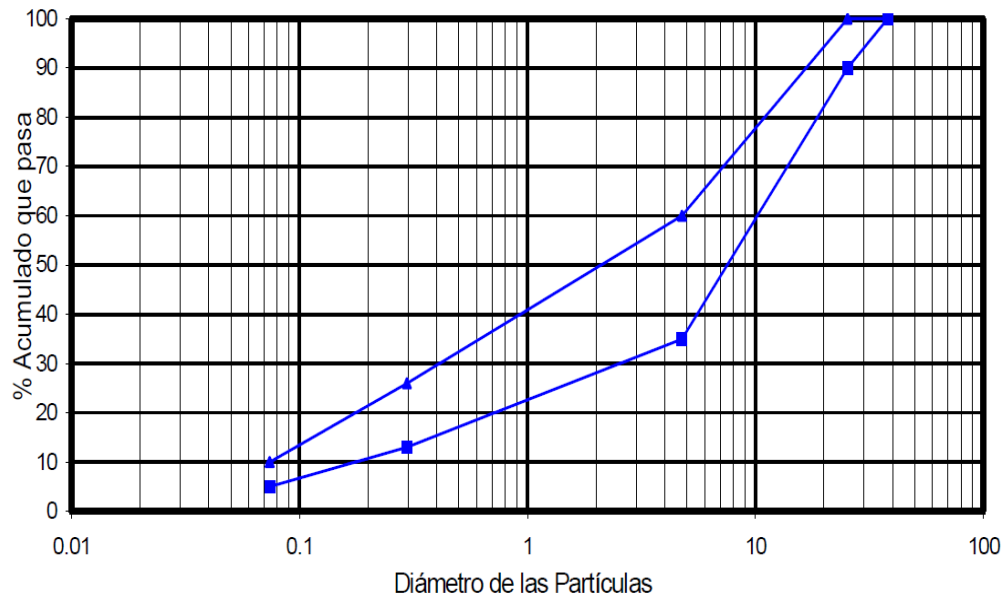
Para mezclas HCR con aproximación a concreto, los requerimientos para los agregados son muy similares a los exigidos para masas convencionales de concreto. El tamaño máximo de agregado comúnmente usado es de 3 pulg (75 a 80 mm), aunque se han usado tamaños máximos de 6 pulg y 2 pulg. Los porcentajes 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 HCR, 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 %.

La cantidad y tipo de finos permitidos han variado considerablemente. Éste ha fluctuado desde 0 a 3 % del total de agregado para 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 HCR.

Las mezclas de HCR 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 HCR 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 compactibilidad.

Figura 2.7.2. Faja granulométrica propuesta por Choi y Groom, 2001 para proyectos pequeños a medianos



Fuente: Choi y Groom, 2001

2.7.4. Agua

El único requerimiento para el agua en mezclas de HCR 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 HCR requieren de 89 a 119 Kg de agua por m³ para agregados de tamaño máximo mayor que 2 pulg (50 mm).

2.7.5. Aditivos

Los aditivos han sido efectivos en mezclas HCR que contienen suficiente agua para proveer una pasta más fluida. Los aditivos reductores de agua y retardadores de fraguado 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 HCR. 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 HCR antes de ser usados en el campo. Los aditivos de aire incorporado no son

comúnmente usados en mezclas de HCR 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 HCR 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 HCR con una consistencia de pasta fluida. (Escalaya Miriam, 2006)

2.8. Propiedades del Hormigón Compactado con Rodillo

Las propiedades del HCR 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.

2.8.1. 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 debida a su facilidad de determinación y a que muchas otras propiedades están directamente ligadas a ella. Para las presas de HCR se requieren usualmente edades de ensayo de 90, 180 ó 360 días y de 28 días para pavimentos de HCR. Las edades requeridas para las presas de HCR 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 HCR 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 HCR, la resistencia a compresión es una función de la relación agua - material cementante, tal como en los concretos convencionales. La resistencia a la compresión del HCR 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.

Las mezclas HCR 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 HCR afecta desfavorablemente la resistencia y trabajabilidad, y por consiguiente no es recomendado.

Tabla 2.8.1. Resistencias a la compresión de algunas presas de HCR

Nota: Método de fabricación de cilindros: VB = Vebe (ASTM C 1176), MP = Proctor Modificado (ASTM D 1557) y PT = Martillo neumático (ASTM C 1435)

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

Fuente: ACI 207.5 R-99

2.8.2. Resistencia a la tensión

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

Tabla 2.8.2. Resistencias a la flexión y tensión de proyectos de HCR

Proyecto	Edad, días	Resistencia a la Flexión promedio, psi	Resistencia a la Tensión (rompimiento) promedio, psi
Ft. Stewart	90	1010	-
Ft. Hood	7	661	-
	28	830	-
Harvey Barracks	7	-	338
	28	783	402
Ft. Campbell	7	647	398
	28	-	-
Aberdeen Proving Ground	7	553	379
	28	627	452

Fuente: ACI 325.10 R-95

2.8.3. Resistencia al corte

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

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

Donde:

S: Resistencia al corte, Mpa (psi)

c: Cohesión, Mpa (psi)

σ : Esfuerzo normal o confinamiento, Mpa (psi)

φ : Ángulo de fricción, grados

La cohesión “c” es también llamada esfuerzo de adhesión, mientras que $\sigma \tan \varphi$ 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 interface entre capas del HCR. 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 HCR del cuerpo y de las juntas son dados en la Tabla 2.8.3.

Tabla 2.8.3. Comportamiento al corte de testigos perforados de presas de HCR

Presal/ proyecto	Cemento (Kg/m ³)	Puzolana (Kg/m ³)	TMA pulg	Tipo de junta	Edad días	Resistencia a la compresión testigos (Kg/cm ²)	Cohesión pico (Kg /cm ²)	Corte φ grados	Corte residual cohesión (Kg /cm ²)	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

Fuente: ACI 207.5 R-99

2.8.4. 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 HCR 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 HCR 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 HCR, usando finos naturales o manufacturados como el filler han resultado con muy bajo módulo. Datos de propiedades de elasticidad típicas del HCR son dados en la Tabla 2.8.4.

Tabla 2.8.4. Resistencia a la compresión y módulos de elasticidad de algunas mezclas HCR de laboratorio

Presa/ 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	-
	PT	3	1,61	40,8	82,3	121,6	184,2	0,08	0,11	0,13	-
Zintel Canyon	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

Fuente: ACI, 1999

2.8.5. 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 HCR es similar a los valores reportados para los concretos normales, pudiendo presentarse un rango de 0,17 a 0,22. En la tabla 2.8.5. se presentan algunos resultados de presas y proyectos llevados a término.

Tabla 2.8.5. Resistencia a la compresión y relación de Poisson de algunas mezclas de HCR de laboratorio

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	-

Fuente: ACI 207.5 R-99

2.8.6. 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 termal de la mezclas son gobernadas por las propiedades

termales de los constituyentes. Aunque los valores para concretos convencionales y HCR son similares, los valores reales medidos pueden variar significativamente, dependiendo del tipo y contenido de agregado, cemento y puzolana. (US Army Corps of Engineers, 2000)

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 HCR 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.

2.8.7. Cambios de volumen

- **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 HCR se minimiza debido al bajo contenido de agua de éste.
- **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 HCR 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. (U.S Army Corps Of Engineers, 1992)

2.8.8. Permeabilidad

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

Se ha sugerido que la impermeabilidad del HCR puede estar directamente relacionada a su contenido de material cementante. Este hecho es especialmente aplicable a las mezclas HCR 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 HCR 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 HCR, contribuye a su baja permeabilidad, sin incrementar las posibilidades de agrietamiento térmico. (U.S Army Corps Of Engineers, 1992)

2.8.9. Durabilidad

La durabilidad del HCR es especialmente importante si el material es expuesto al tiempo o a fuerzas hidráulicas severas. El HCR, 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.

- Resistencia a la Abrasión y Erosión: La resistencia a la erosión del HCR es proporcional a su resistencia a la compresión y a la abrasión de los agregados empleados en la mezcla. El HCR 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.
- Resistencia al Congelamiento y Deshielo: Debido a que generalmente en las mezclas HCR 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 HCR de altas resistencias con bajas permeabilidades tienen una mayor resistencia al congelamiento - deshielo que las mezclas pobres de bajas resistencias.

Si las mezclas HCR 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 HCR 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 HCR 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. (U.S Army Corps Of Engineers, 1992)

2.8.10. 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 HCR. En el HCR hay poca cantidad de vacíos de aire retenido, reducidos principalmente por la gran

compactación. Esto significa que existe una mayor cantidad de sólidos en un volumen unitario de HCR, 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 2 400 kg/m³ son comunes para HCR.

2.9. Diseño de las mezclas de HCR

El objetivo básico de la proporción de mezclas de HCR 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.

2.9.1. Método del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos

Este método de proporción de mezclas está basado en la relación agua/cemento y resistencia, por lo que es ideal para las mezclas de HCR con filosofía de diseño del concreto. 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. 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.

El procedimiento a seguir, para la dosificación de mezclas de HCR, con el método del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, consta de 10 pasos detallados a continuación:

Paso 1: Determinar todos los requisitos relacionados con las propiedades de la mezcla de HCR como ser:

- Resistencia característica.
- Edad.
- Tiempo de consolidación Vebe.
- Tipo de cemento y puzolana a utilizar.
- Uso de aditivos.
- Tamaño máximo, banco y calidad del agregado para la mezcla.

Paso 2: Delimitar las propiedades esenciales de los materiales (peso específico del cemento y los agregados)

Paso 3: De la Tabla 2.9.1., estimar las necesidades de agua y el contenido de aire atrapado.

Tabla 2.9.1. Contenido de agua, contenido de arena, relación pasta mortero y contenido de aire atrapado para varios tamaños nominales de agregados

Contents	Nominal Maximum Size of Aggregate ^a					
	19.0 mm		50 mm		75 mm	
	Average	Range	Average	Range	Average	Range
Water content ^b , kg/m ³						
a) Vebe <30 sec	150	133-181	122	107-140	107	85-128
b) Vebe >30 sec	134	110-154	119	104-125	100	97-112
Sand content, % of total aggregate volume						
a) crushed aggregate	55	49-59	43	32-49	34	29-35
b) rounded aggregate	43	38-45	41	35-45	31	27-34
Mortar content, % by volume						
a) crushed aggregate	70	63-73	55	43-67	45	39-50
b) rounded aggregate	55	53-57	51	47-59	43	39-48
Paste: mortar ratio, Vp/Vm, by volume	0.41	0.27-0.55	0.41	0.31-0.56	0.44	0.33-0.59
Entrapped air content on -1 1/2 in. (37.5-mm) fraction, %	1.5	0.1-4.2	1.1	0.2-4.1	1.1	0.5-3.3

^a Quantities for use in estimating water, sand, mortar, and entrapped air content for trial RCC mixture proportioning studies.

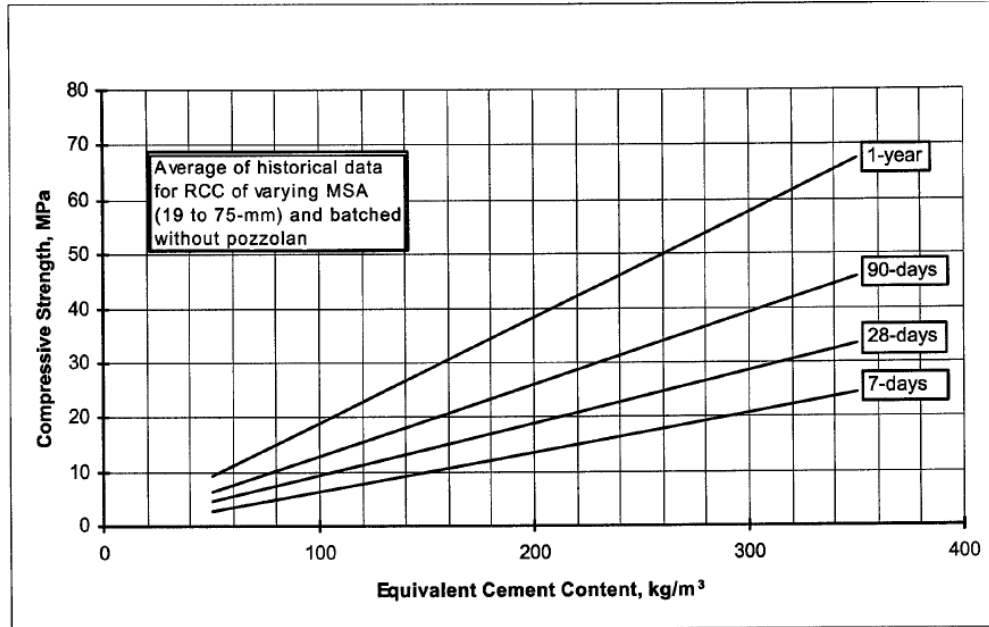
^b Lower range of values should be used for natural rounded aggregates and mixtures with low cementitious material or aggregate fines content.

Fuente: U.S Army Corps Of Engineers, 2000

Paso 4: Especificar el peso equivalente de cemento para la resistencia a compresión requerida, usando la Figura 2.9.1. Si se prevé el uso de puzolana,

calcular las cantidades de cemento y puzolana basándose en el volumen absoluto equivalente de cemento requerido.

Figura 2.9.1. Gráfica de Contenido equivalente de cemento vs. Resistencia a la compresión



Fuente: U.S Army Corps Of Engineers, 2000

Paso 5: Calcular las proporciones de agregado grueso necesarias que mejor se aproximen a la tabla de granulometría de agregado grueso ideal mostrada en la tabla 2.9.2.

Tabla 2.9.2. Granulometría de agregado grueso ideal

Sieve Size	Cumulative Percent Passing		
	4.75 to 75 mm (No. 4 to 3 in.)	4.75 to 50 mm (No. 4 to 2 in.)	4.75 to 19.0 mm (No. 4 to 3/4 in.)
75 mm (3 in.)	100		
63 mm (2-1/2 in.)	88		
50 mm (2 in.)	76	100	
37.5 mm (1-1/2 in.)	61	81	
25.0 mm (1 in.)	44	56	
19.0 mm (3/4 in.)	33	44	100
12.5 mm (1/2 in.)	21	28	63
9.5 mm (3/8 in.)	14	18	41
4.75 mm (No. 4)	--	--	--

Fuente: U.S Army Corps Of Engineers, 2000

Paso 6: Compare la granulometría de agregado fino a disposición con la granulometría de agregado fino ideal que se muestra en la tabla 2.9.3. Si el agregado fino carece de finos menores a 75 μm (tamiz N° 200), se puede utilizar puzolana como suplemento.

Tabla 2.9.3. Granulometría límite de agregado fino

Sieve Size	Cumulative Percent Passing
9.5 mm (3/8 in.)	100
4.75 mm (No. 4)	95-100
2.36 mm (No. 8)	75-95
1.18 mm (No. 16)	55-80
600 μm (No. 30)	35-60
300 μm (No. 60)	24-40
150 μm (No. 100)	12-28
75 μm (No. 200)	6-18
Fineness modulus	2.10-2.75

Fuente: U.S Army Corps Of Engineers, 2000

De la tabla 2.9.1. seleccionar el contenido de agregado fino (arena) para el tamaño máximo y tipo (triturados o redondeados) de agregado grueso a utilizar.

Paso 7: Calcular los volúmenes absolutos y pesos de todos los ingredientes de la mezcla en base a la información obtenida en los paso 2 al 6.

Paso 8: Calcular el contenido del mortero y comparar con los valores dados en la tabla 2.9.1.

El volumen del mortero incluye el volumen de todo agregado menor que 4.75 mm (tamiz N° 4), materiales cementantes, agua y aire atrapado. Ajustar el contenido de agregado fino, si se requiere, para aumentar o disminuir el volumen del mortero.

Paso 9: Calcular el volumen de pasta y la relación volumen de pasta / volumen del mortero, V_p/V_m .

Para el volumen de pasta incluir el volumen de todo el agregado, materiales cementantes, agua y aire atrapado. La relación mínima V_p/V_m debe ser mayor que 0.42 para asegurar que todos los huecos se llenan. Si se requiere, ajustar el contenido de material cementante o la cantidad de áridos.

Paso 10: Evaluar la trabajabilidad y la resistencia de la mezcla de HCR por lotes de prueba.

2.9.2. Método de suelos simplificado o utilizando concepto de compactación de suelos

El diseño de mezclas de Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) 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 HCR obtenidas en el campo pueden ser modeladas y previstas en el laboratorio usando métodos convencionales.

Reconociendo la versatilidad potencial y económica del HCR 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 HCR. Para lograr este objetivo, un proyecto de HCR debe utilizar equipos de laboratorio, ensayos, tecnologías de construcción y control de campo, conocidos.

La metodología simplificada considera que el HCR 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 HCR debe ser curado y tratado como si éste fuera un concreto convencional. Debido a que el HCR 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.

El procedimiento es el siguiente:

Selección de agregados: La selección y el control de granulometría de los agregados son factores importantes que influyen en la calidad y propiedades del HCR. Los

agregados utilizados en la mezcla deben reunir los requerimientos de calidad de la Norma ASTM C 33, aplicada para agregados de concreto.

La granulometría de los agregados puede ser seleccionada siguiendo los lineamientos propuestos por Choi y Groom (2001), la cual se muestra en la tabla 2.9.4. y la figura 2.9.2.

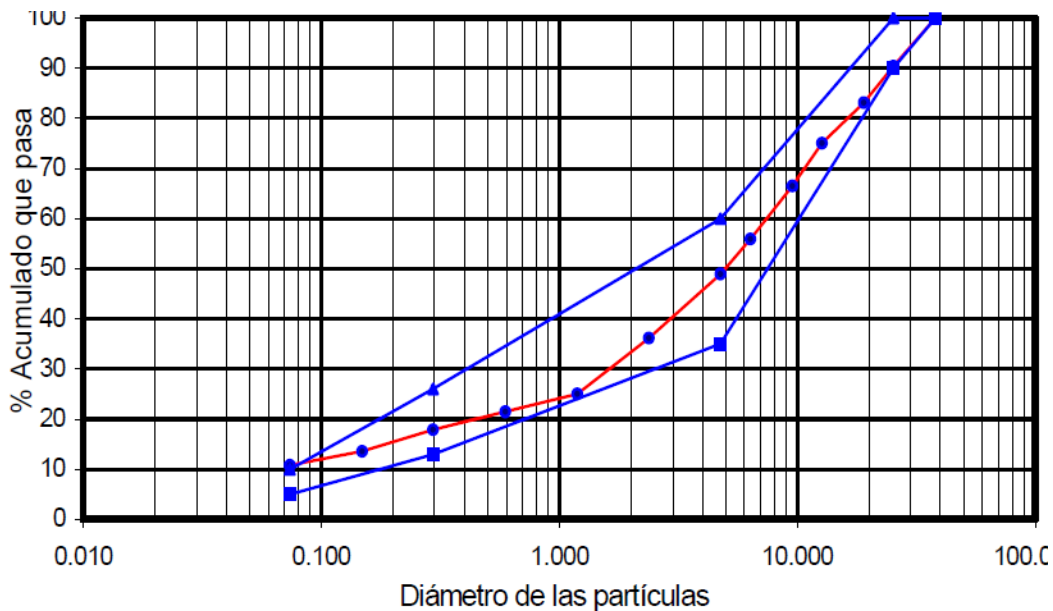
Choi y Groom (2001), han propuesto usar esta granulometría para el agregado del HCR, especialmente para proyectos de tamaño pequeño a mediano, tal como el utilizado en la protección de terraplenes, donde el presupuesto para gastos de investigación de campo y ensayos de los agregados es limitado.

Tabla 2.9.4. Granulometría de los agregados manejados en el diseño de mezclas HCR

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

Fuente: Escalaya Miriam, 2006

Figura 2.9.2. Curva granulométrica de agregados a utilizar en el diseño de las mezclas HCR



Fuente: Escalaya Miriam, 2006

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 HCR pueden ser fácilmente calibradas durante la construcción.

La cantidad de material cementante generalmente oscila entre el 12 % y 16 % de la masa seca de los agregados. Y la puzolana se utiliza hasta en un 50 % de la masa del cemento.

Determinación del contenido de humedad: El siguiente paso es estimar el contenido de humedad a usarse en la preparación de las probetas de HCR. 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 óptima – densidad máxima, haciendo uso del ensayo de compactación Proctor Modificado (ASTM D 1557). Este ensayo se utiliza para delimitar 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 las mezclas de HCR, se realiza un ensayo Proctor Modificado para mínimamente 4 contenidos de humedad, los puntos del contenido de humedad - peso unitario seco se grafican y se traza una curva uniforme a través de ellos. El pico de esta curva dará el máximo peso unitario seco y el óptimo contenido de humedad (OCH) que se usará para determinar la proporción de todos los componentes de la mezcla de HCR.

Se debe tener en consideración que debido a la hidratación del cemento, los contenidos de humedad no pueden 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.

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

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

Donde:

P: Peso total de la mezcla (en el molde de volumen V)
después de la compactación

P_w : Peso del agua

P_s : Peso seco de los agregados

P_c : Peso del cemento

P_f : 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 .

2.10. Preparación de especímenes

Para la preparación de especímenes se han utilizado varios métodos, con el objeto de especificar las propiedades de mezclas HCR. El problema radica en la preparación de especímenes de laboratorio que produzcan propiedades parecidas a las de HCR 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 plg de diámetro y 12 plg de altura (152 por 304

mm). Estos moldes son fácilmente disponibles y pueden acomodar agregados de tamaño máximo de 2 plg (50 mm).

Para mezclas HCR que usan agregados de TMA, los agregados mayores a 2 plg (50 mm) pueden ser tamizados o pueden utilizarse moldes más grandes, diseñados para este caso.

Usualmente, se emplean moldes cilíndricos de media caña o con hendidura para permitir la extracción más fácil de las mezclas secas compactadas de HCR. 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 manejan tres métodos básicos: Compactación por impacto, vibración y apisonamiento.

2.10.1. Especímenes Compactados por Impacto

Los métodos de compactación por impacto para la preparación de especímenes se han limitado a mezclas de consistencia seca con aproximación a suelos. El número de capas usado en la preparación de cilindros de prueba ha variado desde 3 capas de 4 plg (100 mm) de espesor a 6 capas de 2 plg (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 aprovechado 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 plg (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 plg (356 mm) de diámetro fue utilizado para realizar los ensayos en el HCR, el cual fue preparado con un agregado de tamaño máximo de 3 plg (75 mm).

Reeves y Yates 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 HCR hecho con un agregado de caliza de tamaño máximo de 1,5 plg (38 mm). Los especímenes de HCR fueron preparados en 6 capas de 2 pulg (50 mm) y recibieron 122 golpes por capa. (Reeves, y otros, 1985)

Ensayos más recientes realizados por Casias, Goldsmith y Benavides, del U.S. Bureau 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 están 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 ft-lb/plg³ (1 100 kJ/m³) provee mejores especímenes de ensayo. Este grado de compactación fue obtenido colocando el HCR en seis capas de 2 plg (50mm) y dando 50 golpes a cada capa. (Goldsmith, y otros, 1988)

Wong, Bischoff y Johnson 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 plg de diámetro con bordes redondeados. El peso total del pisón continuaba en 10 lb (4,5 kg) y había una distancia de ¼ plg (6 mm) 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 plg (100 mm). Los ensayos fueron hechos sin material cementante y la diferencia asciende a 1,3 lb/ft³ (20,8 kg/m³) en mayor densidad. El esfuerzo de compactación usado fue igual a 12,2 ft-lb/plg³ (1 009 kJ/m³). (Wong, y otros, 1988)

2.10.2. 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 plg por 12 plg (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 HCR. 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 plg (240 mm) de diámetro con una altura de 8 plg (200 mm).

2.10.3. Especímenes Apisonados

Otro método para producir cilindros de HCR 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 HCR, ambos usan una superficie llana de 5 a 5¾ plg (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 plg (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 HCR 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 HCR 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 HCR 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 plg (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 plg (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. (Escalaya Miriam, 2006).

2.11. Métodos de control de calidad del HCR

La finalidad del control de calidad, es verificar la buena ejecución de la obra, detectando realizaciones defectuosas.

2.11.1. Controles en planta

Las resistencias a compresión, esfuerzos cortantes, choque, desgaste, etc., de los áridos del HCR deberán ser iguales o mejores que las exigidas para el concreto convencional, para lo cual deben cumplir las exigencias indicadas en la tabla 2.7.4.

“Características y ensayos para agregados utilizados en presas de HCR”. En los casos dudosos se deben realizar, la determinación del coeficiente de calidad con la máquina de los ángeles, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C 131 “Estándar Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine”.

La medición de las consistencias se delimitaran mediante el aparato Vebe y el método recomendado por el ACI 211.3,75 “Recommended Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete” en el cual, las consistencias de 20 a 50 segundos son adecuadas para su compactación mediante un rodillo vibrante de 12 toneladas con espesores inferiores a 40 cm.

Además del correcto calibrado en planta, y de los controles específicos para cada material acoplado, es importante el control de granulometría de la mezcla. Para ello se tomará material mezclado seco, antes del ingreso del agua, y se determinará su granulometría, según ASTM C 136, para compararla con la mezcla granulométrica tipo, realizando las correcciones que corresponden si fuera necesario.

Finalmente se moldearán probetas con material extraído en planta, para luego de curadas, ensayarlas a edades de 7 y 28 días, lo que permitirá verificar la calidad estructural de la mezcla.

2.11.2. Controles en obra

El control de la compactación del HCR se realizará, siempre que sea posible, utilizando registradores gráficos continuos instalados en los equipos de compactación, que permitan controlar la velocidad de avance, la frecuencia de vibración y la distancia recorrida, siguiendo lo indicado en la norma ACI 309r 05. El grado de compactación deberá ser superior al 95% del grado de compactación máximo para la dosificación dada.

El control de la densificación y del porcentaje de humedad durante la compactación con rodillo se materializará con densímetro nuclear, Norma ASTM D 2922, el cual permite medir la densidad húmeda y seca del material y porcentaje de humedad, control que se puede realizar a distintas profundidades dentro del espesor de una capa. El control de densidad se efectuará como mínimo cada 100 metros cuadrados sobre el material compactado en el día, verificando que se cumplan las exigencias

indicadas para la sección de ensayo. En el caso del control de la humedad, se efectuarán todo los días un mínimo de cinco determinaciones en correspondencia con las efectuadas en el control de producción.

Se acostumbra controlar también la densidad por el método de la arena, para efectuar las comparaciones de valores obtenidos.

El control de espesores deberá realizarse cada diez metros de longitud, sobre el material sin compactar o con una previa precompactación parcial, mediante un clavo provisto de escala o tope indicador. Se deberá tener en cuenta la disminución que sufrirá la capa debido a la compactación. Este control se realiza desde la máquina distribuidora, a medida que ésta avanza, de manera que cualquier error pueda corregirse inmediatamente.

Posteriormente se extraerán testigos del núcleo de la presa, utilizando un equipo extractor a diamantina, las muestras serán de 15 cm de diámetro, aproximadamente cada 50 m. Los orificios producidos en el HCR por la extracción de testigos serán rellenados con hormigón de igual calidad que el empleado para la presa, el que será correctamente compactado y enrasado. Además, con éstas probetas se deben materializar ensayos a compresión directa y a tracción por compresión diametral para evaluar la calidad del HCR.

Para la preparación de las muestras y el proceso de la información, se pueden utilizar las “Guías Técnicas para Diseños de Ingeniería, adaptación del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estado Unidos”.

El control de curado consiste en controlar que la superficie de HCR se encuentre saturada de humedad, las probetas de prueba elaboradas en obra deberán seguir los procedimientos de curado indicados en la Norma ASTM C 31.

Por otra parte en el HCR es importante comprobar la permeabilidad de la unión entre capas, con el fin de tomar medidas correctivas, a la vez que mejoren los tratamientos en las juntas si los resultados no son satisfactorios.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Descripción de la investigación

El presente trabajo consistirá en una comparación de la resistencia mecánica a compresión y la permeabilidad de probetas de HCR realizadas en laboratorio con ambas filosofías de diseño.

Para lo cual primeramente se estudiará a detalle cada filosofía de diseño, en lo referente a concepto, ventajas, desventajas, materiales que la componen, diseño de mezclas y preparación de especímenes de laboratorio.

Después se procederá seleccionar los materiales a ser utilizados en las mezclas.

Para la selección de los agregados, se ejecutarán los ensayos de granulometría, absorción, peso específico y demás pruebas necesarias, para verificar el cumplimiento de las especificaciones de la Norma ASTM C-33.

Una vez definidos los materiales a utilizar, se procederá al diseño de las dosificaciones, para lo cual se emplearán distintos métodos de selección de proporción de materiales para cada filosofía.

Ya con las dosificaciones definidas, se materializarán las mezclas en el laboratorio e inmediatamente listas las mezclas se determinarán las trabajabilidades de las mezclas de HCR realizadas para ambas filosofías, concreto y suelo.

Para las probetas de hormigón compactado con rodillo diseñadas con filosofía del concreto se ejecutaran 36 especímenes vibrados según la Norma ASTM C 1176, con tres dosificaciones diferentes, con el fin de analizar la influencia de la relación agua/cemento en las propiedades del hormigón, de las 12 probetas hechas con cada dosificación se ensayará la resistencia a compresión a los 7, 14 y 28 días, con 3 probetas para cada edad del hormigón y se someterá las otras 3 a un ensayo de absorción por capilaridad del hormigón, para el posterior cálculo de la permeabilidad.

Para el caso de la filosofía del suelo, se obrarán 36 especímenes compactados por impacto según ASTM D 1557, con tres diferentes porcentajes de material cementante, se analizará la resistencia mecánica a compresión para cada porcentaje a las edades de 7, 14 y 28 días con 3 probetas en cada edad y 3 más para el ensayo de absorción por capilaridad del hormigón, y de igual manera el posterior cálculo de la permeabilidad.

Una vez realizados los ensayos a las 72 probetas, se procederá a tabular e interpretar los valores obtenidos, finalmente comparar y ejecutar las correlaciones e interpretaciones de ambas filosofías de diseño para determinar la mejor alternativa a utilizar en la construcción de represas hechas con hormigón compactado con rodillo.

3.2. Selección de materiales

Los materiales que se manejaron en las mezclas de HCR serán: Cemento, agregado grueso, agregado fino y agua. No se empleó ningún aditivo ni puzolana en la mezcla.

3.2.1. Cemento

El cemento que se aprovechó en la presente investigación es el Cemento Portland “El Puente”, debido a que es el más común en nuestro medio.

Corresponde al Tipo IP, con la designación Cemento Portland con Puzolana, con 70% de cantidad mínima de Portland y 30% máximo de puzolna.

Categoría 30 MPa (306 Kg/cm²) de resistencia mínima a la compresión según la Norma Boliviana NB-011.

Sus principales propiedades son resistencia mecánica media, bajo calor de hidratación, menor retracción y endurecimiento algo más lento; por lo tanto cumple con las necesidades del HCR

Tabla 3.2.1. Informe de control de calidad Cemento El Puente

Especificaciones Químicas	Porcentaje	Especificaciones Físicas	Cantidad	Unidad	
PPF	3,95	Blaine	3421	cm ² /g	
SiO ₂	22,02	Tiempo de Fraguado	Inicial	02:39	min
Al ₂ O ₃	4,93		Final	04:41	horas
FE ₂ O ₃	3,22	Expansión Lee Chatelier	0	mm	
CaO	59,39	Relación a/c	0,542	ml/g	
MG	3,76	Fluidez	110	%	
SO ₃	1,74	Residuos en Mallas	200 M	7,7	% Ret
RI	22,59		325 M	31,6	% Ret
Cal Libre	1,11	Peso Específico	3,14	g/l	

Fuente: Fábrica de Cemento

3.2.2. Agua

El agua de amasado utilizada fue el agua potable disponible en el Laboratorio de Suelos y Hormigones de la UAJMS. No se le realizó ningún examen de conformidad porque la Norma ASTM C 94/C 94M (Especificaciones estándar para el concreto premezclado) permite el uso de agua potable para consumo humano como agua de mezclado en hormigón.

Tabla 3.2.2. Análisis físico del agua potable en la ciudad de Tarija

Parámetro de análisis	Resultados	Unidades
Aspecto	Limpia cristalina	
Olor	Inoloro	
PH	6,88	
Sólido total	33	mg/l
Calcio	1	mg/l
Cloruro	7,9	mg/l
Magnesio	2,8	mg/l
Impureza total	3,8	mg/l
Alcalinidad total	13,2	mg/l
Indice de Langelier	-1,95	No corrosiva

Fuente: COOSALT

3.2.3. Agregado grueso

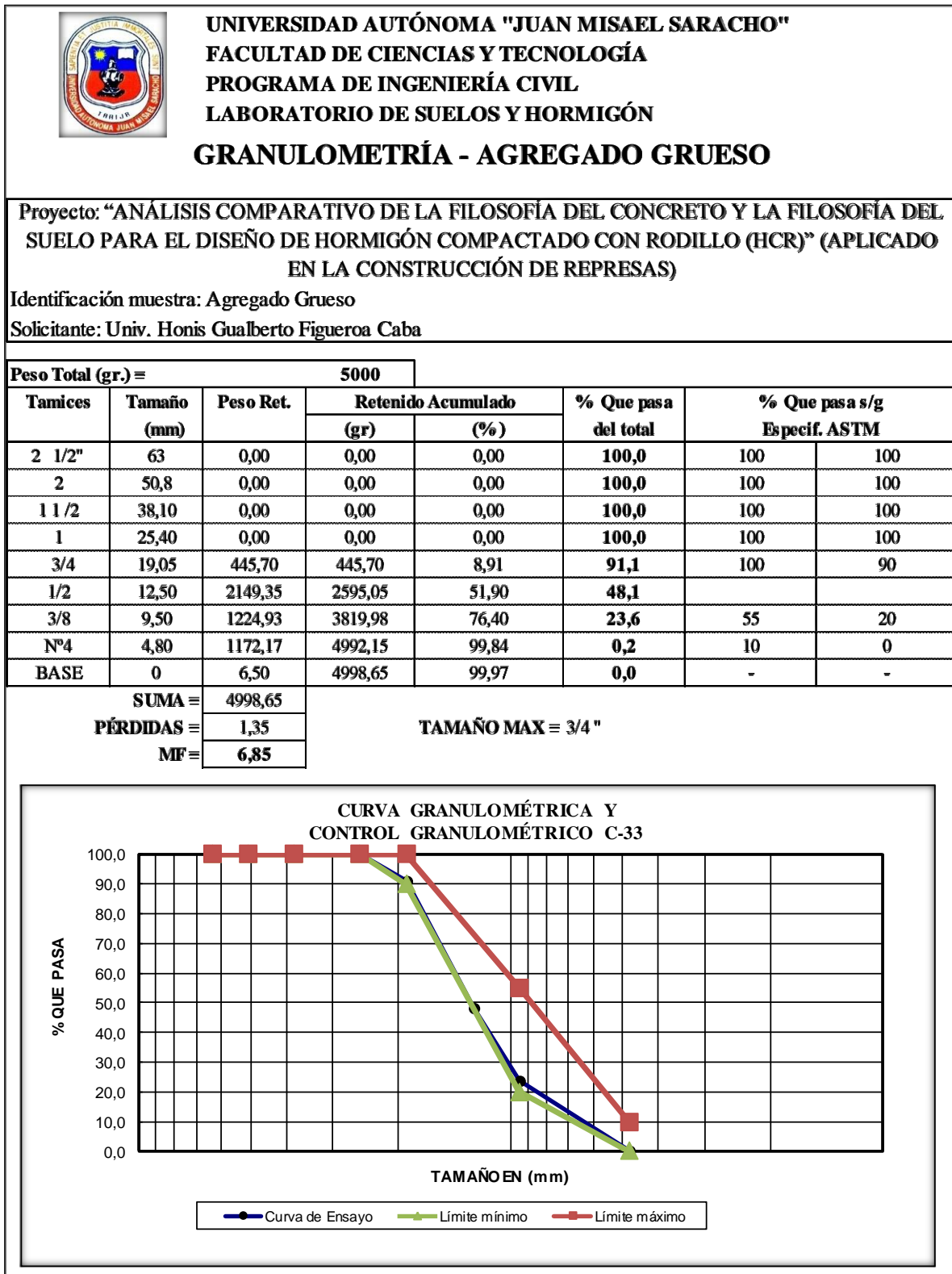
El agregado grueso aprovechado para la elaboración de las probetas de HCR fue grava chancada $\frac{3}{4}$ ", obtenida de la empresa constructora Erika S.R.L., ubicada en la comunidad de Rancho Sur.

Para verificar las propiedades del agregado grueso se ejecutaron las pruebas de laboratorio pertinentes, garantizando así la calidad del hormigón.

Las pruebas materializadas al agregado grueso se encuentran en la sección ANEXOS del presente documento en el Anexo 1.


El agregado grueso empleado cumple con las especificaciones requeridas, los resultados a los ensayos obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 3.2.3. Análisis Granulométrico Agregado Grueso



Fuente propia

Tabla 3.2.4. Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso

 <p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGÓN</p> <p style="text-align: center;">PESO ESPECÍFICO - AGREGADO GRUESO</p>							
<p>Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)" (APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)</p> <p>Procedencia: Tarija</p> <p>Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba</p>							
MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (g)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (g)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (g)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (g/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (g/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (g/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	3467,20	3562,70	2542,90	3,40	3,49	3,75	2,75
2	3461,60	3559,20	2538,70	3,39	3,49	3,75	2,82
3	3453,60	3551,00	2550,20	3,45	3,55	3,82	2,82
PROMEDIO				3,40	3,49	3,75	2,79

Fuente propia

Tabla 3.2.5. Porcentaje de Desgaste del Agregado Grueso por medio de la Máquina de los Ángeles

PORCENTAJE DE DESGASTE DEL AGREGADO GRUESO POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES	
<p>Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)" (APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)</p> <p>Procedencia: Tarija</p> <p>Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba</p>	
<p style="text-align: right;">Identif. Muestra: Agregado Grueso</p> <p style="text-align: right;">Año: 2015</p>	
Peso inicial (Pi)	5000 g
Peso final (Pf)	4084,06 g
Porcentaje de desgaste =	18,32 %
Porcentaje de desgaste ADMISIBLE =	20 %

Fuente propia

Tabla 3.2.6. Peso Unitario Suelto y Compactado del Agregado Grueso

 <p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGÓN</p> <p style="text-align: center;">PESO UNITARIO - AGREGADO GRUESO</p>					
<p>Proyecto: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)” (APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)</p>					
Procedencia: Tarija Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba			Identif. Muestra: Agregado Grueso Año: 2015		
PESO UNITARIO SUELTO					
m					
MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	8290,00	14000,00	29585,00	21295,00	1,521
2	8290,00	14000,00	29874,00	21584,00	1,542
3	8290,00	14000,00	29955,00	21665,00	1,548
PROMEDIO					1,537
PESO UNITARIO COMPACTADO					
MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm ³)
1	8290,00	14000,00	30039,00	21749,00	1,554
2	8290,00	14000,00	30102,00	21812,00	1,558
3	8290,00	14000,00	30094,00	21804,00	1,557
PROMEDIO					1,556


Fuente propia

3.2.4. Agregado Fino

De la misma forma que al agregado grueso, se realizaron ensayos de clasificación a la arena utilizada en las mezclas, verificando así que cumple con las condiciones requeridas para obtener un hormigón de buena calidad.

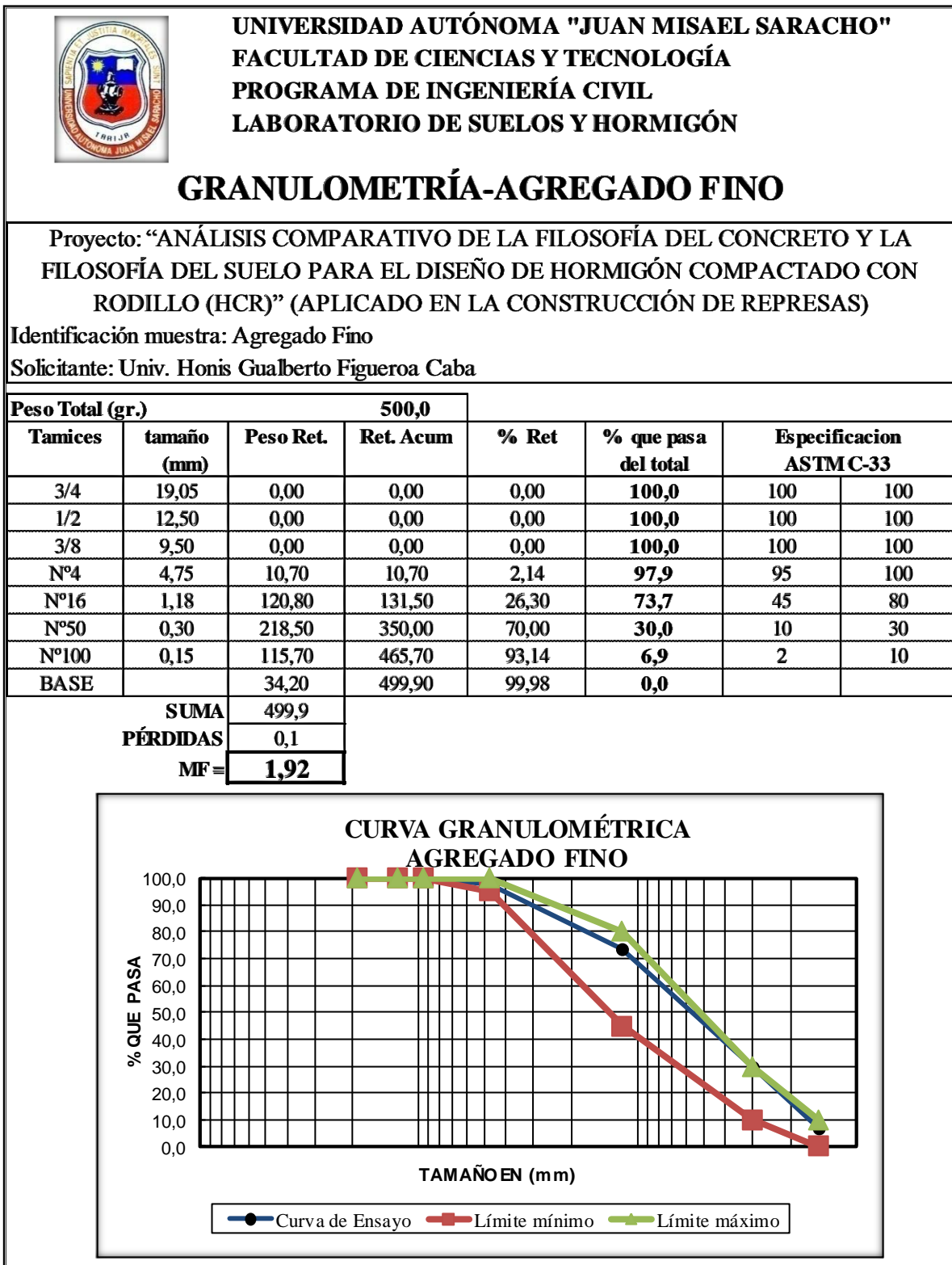
Los ensayos materializados se encuentran en la sección Anexo 1., adjunto al final del presente trabajo, los resultados obtenidos de dichos ensayos se muestran a continuación.

Tabla 3.2.7. Peso Unitario Agregado Fino Suelto y Compactado

 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO" FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGÓN					
PESO UNITARIO - AGREGADO FINO					
Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)" (APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)					
Procedencia: Tarija			Identif. Muestra: Agregado Fino		
Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba			Año: 2015		
PESO UNITARIO SUELTO					
MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	2680,00	3000,00	7475,00	4795,00	1,598
2	2680,00	3000,00	7480,00	4800,00	1,600
3	2680,00	3000,00	7439,00	4759,00	1,586
PROMEDIO					1,595
PESO UNITARIO COMPACTADO					
MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm ³)
1	2680,00	3000,00	8335,00	5655,00	1,885
2	2680,00	3000,00	8298,00	5618,00	1,873
3	2680,00	3000,00	8310,00	5630,00	1,877
PROMEDIO					1,878

Fuente propia

Tabla 3.2.8. Análisis Granulométrico Agregado Fino



Fuente propia

Tabla 3.2.9. Peso Específico y Absorción Agregado Fino



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
 PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGÓN

PESO ESPECÍFICO - AGREGADO FINO

Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)" (APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)	
Procedencia: Tarija	Identif. Muestra: Agregado Fino
Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba	Año: 2015

MUESTRA N°	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRAZ "W" (ml) ó (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLÚMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRANEL (gr/cm ³)	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	P. E. APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	500	177,4	925,1	247,70	479,50	500,00	1,90	1,98	2,07	4,10
2	500	177,4	935,6	258,20	478,90	500,00	1,98	2,07	2,17	4,22
3	500	177,4	932,4	255,00	477,80	500,00	1,95	2,04	2,14	4,44
PROMEDIO							1,94	2,03	2,13	4,25

Fuente propia

3.3. Diseño de las mezclas

Una vez escogidos los materiales a aprovechar en las mezclas de HCR se procedió a realizar las dosificaciones de las mismas, siguiendo los métodos anteriormente descritos.

En el presente estudio se realizaron tres dosificaciones diferentes para cada filosofía del HCR variando en ellas la resistencia de diseño, el procedimiento para la obtención de las proporciones de cada material se detalla en la sección Anexo 2., la cual se adjunta al final del presente trabajo.

3.3.1. Dosificación de probetas para la filosofía del concreto

Para la elaboración de las mezclas con aproximación al concreto se utilizó el método desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, el cual se explica detalladamente en el punto 2.9.1.

A continuación se presenta un resumen de las proporciones empleadas en las mezclas diseñadas utilizando la filosofía del concreto:

Tabla 3.3.1. Resumen Primera Dosificación con aproximación a Concreto (C-1)

RCC - Mezcla de Proporciones (Dosif. C-1)		
Material	Peso, kg/m3 Prop	
<i>Agregado grueso</i>	1147,89	3,83
<i>Agregado fino</i>	808,96	2,70
Cemento	300,00	1,00
Ceniza liviana	0,00	0,00
Agua	178,62	0,60
Aire	0,00	0,00

Fuente propia

Tabla 3.3.2. Resumen Segunda Dosificación con aproximación a Concreto (C-2)

RCC - Mezcla de Proporciones (Dosif. C-2)		
Material	Peso, kg/m3 Prop	
<i>Agregado grueso</i>	1133,06	3,43
<i>Agregado fino</i>	798,51	2,42
Cemento	330,00	1,00
Ceniza liviana	0,00	0,00
Agua	178,25	0,54
Aire	0,00	0,00

Fuente propia

Tabla 3.3.3. Resumen Tercera Dosificación con aproximación a Concreto (C-3)

RCC - Mezcla de Proporciones (Dosif. C-3)		
Material	Peso, kg/m3 Prop	
<i>Agregado grueso</i>	1118,23	3,11
<i>Agregado fino</i>	788,06	2,19
Cemento	360,00	1,00
Ceniza liviana	0,00	0,00
Agua	177,88	0,49
Aire	0,00	0,00

Fuente propia

3.3.2. Dosificación de probetas para la filosofía del suelo

Para las mezclas con aproximación a suelos, se utilizó el método descrito en la sección 2.9.2., las proporciones aprovechadas en cada mezcla se presentan a continuación:

Tabla 3.3.4. Resumen Primera Dosificación con aproximación a Suelos (S-1)

RCC - Mezcla de Proporciones (Dosif. 1)		
Material	Peso, kg/m³ Prop	
<i>Agregado grueso</i>	1910,32	4,64
Cemento	412,05	1,00
Ceniza liviana	0,00	0,00
Agua	147,38	0,36
Aire	0,00	0,00

Fuente propia

Tabla 3.3.5. Resumen Segunda Dosificación con aproximación a Suelos (S-2)

RCC - Mezcla de Proporciones (Dosif. S-2)		
Material	Peso, kg/m³ Prop	
<i>Agregado grueso</i>	1877,86	4,25
Cemento	441,87	1,00
Ceniza liviana	0,00	0,00
Agua	139,94	0,32
Aire	0,00	0,00

Fuente propia

Tabla 3.3.6. Resumen Tercera Dosificación con aproximación a Suelos (S-3)

RCC - Mezcla de Proporciones (Dosif. S-3)		
Material	Peso, kg/m³ Prop	
<i>Agregado grueso</i>	1831,09	3,78
Cemento	484,72	1,00
Ceniza liviana	0,00	0,00
Agua	136,82	0,28
Aire	0,00	0,00

Fuente propia

3.4. Elaboración de muestras

Después de haber obtenido ya las cantidades de los materiales, se procedió a realizar la elaboración de las mezclas. El procedimiento de elaboración de los especímenes cilíndricos se basó en la norma ASTM C-192.

El procedimiento de elaboración de la mezcla, se ejecutó en el Laboratorio de Suelos y Hormigones de la UAJMS, bajo una observación y control riguroso.

Para garantizar una buena adherencia de los agregados utilizados (grava y arena) al momento de realizar el HCR, éstos debieron encontrarse limpios, es decir libres de material orgánico, por lo que fueron lavados con anterioridad a la elaboración de las mezclas.

Los materiales y equipos empleados para la preparación del HCR, fueron: Una hormigonera eléctrica, un cono de Abrams y base, una varilla compactadora, regla enrasadora, brochas, jarras, recipiente, cucharas, badilejos, guantes, y material de limpieza.

Para la compactación del HCR en las probetas metálicas, se aprovecharon equipos de compactación por impacto y vibración, como ser el martillo de 10 lb de peso, manejado en el ensayo de compactación de suelos de Proctor, y la mesa vibratoria empleada en ensayo de densidad relativa, además de una sobrecarga de 20 lb.

El proceso de mezclado fue el siguiente:

- Para el mezclado de los materiales en la hormigonera, primeramente se introdujo en el tambor una pequeña porción del agua de mezcla, aproximadamente un 10%, añadiendo luego los materiales sólidos, grava, cemento, arena, en este orden, conjuntamente con el 80% del agua. El 10% de agua restante, se termina de introducir cuando todos los materiales se encuentran en la mezcladora. El tiempo de mezclado depende en gran parte de la eficiencia de la mezcladora, pero se consideró satisfactorio, un tiempo de 2 minutos, a partir del instante en que todos los materiales han sido colocados en la hormigonera.
- Una porción de la mezcla fue vaciada en un recipiente para realizar el ensayo de asentamiento en el cono de Abrams, el que fue llenado en tres capas, apisonándolas con la varilla con 25 golpes cada una, una vez lleno el cono se enrasó la mezcla, por último se retiró el cono y midió el asentamiento.
- Una vez realizado el control de la mezcla se prosiguió con el llenado de los moldes.
- Para las mezclas con aproximación a concreto, se llenaron los moldes en tres capas iguales, se colocó la sobrecarga encima de cada capa y se

procedió a vibrar la mezcla en la mesa vibratoria, con una frecuencia nominal de 50 Hz, y una amplitud vertical de la mesa de $\pm 0,7$ mm, las mezclas se vibraron hasta que se formó un anillo de pasta alrededor de la sobrecarga, siendo el tiempo muy variado para cada capa y cada dosificación, obteniéndose tiempos desde los 2 hasta de 6 minutos y medio.

- Para las mezclas con aproximación a suelos, se llenaron los moldes en cinco capas, compactando cada capa con 50 golpes utilizando el martillo de compactación de Proctor.
- Al finalizar la compactación se cubrieron las probetas con un material impermeable, para evitar la pérdida de la humedad por evaporación, para posteriormente proceder al desmolde y el curado de las mismas.

3.5. Curado de probetas

De las operaciones necesarias para la ejecución de elementos de hormigón, posiblemente sea, el curado de las probetas, la más importante, por la influencia decisiva que tiene en la resistencia y demás cualidades del elemento final.

Aproximadamente 24 horas después del vaciado del hormigón en las probetas, se procedió a desmoldar las mismas y sumergirlas en su totalidad en agua, teniendo el cuidado de no golpear los especímenes, ya que los mismos se encontraban, aún, en estado frágil y se podría afectar su resistencia futura.

El proceso de curado de probetas consistió en la sumersión de las mismas, en las piscinas con agua que se encuentran en el laboratorio, hasta que cumplan la edad requerida para cada ensayo.

3.6. Pruebas aplicadas

3.6.1. Ensayo mecánico de resistencia a compresión del hormigón

El ensayo mecánico de resistencia de las probetas cilíndricas, se efectuó según la norma ASTM C 39; donde se obtiene el esfuerzo a la compresión y la máxima carga del espécimen.

El equipo empleado en este ensayo fue: una prensa hidráulica, balanza eléctrica y un flexómetro.

El procedimiento del ensayo se describe a continuación:

- Primeramente se verificó con el flexómetro las dimensiones de las probetas realizadas para el ensayo.
- Todas las muestras fueron pesadas antes de su respectivo ensayo, se colocaron las probetas en la parte inferior de la prensa, limpiando ésta con anterioridad, se alineó la muestra, con el centro de la parte superior de la prensa (soporte con cabeza movable).
- Se cubrió la prensa con una cortina de hule transparente por seguridad, y se puso en funcionamiento la prensa, que aplicó la carga continuamente hasta que la probeta falló, registrando la carga y el esfuerzo máximos que resistió la muestra.
- Se registraron los datos proporcionados por la prensa, se retiró la probeta, y antes de desecharla, se observó detalladamente el tipo de falla que presentó.

3.6.2. Ensayo para determinar la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido

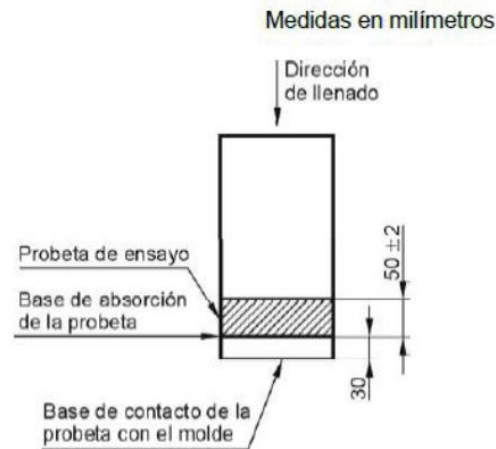
La capacidad y velocidad de succión capilar del hormigón, son parámetros asociados directamente con la durabilidad de las estructuras de hormigón, ya que se produce como consecuencia de la acción de fuerzas de adhesión de las moléculas de agua a las paredes de los poros en el hormigón y otros materiales.

El presente ensayo nos permitió obtener los valores de absorción, porosidad efectiva y sorptividad, con los cuáles se pudo estimar la permeabilidad de las probetas ensayadas.

El equipo utilizado en el ensayo fue: Un horno de temperatura constante (110°C), una balanza eléctrica, un flexómetro, una brocha y pintura aislante.

Primeramente se prepararon las muestras, para lo cual se cortó las probetas como se indica en la figura:

Figura 3.6.1. Preparación de probetas para el ensayo de succión capilar



Fuente: Cristian Sakurai, 2009

Una vez cortadas las probetas, se procedió a sellar, con pintura impermeable, toda la superficie lateral de la muestra, con el fin de evitar la absorción en ese sector no contemplado en los cálculos.

Después se dejó secar las probetas en el horno hasta que el peso de las mismas sea constante.

Se puso agua en una bandeja hasta una altura aproximada de 3 mm, se colocaron las probetas en el agua y se registró el tiempo inicial del ensayo.

Finalmente se registraron los pesos de las probetas en varios intervalos de tiempo, hasta que el peso de las mismas fue constante.

3.7. Teoría estadística para el análisis de datos

3.7.1. Cálculo del error experimental promedio

Existen muchos métodos para determinar el error experimental, pero se aconseja utilizar el cálculo de error de Gauss, que es un método sencillo de aprender, aplicar y que permite extraer el valor medio y el error promedio de una serie de mediciones experimentales dadas, usando las conocidas fórmulas estadísticas.

$$MEDIA = X = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$DES\ V\ STD = s = \left(\frac{\sum (X_i - X)^2}{n - 1} \right)^{1/2}$$

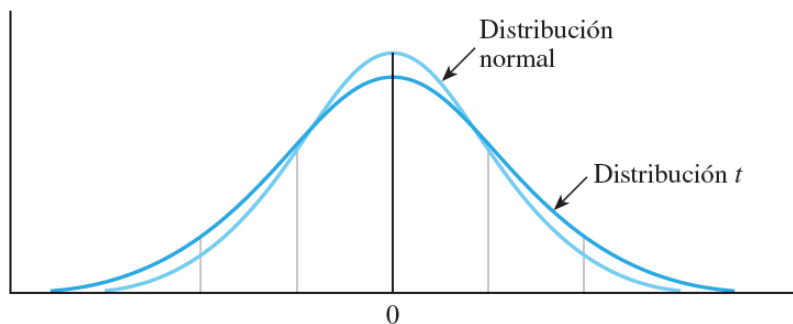
$$ERROR\ EXPERIMENTAL = \delta = \frac{\left(\frac{\sum (X_i - X)^2}{n - 1} \right)^{1/2}}{\frac{\sum X_i}{n}}$$

3.7.2. Distribución de probabilidades

Para la determinación de la resistencia característica se utilizó la tabla de “t” de student ya que este medio es aplicable para cualquier número de ensayos.

La gráfica muestra a la Distribución “t” de Student. Es una curva simétrica respecto de 0. Se la compara con la curva normal, note que es ligeramente más achatada que la curva normal. Sus correspondientes colas que se extienden a izquierda y derecha son ligeramente más altas que en la curva normal.

Figura 3.7.1. Distribución Normal, Distribución "t" de Student



Fuente: Mendenhall, 2006

La Distribución “t” de Student con r grados de libertad es adecuada cuando el número de elementos de una muestra es pequeño (En la práctica menor a 30).

La distribución “t” de Student se aproxima a una Distribución Normal N (0,1), cuando r tiende a ∞, En la práctica se considera buena la aproximación para N < 30.

En la práctica la Distribución “t” de Student se emplea en la teoría de las pequeñas muestras y particularmente cuando se estudia la confiabilidad.

Grados de libertad: Se entiende por grados de libertad a las opciones que se presentan en la estimación del cálculo.

3.7.1. Definición de Resistencia Media y Resistencia Característica

- **Resistencia Media**

Dado un conjunto de n probetas cilíndricas, hechas con hormigón de una cierta calidad, las cuáles son ensayadas a compresión, se obtendrá un conjunto de n valores de la tensión de rotura del material generalmente distintos entre sí, se define como resistencia media:

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ci}$$

Donde:

f_{cm} : Resistencia media

n : Número de probetas ensayadas

f_{ci} : Tensión de rotura para cada probeta

- **Desviación estándar**

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_{cm} - f_{ci})^2}{n - 1}}$$

Donde:

f_{ci} : Valores de cada observación

f_{cm} : Media de la muestra

n : Número de elementos de la muestra

- **Resistencia característica**

La resistencia media es un valor que representa mejor la calidad de hormigón que cualquiera de los resultados aislados de cada probeta, sin embargo no da una idea precisa de la homogeneidad de la calidad del hormigón. Con el propósito de tener en cuenta este problema se introdujo el concepto de resistencia característica del hormigón. Que se define:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

Donde:

f_{ck} : Resistencia característica del hormigón

s : Desviación estándar

El valor de K para encontrar la resistencia característica del hormigón es un valor tal que es igualado o superado, como mínimo por 95% de las probetas ensayadas. En la tabla 3.7.1. se indican los valores de K:

Tabla 3.7.1. Distribución "t" de Student (Grado de confiabilidad 95%)

Número de ensayos menos uno	K	Número de ensayos menos uno	K
1	6.31	17	1.74
2	2.92	18	1.73
3	2.35	19	1.73
4	2.13	20	1.72
5	2.02	21	1.72
6	1.94	22	1.72
7	1.90	23	1.71
8	1.86	24	1.71
9	1.85	25	1.71
10	1.81	26	1.71
11	1.80	27	1.7
12	1.78	28	1.7
13	1.77	29	1.7
14	1.76	30	1.7
15	1.75	Mayor a 30	1.64
16	1.75		

Fuente: Pozzi Azzaro, 1980

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Información generada

Una vez realizados los procedimientos descritos en la sección 3.6., para los dos ensayos a los que se sometieron las probetas de HCR, se procedió a ordenar y tabular los datos obtenidos para las posteriores determinaciones y análisis.

Para el ensayo de resistencia mecánica a la compresión, se organizaron las probetas ensayadas según la filosofía con la cual fueron diseñadas y elaboradas, caracterizándolas con una inicial para facilitar su identificación (“C” para concreto o “S” para suelos), teniendo 27 especímenes para cada filosofía, además, se ordenaron según la resistencia de diseño con la cual fue ejecutada la dosificación, por lo tanto se ensayaron 9 probetas por cada dosificación, las cuáles se dividieron según la edad de la muestra 7, 14 y 28 días.

Para el ensayo de capacidad y velocidad de succión capilar de agua, del HCR, de igual manera se ordenaron las probetas según la filosofía de diseño y la dosificación.

A continuación se presentan los valores obtenidos de cada ensayo ejecutado a las probetas de HCR:

Tabla 4.1.1. Ensayo de resistencia a compresión (filosofía cemento, primera dosificación)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HCR

Proyecto: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)”		Identificación: 54 Probetas
(APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)		
Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba		
Procedencia: Tarija		Año: 2015

Probeta N°	ELEMENTO	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm2)	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm2)	Proyección 28 días (kg/cm2)
1	Probeta HCR	C1-1	20/04/2015	27/04/2015	7	176,71	486,7	49643,40	280,92	389,97
2	Probeta HCR	C1-2	20/04/2015	27/04/2015	7	176,71	469,1	47848,20	270,77	375,87
3	Probeta HCR	C1-3	20/04/2015	27/04/2015	7	176,71	473,4	48286,80	273,25	379,32
4	Probeta HCR	C1-4	04/05/2015	18/05/2015	14	176,71	545,4	55630,80	314,81	370,36
5	Probeta HCR	C1-5	04/05/2015	18/05/2015	14	176,71	560,0	57120,00	323,23	380,27
6	Probeta HCR	C1-6	04/05/2015	18/05/2015	14	176,71	555,2	56630,40	320,46	377,01
7	Probeta HCR	C1-7	20/04/2015	18/05/2015	28	176,71	677,5	69105,00	391,05	391,05
8	Probeta HCR	C1-8	20/04/2015	18/05/2015	28	176,71	665,9	67921,80	384,36	384,36
9	Probeta HCR	C1-9	20/04/2015	18/05/2015	28	176,71	663,7	67697,40	383,09	383,09

Fuente propia

Tabla 4.1.2. Ensayo de resistencia a compresión (filosofía cemento, segunda dosificación)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HCR

Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)"		Identificación: 54 Probetas
(APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)		
Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba		
Procedencia: Tarija		Año: 2015

Probeta Nº	ELEMENTO	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm2)	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm2)	Proyección 28 días (kg/cm2)
10	Probeta HCR	C2-1	22/04/2015	29/04/2015	7	176,71	537,2	54794,40	310,07	430,44
11	Probeta HCR	C2-2	22/04/2015	29/04/2015	7	176,71	516,8	52713,60	298,30	414,09
12	Probeta HCR	C2-3	22/04/2015	29/04/2015	7	176,71	521,5	53193,00	301,01	417,86
13	Probeta HCR	C2-4	06/05/2015	20/05/2015	14	176,71	600,9	61291,80	346,84	408,05
14	Probeta HCR	C2-5	06/05/2015	20/05/2015	14	176,71	619,0	63138,00	357,29	420,34
15	Probeta HCR	C2-6	06/05/2015	20/05/2015	14	176,71	611,7	62393,40	353,07	415,38
16	Probeta HCR	C2-7	22/04/2015	20/05/2015	28	176,71	746,4	76132,80	430,82	430,82
17	Probeta HCR	C2-8	22/04/2015	20/05/2015	28	176,71	733,7	74837,40	423,49	423,49
18	Probeta HCR	C2-9	22/04/2015	20/05/2015	28	176,71	731,3	74592,60	422,11	422,11

Fuente propia

Tabla 4.1.3. Ensayo de resistencia a compresión (filosofía cemento, tercera dosificación)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HCR

Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)"		Identificación: 54 Probetas
(APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)		
Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba		
Procedencia: Tarija		Año: 2015

Probeta Nº	ELEMENTO	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm2)	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm2)	Proyección 28 días (kg/cm2)
19	Probeta HCR	C3-1	27/04/2015	04/05/2015	7	176,71	577,6	58915,20	333,39	462,81
20	Probeta HCR	C3-2	27/04/2015	04/05/2015	7	176,71	564,5	57579,00	325,83	452,31
21	Probeta HCR	C3-3	27/04/2015	04/05/2015	7	176,71	569,6	58099,20	328,77	456,40
22	Probeta HCR	C3-4	11/05/2015	25/05/2015	14	176,71	656,2	66932,40	378,76	445,60
23	Probeta HCR	C3-5	11/05/2015	25/05/2015	14	176,71	687,9	70165,80	397,06	467,13
24	Probeta HCR	C3-6	11/05/2015	25/05/2015	14	176,71	668,0	68136,00	385,57	453,61
25	Probeta HCR	C3-7	27/04/2015	25/05/2015	28	176,71	815,2	83150,40	470,54	470,54
26	Probeta HCR	C3-8	27/04/2015	25/05/2015	28	176,71	801,3	81732,60	462,51	462,51
27	Probeta HCR	C3-9	27/04/2015	25/05/2015	28	176,71	798,7	81467,40	461,01	461,01

Fuente propia

Tabla 4.1.4. Ensayo de resistencia a compresión (filosofía suelo, primera dosificación)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HCR

Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)" Identificación: 54 Probetas
(APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)

Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba
Procedencia: Tarija Año: 2015

Probeta N°	ELEMENTO	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm2)	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm2)	Proyección 28 días (kg/cm2)
28	Probeta HCR	S1-1	21/04/2015	28/04/2015	7	176,71	538,0	54876,00	310,53	431,08
29	Probeta HCR	S1-2	21/04/2015	28/04/2015	7	176,71	532,5	54315,00	307,36	426,67
30	Probeta HCR	S1-3	21/04/2015	28/04/2015	7	176,71	523,3	53376,60	302,05	419,30
31	Probeta HCR	S1-4	05/05/2015	19/05/2015	14	176,71	610,0	62220,00	352,09	414,23
32	Probeta HCR	S1-5	05/05/2015	19/05/2015	14	176,71	590,5	60231,00	340,84	400,99
33	Probeta HCR	S1-6	05/05/2015	19/05/2015	14	176,71	610,3	62250,60	352,27	414,43
34	Probeta HCR	S1-7	21/04/2015	19/05/2015	28	176,71	718,8	73317,60	414,89	414,89
35	Probeta HCR	S1-8	21/04/2015	19/05/2015	28	176,71	707,8	72195,60	408,54	408,54
36	Probeta HCR	S1-9	21/04/2015	19/05/2015	28	176,71	699,5	71349,00	403,75	403,75

Fuente propia

Tabla 4.1.5. Ensayo de resistencia a compresión (filosofía suelo, segunda dosificación)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HCR

Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)" Identificación: 54 Probetas
(APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)

Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba
Procedencia: Tarija Año: 2015

Probeta N°	ELEMENTO	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm2)	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm2)	Proyección 28 días (kg/cm2)
37	Probeta HCR	S2-1	23/04/2015	30/04/2015	7	176,71	592,7	60455,40	342,11	474,91
38	Probeta HCR	S2-2	23/04/2015	30/04/2015	7	176,71	586,6	59833,20	338,59	470,02
39	Probeta HCR	S2-3	23/04/2015	30/04/2015	7	176,71	576,5	58803,00	332,76	461,92
40	Probeta HCR	S2-4	07/05/2015	21/05/2015	14	176,71	660,9	67411,80	381,47	448,79
41	Probeta HCR	S2-5	07/05/2015	21/05/2015	14	176,71	628,5	64107,00	362,77	426,79
42	Probeta HCR	S2-6	07/05/2015	21/05/2015	14	176,71	632,3	64494,60	364,96	429,37
43	Probeta HCR	S2-7	23/04/2015	21/05/2015	28	176,71	791,9	80773,80	457,09	457,09
44	Probeta HCR	S2-8	23/04/2015	21/05/2015	28	176,71	779,8	79539,60	450,10	450,10
45	Probeta HCR	S2-9	23/04/2015	21/05/2015	28	176,71	770,7	78611,40	444,85	444,85

Fuente propia

Tabla 4.1.6. Ensayo de resistencia a compresión (filosofía suelo, tercera dosificación)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
 CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HCR

Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)" Identificación: 54 Probetas
 (APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)

Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba
 Procedencia: Tarija Año: 2015

Probeta Nº	ELEMENTO	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm2)	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm2)	Proyección 28 días (kg/cm2)
46	Probeta HCR	S3-1	28/04/2015	05/05/2015	7	176,71	647,3	66024,60	373,62	518,65
47	Probeta HCR	S3-2	28/04/2015	05/05/2015	7	176,71	640,7	65351,40	369,81	513,37
48	Probeta HCR	S3-3	28/04/2015	05/05/2015	7	176,71	629,7	64229,40	363,46	504,55
49	Probeta HCR	S3-4	12/05/2015	26/05/2015	14	176,71	724,0	73848,00	417,89	491,64
50	Probeta HCR	S3-5	12/05/2015	26/05/2015	14	176,71	696,5	71043,00	402,02	472,97
51	Probeta HCR	S3-6	12/05/2015	26/05/2015	14	176,71	720,1	73450,20	415,64	488,99
52	Probeta HCR	S3-7	28/04/2015	26/05/2015	28	176,71	864,9	88219,80	499,22	499,22
53	Probeta HCR	S3-8	28/04/2015	26/05/2015	28	176,71	851,7	86873,40	491,60	491,60
54	Probeta HCR	S3-9	28/04/2015	26/05/2015	28	176,71	841,7	85853,40	485,83	485,83

Fuente propia

Tabla 4.1.7. Valores obtenidos, ensayo de capacidad y velocidad de succión de agua del HCR

LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

ENSAYO ABSORCIÓN POR CAPILARIDAD DEL HORMIGÓN

Proyecto: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)” (APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)

Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba
 Procedencia: Tarija

Identificación: 54 Probetas
 Año: 2015

Identificación	Peso Inicial (g)	Peso a varios intervalos de tiempo (g)										
		600	900	1200	1800	3600	7200	14400	28800	86400	172800	259200
C1-10	2013,9	2036,80	2040,90	2043,60	2048,50	2058,90	2074,30	2089,40	2102,70	2106,40	2108,50	2108,90
C1-11	2077,8	2114,00	2128,50	2135,40	2149,10	2172,30	2186,50	2198,70	2205,30	2209,50	2211,60	2210,90
C1-12	2033,2	2056,30	2060,50	2063,20	2068,10	2078,60	2094,20	2109,40	2122,90	2126,60	2128,70	2129,10
C2-10	2002,4	2041,40	2050,80	2056,00	2060,20	2073,40	2084,10	2091,80	2099,60	2104,40	2109,50	2110,20
C2-11	1998,0	2026,50	2031,00	2036,60	2043,40	2057,60	2077,10	2095,70	2113,50	2123,60	2128,40	2130,30
C2-12	1923,7	1961,20	1970,20	1975,20	1979,20	1991,90	2002,20	2009,60	2017,10	2021,70	2026,60	2027,30
C3-10	1804,5	1835,90	1848,50	1854,50	1866,40	1886,60	1898,90	1909,50	1915,20	1918,90	1920,70	1920,10
C3-11	1798,4	1830,90	1836,90	1842,10	1850,20	1866,60	1890,80	1902,10	1908,00	1911,60	1914,00	1914,40
C3-12	1903,5	1936,60	1949,90	1956,20	1968,80	1990,10	2003,10	2014,30	2020,30	2024,20	2026,10	2025,40
S1-10	1875,0	1901,70	1906,00	1911,20	1917,60	1930,90	1949,20	1966,70	1983,40	1992,90	1997,40	1999,20
S1-11	1932,7	1966,30	1979,80	1986,30	1999,00	2020,60	2033,80	2045,20	2051,30	2055,20	2057,20	2056,50
S1-12	1919,1	1946,40	1950,80	1956,20	1962,70	1976,30	1995,00	2013,00	2030,00	2039,80	2044,40	2046,20
S2-10	1935,6	1970,60	1977,00	1982,60	1991,40	2009,00	2035,00	2047,20	2053,60	2057,40	2060,00	2060,50
S2-11	1951,2	1989,20	1998,40	2003,40	2007,50	2020,40	2030,80	2038,30	2045,90	2050,60	2055,60	2056,20
S2-12	1929,6	1963,20	1976,70	1983,10	1995,80	2017,40	2030,50	2041,90	2048,00	2051,90	2053,90	2053,20
S3-10	1870,7	1911,60	1918,70	1925,90	1940,50	1961,90	1975,80	1985,20	1989,00	1996,40	2000,80	2002,20
S3-11	1876,4	1919,30	1924,50	1931,80	1946,40	1967,90	1981,80	1991,20	1995,10	2002,50	2006,90	2008,30
S3-12	1858,8	1892,40	1898,60	1903,90	1912,40	1929,30	1954,30	1966,00	1972,10	1975,80	1978,30	1978,70

Fuente propia

4.2. Análisis probabilístico, comparativo

Inicialmente se realizó un análisis de costos de ambas filosofías de diseño de HCR en para cada una de las dosificaciones obtenidas.

De la proporción de mezclas para cada dosificación, se extrajeron las cantidades necesarias de cada material a utilizar en la elaboración del HCR.

Los resultados obtenidos de dicho análisis se muestran a continuación:

PLANILLA DE COSTOS POR M3 DE HCR (Filosofía concreto, Dosif. 1)				
Descripción	Unidad	Rendimiento	P.U.	Total
Materiales:				
Cemento Portland	kg	300	1,11	333,00
Arena Comun	m3	0,42	120,75	50,72
Grava Comun	m3	0,34	120,75	41,06
Total Materiales (Bs):				424,77
Mano de Obra:				
Operador de Compactador	Hr	0,35	20,00	7,00
Ayudante	Hr	1,5	12,50	18,75
Sub total Mano de obra (Bs):				25,75
Cargas Sociales = (% del subtotal mano de obra)(55 - 71,18 %)			55	14,16
Impuestos IVA = 14,94 (% carga social + subtotal mano de obra)			14,94	5,96
Total Mano de obra (Bs):				45,88
Herramientas y Equipo:				
Compactadora de Rodillo	Hr	0,35	285,00	99,75
Otros	%	6	25,75	1,55
Total Herramienta y equipo (Bs):				101,30
Gastos Generales y Administrativos				
Gastos generales = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq.			10	57,19
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				57,19
Utilidad				
Utilidad = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge.			10	62,91
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				62,91
Impuestos				
Impuestos = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge. + Uti.			3,09	21,38
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				21,38
COSTO (Bs):				713,43

PLANILLA DE COSTOS POR M3 DE HCR (Filosofía concreto, Dosif. 2)				
Descripción	Unidad	Rendimiento	P.U.	Total
Materiales:				
Cemento Portland	kg	330	1,11	366,30
Arena Comun	m3	0,41	120,75	49,51
Grava Comun	m3	0,33	120,75	39,85
Total Materiales (Bs):				455,66
Mano de Obra:				
Operador de Compactador	Hr	0,35	20,00	7,00
Ayudante	Hr	1,5	12,50	18,75
Sub total Mano de obra (Bs):				25,75
Cargas Sociales = (% del subtotal mano de obra)(55 - 71,18 %)			55	14,16
Impuestos IVA = 14,94 (% carga social + subtotal mano de obra)			14,94	5,96
Total Mano de obra (Bs):				45,88
Herramientas y Equipo:				
Compactadora de Rodillo	Hr	0,35	285,00	99,75
Otros	%	6	25,75	1,55
Total Herramienta y equipo (Bs):				101,30
Gastos Generales y Administrativos				
Gastos generales = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq.			10	60,28
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				60,28
Utilidad				
Utilidad = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge.			10	66,31
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				66,31
Impuestos				
Impuestos = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge. + Uti.			3,09	22,54
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				22,54
COSTO (Bs):				751,96

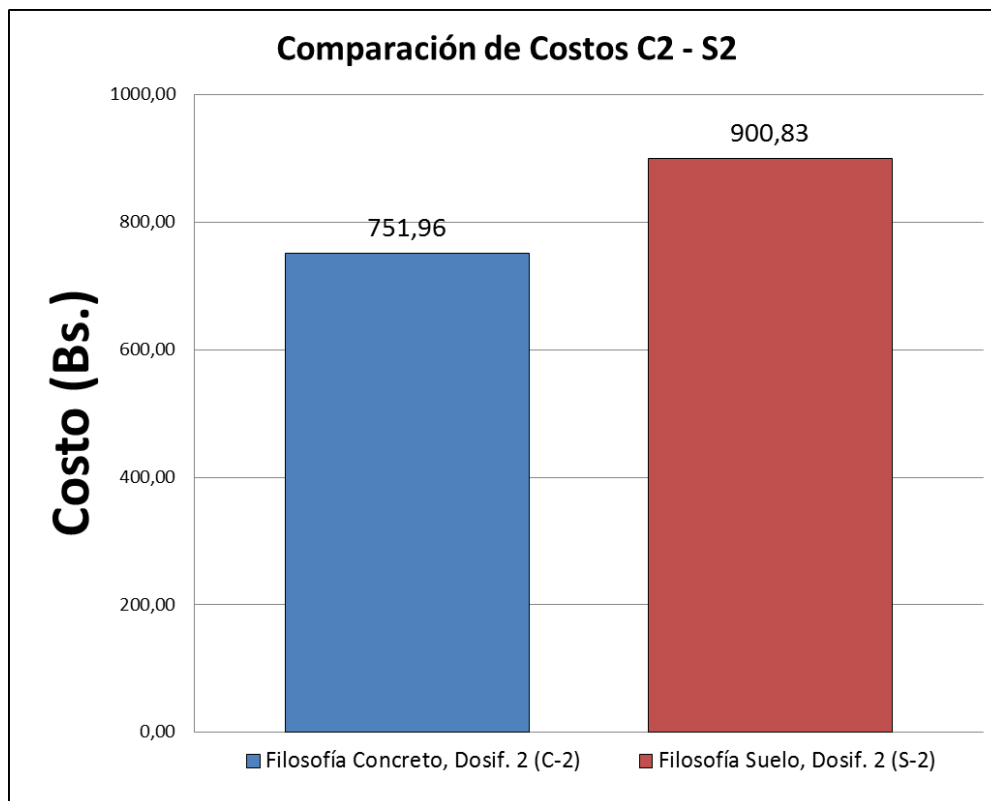
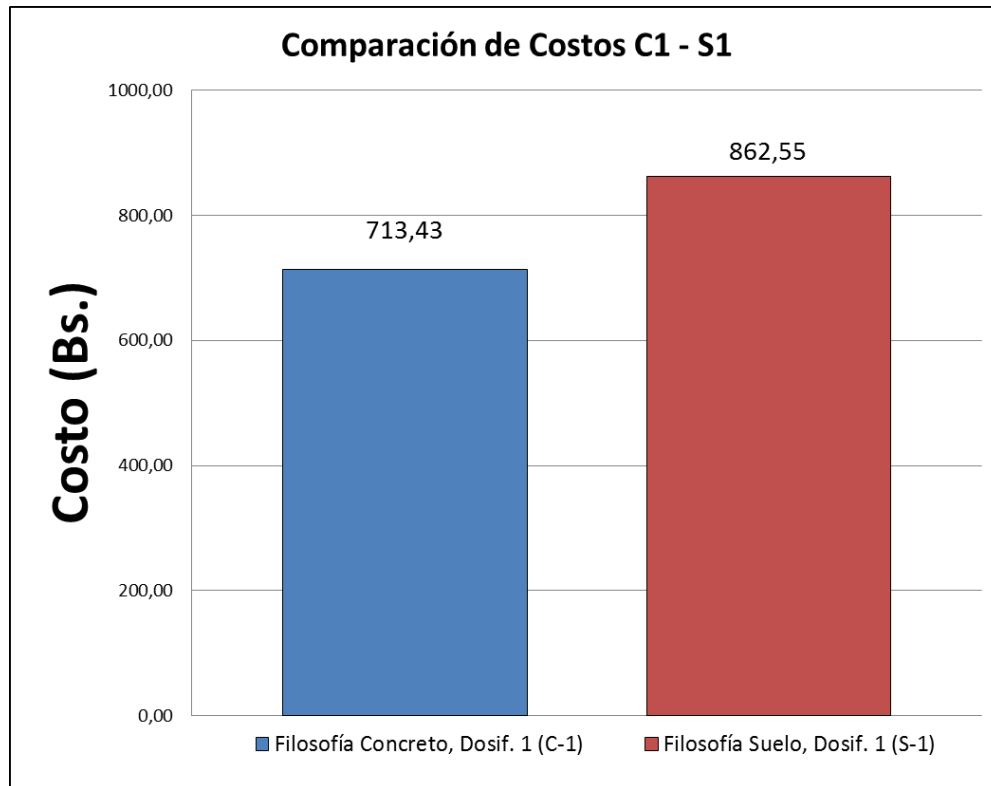
PLANILLA DE COSTOS POR M3 DE HCR (Filosofía concreto, Dosif. 3)				
Descripción	Unidad	Rendimiento	P.U.	Total
Materiales:				
Cemento Portland	kg	360	1,11	399,60
Arena Comun	m3	0,41	120,75	49,51
Grava Comun	m3	0,33	120,75	39,85
Total Materiales (Bs):				488,96
Mano de Obra:				
Operador de Compactador	Hr	0,35	20,00	7,00
Ayudante	Hr	1,5	12,50	18,75
Sub total Mano de obra (Bs):				25,75
Cargas Sociales = (% del subtotal mano de obra)(55 - 71,18 %)			55	14,16
Impuestos IVA = 14,94 (% carga social + subtotal mano de obra)			14,94	5,96
Total Mano de obra (Bs):				45,88
Herramientas y Equipo:				
Compactadora de Rodillo	Hr	0,35	285,00	99,75
Otros	%	6	25,75	1,55
Total Herramienta y equipo (Bs):				101,30
Gastos Generales y Administrativos				
Gastos generales = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq.			10	63,61
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				63,61
Utilidad				
Utilidad = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge.			10	69,97
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				69,97
Impuestos				
Impuestos = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge. + Uti.			3,09	23,78
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				23,78
COSTO (Bs):				793,50

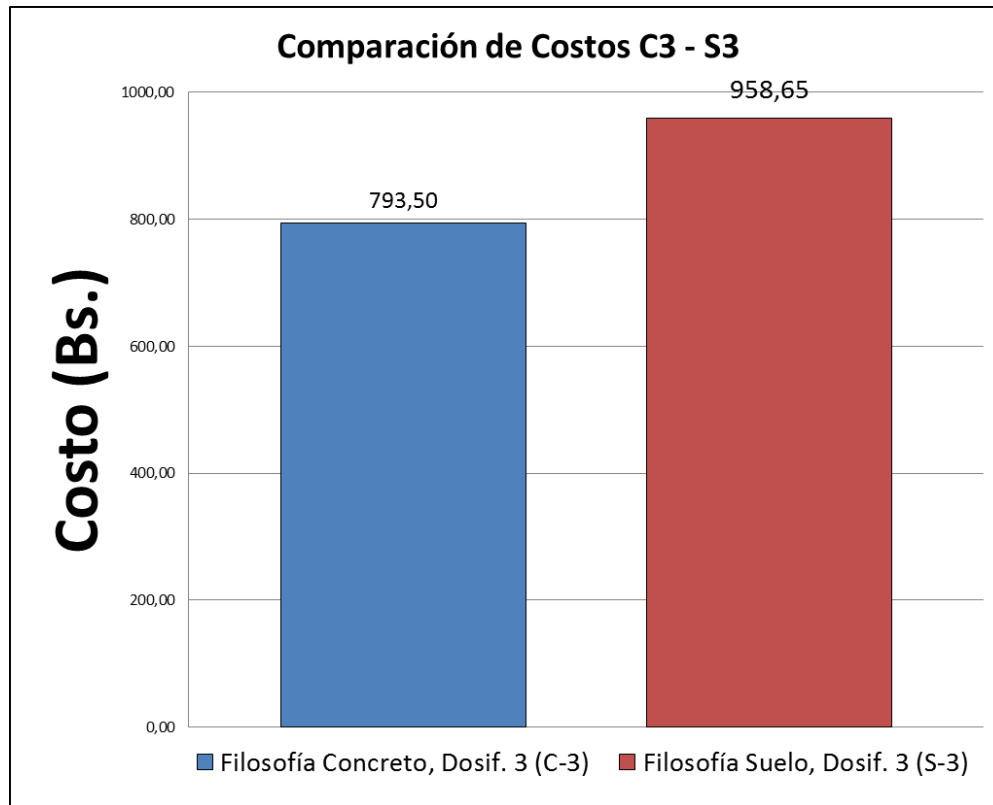
PLANILLA DE COSTOS POR M3 DE HCR (Filosofía suelo, Dosif. 1)				
Descripción	Unidad	Rendimiento	P.U.	Total
Materiales:				
Cemento Portland	kg	412,05	1,11	457,38
Agregado Comun	m3	0,72	120,75	86,94
Total Materiales (Bs):				544,32
Mano de Obra:				
Operador de Compactador	Hr	0,35	20,00	7,00
Ayudante	Hr	1,5	12,50	18,75
Sub total Mano de obra (Bs):				25,75
Cargas Sociales = (% del subtotal mano de obra)(55 - 71,18 %)			55	14,16
Impuestos IVA = 14,94 (% carga social + subtotal mano de obra)			14,94	5,96
Total Mano de obra (Bs):				45,88
Herramientas y Equipo:				
Compactadora de Rodillo	Hr	0,35	285,00	99,75
Otros	%	6	25,75	1,55
Total Herramienta y equipo (Bs):				101,30
Gastos Generales y Administrativos				
Gastos generales = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq.			10	69,15
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				69,15
Utilidad				
Utilidad = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge.			10	76,06
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				76,06
Impuestos				
Impuestos = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge. + Uti.			3,09	25,85
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				25,85
COSTO (Bs):				862,55

PLANILLA DE COSTOS POR M3 DE HCR (Filosofía suelo, Dosif. 2)				
Descripción	Unidad	Rendimiento	P.U.	Total
Materiales:				
Cemento Portland	kg	441,87	1,11	490,48
Agregado Comun	m3	0,7	120,75	84,53
Total Materiales (Bs):				575,00
Mano de Obra:				
Operador de Compactador	Hr	0,35	20,00	7,00
Ayudante	Hr	1,5	12,50	18,75
Sub total Mano de obra (Bs):				25,75
Cargas Sociales = (% del subtotal mano de obra)(55 - 71,18 %)			55	14,16
Impuestos IVA = 14,94 (% carga social + subtotal mano de obra)			14,94	5,96
Total Mano de obra (Bs):				45,88
Herramientas y Equipo:				
Compactadora de Rodillo	Hr	0,35	285,00	99,75
Otros	%	6	25,75	1,55
Total Herramienta y equipo (Bs):				101,30
Gastos Generales y Administrativos				
Gastos generales = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq.			10	72,22
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				72,22
Utilidad				
Utilidad = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge.			10	79,44
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				79,44
Impuestos				
Impuestos = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge. + Uti.			3,09	27,00
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				27,00
COSTO (Bs):				900,83

PLANILLA DE COSTOS POR M3 DE HCR (Filosofía suelo, Dosif. 3)				
Descripción	Unidad	Rendimiento	P.U.	Total
Materiales:				
Cemento Portland	kg	484,72	1,11	538,04
Agregado Comun	m3	0,69	120,75	83,32
Total Materiales (Bs):				621,36
Mano de Obra:				
Operador de Compactador	Hr	0,35	20,00	7,00
Ayudante	Hr	1,5	12,50	18,75
Sub total Mano de obra (Bs):				25,75
Cargas Sociales = (% del subtotal mano de obra)(55 - 71,18 %)			55	14,16
Impuestos IVA = 14,94 (% carga social + subtotal mano de obra)			14,94	5,96
Total Mano de obra (Bs):				45,88
Herramientas y Equipo:				
Compactadora de Rodillo	Hr	0,35	285,00	99,75
Otros	%	6	25,75	1,55
Total Herramienta y equipo (Bs):				101,30
Gastos Generales y Administrativos				
Gastos generales = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq.			10	76,85
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				76,85
Utilidad				
Utilidad = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge.			10	84,54
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				84,54
Impuestos				
Impuestos = % Mat. + Ma.Ob. + He.Eq. + Ga.Ge. + Uti.			3,09	28,73
Total Gastos Generales y Administrativos (Bs):				28,73
COSTO (Bs):				958,65

Comparando los resultados obtenidos del análisis económico:





Con los resultados obtenidos se puede identificar que el HCR diseñado con la filosofía del concreto es más económico que el HCR con filosofía del suelo.

El precio unitario del HCR elaborado con la filosofía del concreto es aproximadamente 17% más económico.

Para el análisis probabilístico de la prueba de compresión se realizaron los cálculos indicados en la sección 3.7.

- Para el HCR “C 1” a la edad de 7 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (MPa)
C1-1	27,55	26,97
C1-2	26,55	
C1-3	26,80	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
27,55	0,58	0,34
26,55	-0,41	0,17
26,80	-0,17	0,03
	Suma =	0,54
	n =	3
	S =	0,52

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck ≡ 25,45 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,019 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR "C 1" a la edad de 14 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
C1-4	30,87	31,33
C1-5	31,70	
C1-6	31,43	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
30,87	-0,46	0,21
31,70	0,37	0,13
31,43	0,09	0,01
	Suma =	0,35
	n =	3
	S =	0,42

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck ≡ 30,10 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,013 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR "C 1" a la edad de 28 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
C1-7	38,35	37,87
C1-8	37,69	
C1-9	37,57	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
38,35	0,48	0,23
37,69	-0,18	0,03
37,57	-0,30	0,09
	Suma =	0,35
	n =	3
	S =	0,42

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

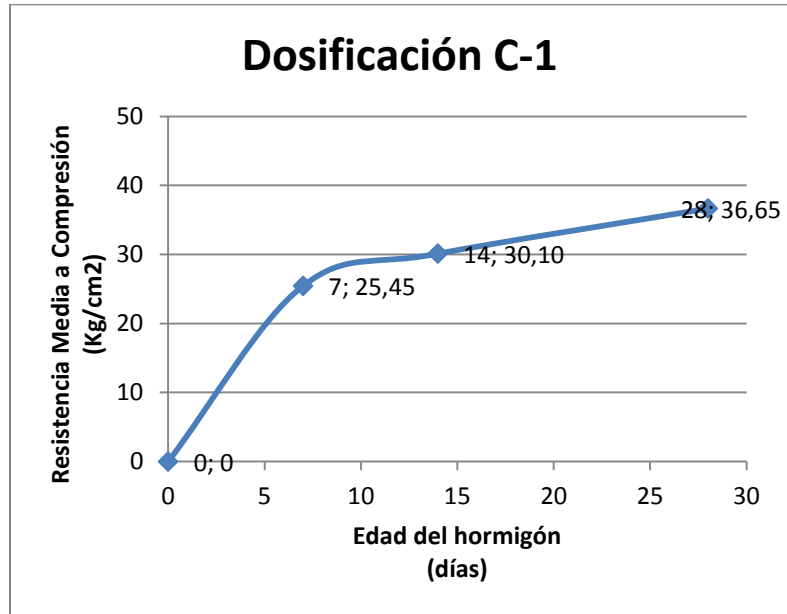
$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck ≡ 36,65 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,011 \quad \text{Control excelente}$$

Curva de evolución de la resistencia del HCR “C 1”:



- Para el HCR “C 2” a la edad de 7 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
C2-1	30,41	29,73
C2-2	29,25	
C2-3	29,52	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm) ²
30,41	0,68	0,46
29,25	-0,47	0,22
29,52	-0,21	0,04
Suma =		0,73
n =		3
S =		0,60

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck = 27,96 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,020 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR "C 2" a la edad de 14 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
C2-4	34,01	34,56
C2-5	35,04	
C2-6	34,63	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
34,01	-0,55	0,30
35,04	0,48	0,23
34,63	0,07	0,00
	Suma =	0,53
	n =	3
	S =	0,52

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck ≡ 33,05 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,015 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR “C 2” a la edad de 28 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
C2-7	42,25	41,73
C2-8	41,53	
C2-9	41,40	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
42,25	0,52	0,28
41,53	-0,19	0,04
41,40	-0,33	0,11
	Suma =	0,42
	n =	3
	S =	0,46

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

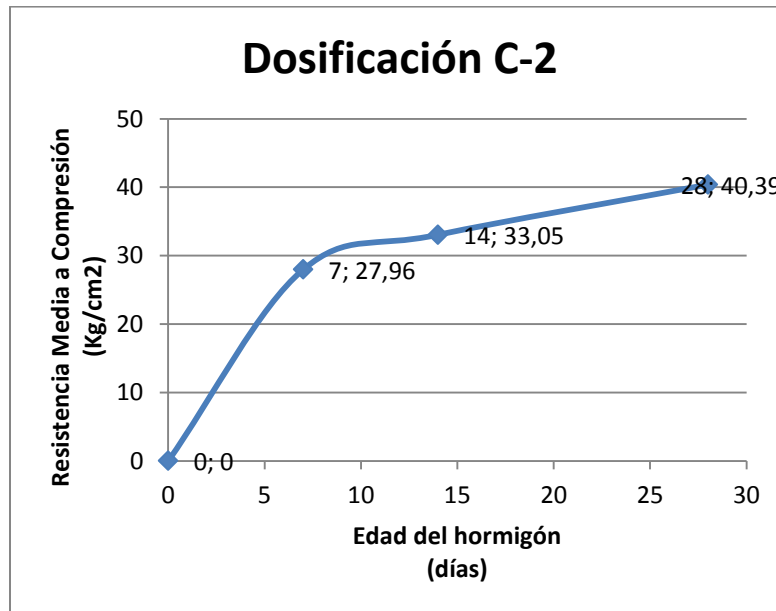
$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

$f_{ck} \equiv 40,39 \text{ Mpa}$

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,011 \quad \text{Control excelente}$$

Curva de evolución de la resistencia del HCR "C 2":



- Para el HCR “C 3” a la edad de 7 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
C3-1	32,70	32,30
C3-2	31,95	
C3-3	32,24	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
32,70	0,40	0,16
31,95	-0,34	0,12
32,24	-0,05	0,00
	Suma =	0,28
	n =	3
	S =	0,37

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck ≡ 31,21 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,012 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR “C 3” a la edad de 14 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
C3-4	37,14	37,97
C3-5	38,94	
C3-6	37,81	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
37,14	-0,82	0,67
38,94	0,97	0,95
37,81	-0,15	0,02
	Suma =	1,65
	n =	3
	S =	0,91

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

f_{ck} ≡ 35,32 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,024 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR “C 3” a la edad de 28 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
C3-7	46,15	45,57
C3-8	45,36	
C3-9	45,21	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
46,15	0,57	0,33
45,36	-0,21	0,05
45,21	-0,36	0,13
Suma =		0,50
n =		3
S =		0,50

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

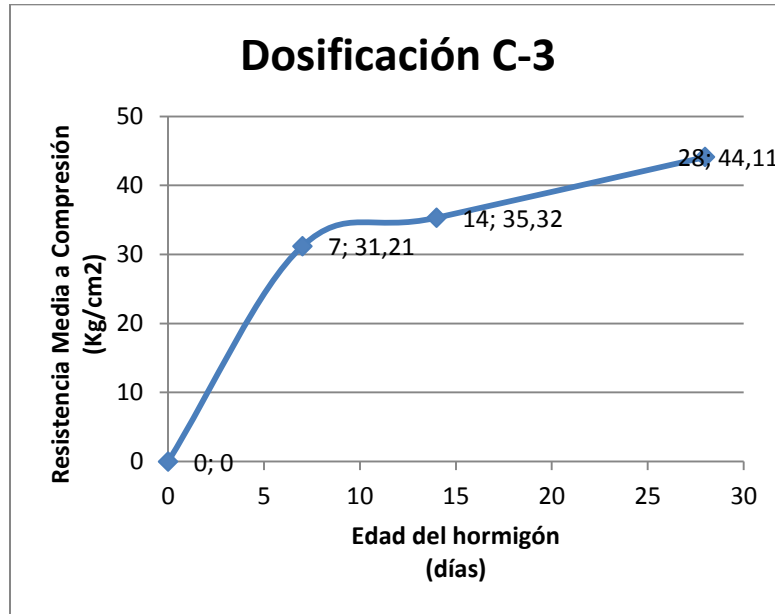
$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck = 44,11 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,011 \quad \text{Control excelente}$$

Curva de evolución de la resistencia del HCR “C 3”:



- Para el HCR “S 1” a la edad de 7 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media
S1-1	30,45	30,07
S1-2	30,14	
S1-3	29,62	

fci	fci - fcm	(fci - fcm) ²
30,45	0,38	0,15
30,14	0,07	0,00
29,62	-0,45	0,20
Suma =		0,35
n =		3
S =		0,42

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

$f_{ck} = 28,85 \text{ Mpa}$
--

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,014 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR "S 1" a la edad de 14 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (MPa)
S1-4	34,53	34,17
S1-5	33,43	
S1-6	34,55	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
34,53	0,36	0,13
33,43	-0,74	0,55
34,55	0,38	0,14
	Suma =	0,82
	n =	3
	S =	0,64

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

$f_{ck} \equiv$	32,29	Mpa
-----------------	--------------	------------

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,019 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR "S 1" a la edad de 28 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
S1-7	40,69	40,12
S1-8	40,07	
S1-9	39,60	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
40,69	0,57	0,33
40,07	-0,05	0,00
39,60	-0,52	0,27
	Suma =	0,60
	n =	3
	S =	0,55

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

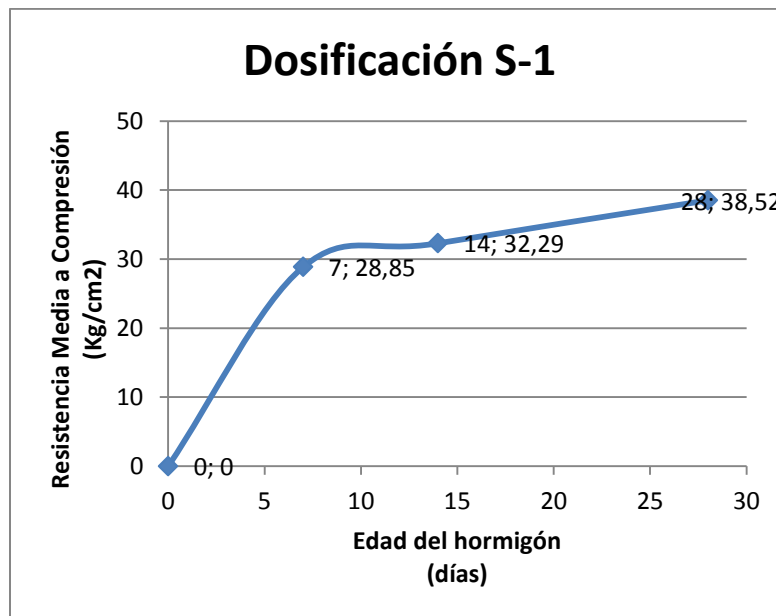
$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

$f_{ck} \equiv$	38,52	Mpa
-----------------	--------------	------------

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,014 \quad \text{Control excelente}$$

Curva de evolución de la resistencia del HCR "S 1":



- Para el HCR “S 2” a la edad de 7 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
S2-1	33,55	33,13
S2-2	33,21	
S2-3	32,63	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
33,55	0,42	0,18
33,21	0,08	0,01
32,63	-0,50	0,25
	Suma =	0,43
	n =	3
	S =	0,46

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

f_{ck} ≡ 31,78 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,014 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR “S 2” a la edad de 14 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
S2-4	37,41	36,26
S2-5	35,58	
S2-6	35,79	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
37,41	1,15	1,32
35,58	-0,68	0,47
35,79	-0,47	0,22
	Suma =	2,01
	n =	3
	S =	1,00

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck = 33,33 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,028 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR “S 2” a la edad de 28 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
S2-7	44,83	44,20
S2-8	44,14	
S2-9	43,63	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
44,83	0,63	0,39
44,14	-0,06	0,00
43,63	-0,57	0,33
	Suma =	0,72
	n =	3
	S =	0,60

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

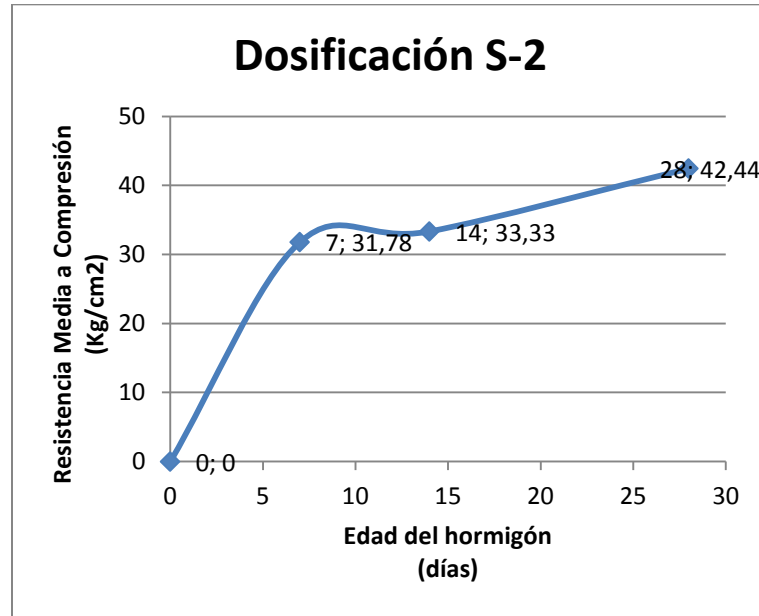
$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck ≡ 42,44 Mpa

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,014 \quad \text{Control excelente}$$

Curva de evolución de la resistencia del HCR “S 2”:



- Para el HCR “S 3” a la edad de 7 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
S3-1	36,64	36,18
S3-2	36,27	
S3-3	35,64	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm) ²
36,64	0,46	0,21
36,27	0,08	0,01
35,64	-0,54	0,29
Suma =		0,51
n =		3
S =		0,50

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck ≡	34,71	Mpa
--------------	--------------	------------

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,014 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR “S 3” a la edad de 14 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
S3-4	40,98	40,39
S3-5	39,43	
S3-6	40,76	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
40,98	0,59	0,35
39,43	-0,96	0,93
40,76	0,37	0,14
Suma =		1,42
n =		3
S =		0,84

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

fck ≡	37,93	Mpa
--------------	--------------	------------

Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,021 \quad \text{Control excelente}$$

- Para el HCR “S 3” a la edad de 28 días:

Identificación	Resistencia (MPa)	Resistencia Media (Mpa)
S3-7	48,96	48,27
S3-8	48,21	
S3-9	47,65	

Fci	fci - fcm	(fci - fcm)^2
48,96	0,69	0,47
48,21	-0,06	0,00
47,65	-0,63	0,39
	Suma =	0,87
	n=	3
	s=	0,66

De la tabla 3.7.1. tenemos:

$$K = 2,92$$

Por lo tanto:

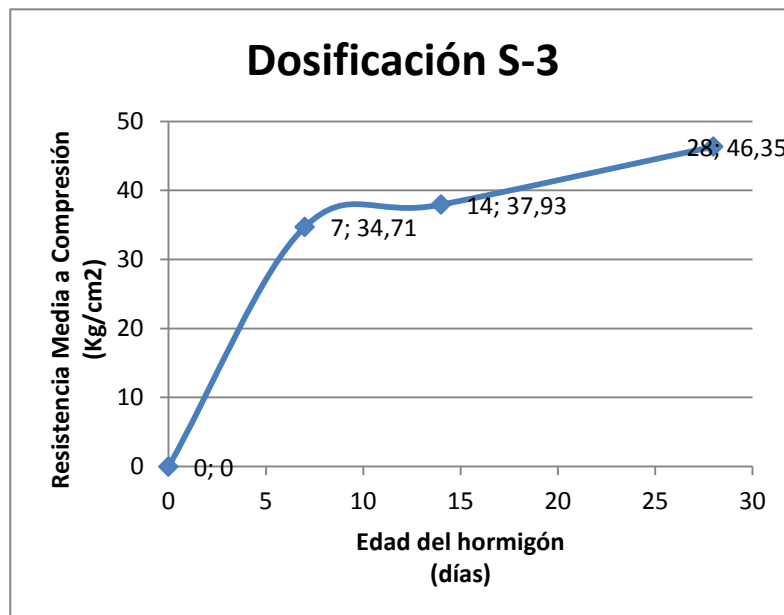
$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

$$f_{ck} = 46,35 \text{ Mpa}$$

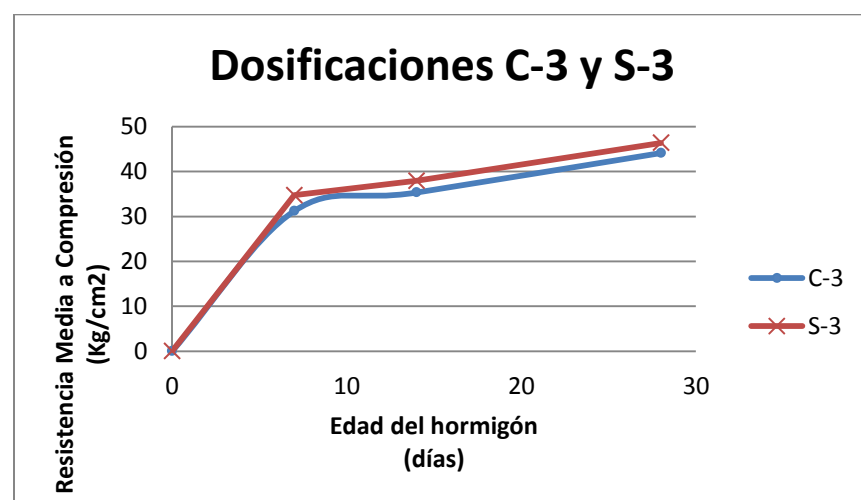
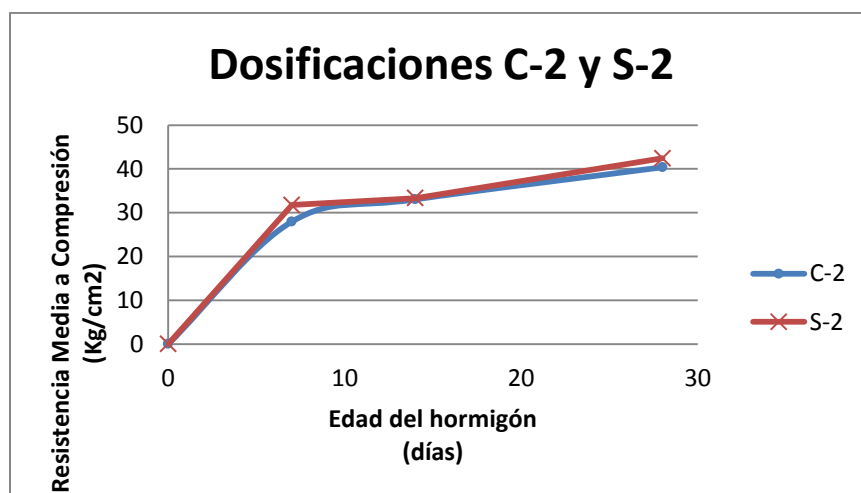
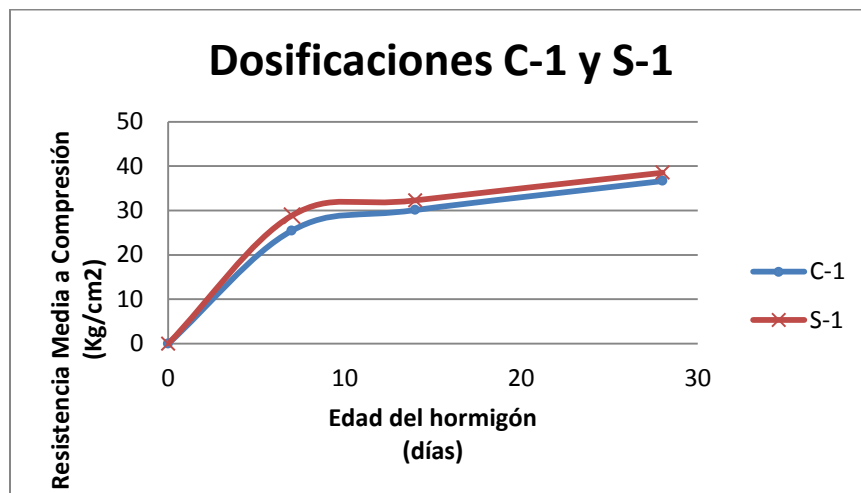
Coefficiente de variación:

$$\delta = 0,014 \quad \text{Control excelente}$$

Curva de evolución de la resistencia del HCR “S 3”:



Una vez obtenidas las resistencias características de las muestras ensayadas, se realizó la comparación de los resultados obtenidos para cada filosofía de diseño:



En cuanto al ensayo de succión capilar del HCR, se realizaron los cálculos descritos en el Anexo 4, adjunto al final del presente estudio, obteniendo los siguientes resultados:

LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

ENSAYO ABSORCIÓN POR CAPILARIDAD DEL HORMIGÓN

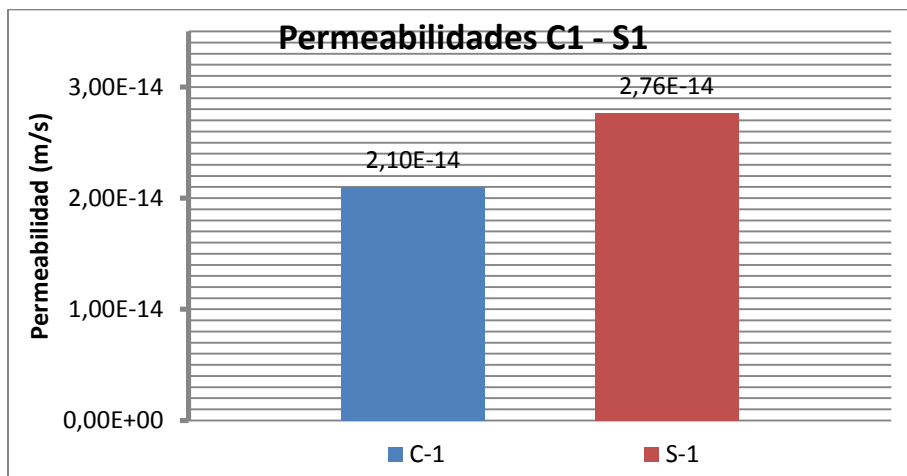
Proyecto: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FILOSOFÍA DEL CONCRETO Y LA FILOSOFÍA DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR)" (APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE REPRESAS)

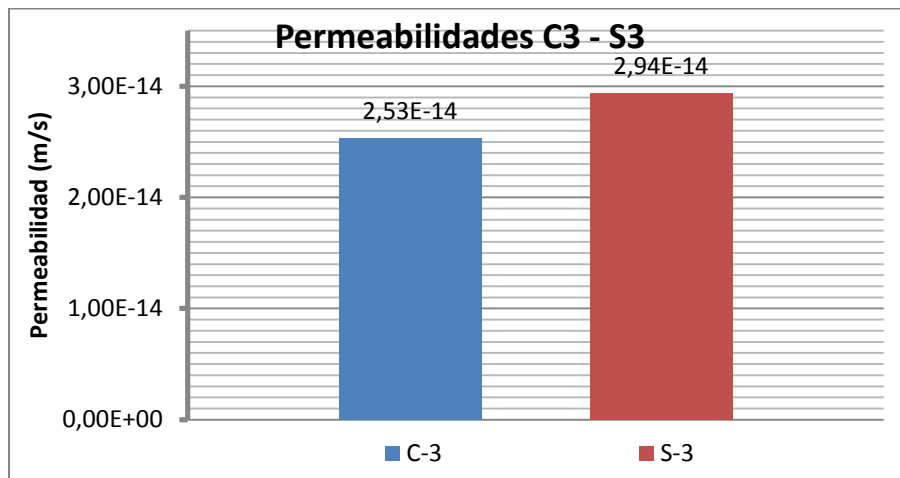
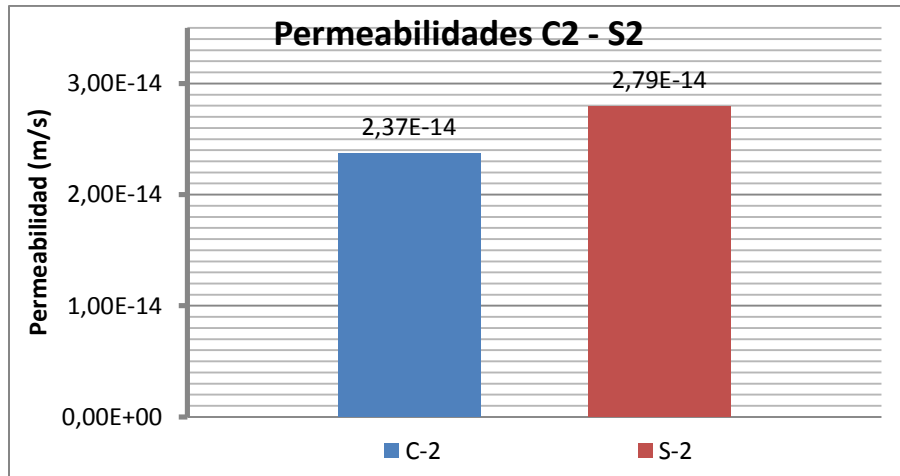
Solicitante: Univ. Honis Gualberto Figueroa Caba
Procedencia: Tarija

Identificación: 54 Probetas
Año: 2015

Probeta Nº	Identificación	Resistencia a la penetración	Media	Cof. De Absorción	Media	Porosidad Efectiva	Media	Sorptividad	Media	Permeabilidad
		m		k		e		s	s	
1	C1-10	5082352,94	4,84E+06	0,011	0,0120	10,541	11,33	0,000444	4,55E-04	2,10E-14
2	C1-11	4547368,42		0,015		13,214		0,000469		
3	C1-12	4890566,04		0,011		10,239		0,000452		
4	C2-10	4628571,43	4,87E+06	0,012	0,0127	10,893	12,16	0,000465	4,53E-04	2,37E-14
5	C2-11	4800000,00		0,015		13,864		0,000456		
6	C2-12	5184000,00		0,012		11,725		0,000439		
7	C3-10	5184000,00	4,93E+06	0,013	0,0131	13,083	12,66	0,000439	4,52E-04	2,53E-14
8	C3-11	5289795,92		0,013		13,396		0,000435		
9	C3-12	4320000,00		0,014		11,497		0,000481		
10	S1-10	5082352,94	4,90E+06	0,014	0,0139	13,781	13,36	0,000444	4,52E-04	2,76E-14
11	S1-11	4712727,27		0,014		12,738		0,000461		
12	S1-12	4890566,04		0,014		13,571		0,000452		
13	S2-10	5289795,92	5,22E+06	0,014	0,0131	14,424	13,45	0,000435	4,38E-04	2,79E-14
14	S2-11	5082352,94		0,012		11,651		0,000444		
15	S2-12	5289795,92		0,014		14,274		0,000435		
16	S3-10	4890566,04	4,99E+06	0,015	0,0142	14,040	13,90	0,000452	4,48E-04	2,94E-14
17	S3-11	4800000,00		0,015		13,822		0,000456		
18	S3-12	5289795,92		0,013		13,847		0,000435		

Finalmente se compararon los valores de permeabilidad obtenidos por cada filosofía de HCR:





4.3. Contrastación de hipótesis

En base a los resultados obtenidos, y las comparaciones realizadas, se pudo observar claramente ciertas tendencias en las pruebas materializadas.

En el ensayo de resistencia mecánica a compresión, las probetas que fueron elaboradas con la filosofía del suelo, mostraron en todas las pruebas una mayor resistencia a las muestras de HCR con filosofía del cemento.

Las probetas con aproximación a suelos, tuvieron una resistencia a compresión a los 7 días, mayor aproximadamente en un 12 % con relación a las probetas elaboradas con la filosofía del cemento. La diferencia entre las resistencias de las probetas de cada filosofía de diseño, se redujo a medida que la edad del HCR se incrementó, llegando a ser aproximadamente de un 5% a los 28 días.

Por otro lado, en el ensayo de succión capilar del HCR, se pudo observar que las probetas con aproximación a suelos, son más permeables que las muestras elaboradas con la filosofía del cemento, y que la diferencia de permeabilidad, entre ambas filosofías, se redujo para las muestras con mayor resistencia de diseño.

Por lo tanto se puede evidenciar que utilizando una filosofía de diseño de HCR, basada en el comportamiento de la mezcla como un suelo mejorado, se obtiene resistencias aproximadamente un 5% mejores que las obtenidas con HCR diseñado con la filosofía del cemento; pero que por otro lado, se debe tener en cuenta que utilizando conceptos de suelos en la elaboración de HCR, se incrementa la porosidad del producto, y por ende, la permeabilidad, reduciendo así la calidad y durabilidad del hormigón. Además cabe hacer notar que el HCR diseñado con filosofía del concreto es 17% más económico que el HCR con filosofía del suelo.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Al cabo de toda la investigación, los ensayos y análisis se llegaron a las siguientes deducciones:

- En lo referido a la resistencia mecánica a compresión, utilizando conceptos de compactación de suelos, en la elaboración de HCR, se obtiene resultados favorables con relación al HCR diseñado con la filosofía del cemento. El HCR preparado con la filosofía de suelos o geotecnia, es aproximadamente un 5% más resistente a compresión, que el HCR diseñado con conceptos del concreto.
- En base al estudio detallado de cada filosofía de diseño del hormigón compactado con rodillo, las pruebas realizadas en el presente trabajo y los resultados obtenidos de los análisis y comparaciones ejecutadas, se llegó a identificar las ventajas y desventajas de cada filosofía de diseño de HCR, siendo los factores más influyentes en las mismas, la resistencia a compresión, el costo y el contenido de humedad.
- Los agregados manejados en la presente investigación, son aptos para la elaboración de HCR, ya sea diseñado con filosofía del concreto o filosofía del suelo, ya que cumplieron satisfactoriamente los parámetros granulométricos requeridos para el HCR.
- Las mezclas de HCR obtenidas con la filosofía del cemento, tienen una mayor relación agua/cemento, por lo tanto son más trabajables, lo cual representa una característica muy importante al momento de decidir por una filosofía de diseño, debido a que una de las principales ventajas de las represas de HCR es la velocidad en su construcción, ventaja que radica en la rápida colocación de grandes volúmenes de mezcla, lo cual que podría verse afectado por un inadecuado grado de trabajabilidad.

- En base a los resultados del ensayo de succión capilar del hormigón endurecido, se concluye que el HCR elaborado con conceptos de compactación de suelos, es ligeramente más permeable y poroso que el HCR diseñado con filosofía del cemento, por lo tanto la calidad y durabilidad del mismo se ven afectadas a largo plazo, pudiendo requerir trabajos adicionales de reparación y mantenimiento si es que no son tomados en cuenta dichos factores.
- Finalizado el estudio comparativo de las filosofías de diseño de HCR, se llegó a la conclusión que ambas filosofías son una buena alternativa para la construcción de represas, las dos filosofías de diseño tienen ciertas ventajas con relación a la otra, la decisión de la mejor alternativa a utilizar, radica en las necesidades del proyecto, siendo los factores de decisión, la disponibilidad de materiales en la zona, la velocidad de producción requerida, el equipo de compactación disponible, entre otros.
- Con respecto a la hipótesis planteada al iniciar el presente estudio, se esperaba una mejora del 10 al 15% en la resistencia mecánica a compresión del HCR preparado con conceptos del concreto, si se implementaba la filosofía de suelos, y sólo se obtuvo un incremento del 5%, lo cual se pudo deberse a factores no tomados en cuenta en la fabricación de los especímenes, como ser la fractura del agregado grueso al ser impactado por el martillo Proctor, o el tiempo de demora en la compactación de la mezcla debido al retraso que genera el método de compactación de suelos en laboratorio.

A partir de las deducciones obtenidas, se generan las siguientes recomendaciones:

- Profundizar e incentivar el estudio del hormigón compactado con rodillo, en razón a que es una técnica poco estudiada y aplicada en el medio, mientras que a nivel mundial se encuentra en plena evolución por ser una alternativa muy favorable en la construcción de presas.

- Para la elaboración de especímenes por impacto, es recomendable la modificación de la cara de contacto del apisonador, descrita en 2.10.1., para evitar la fractura del agregado grueso debido al impacto, y así tener mejores especímenes de ensayo en laboratorio.