



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO
CON AGREGADOS CALIZOS Y ANDESITICOS**

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

**INGENIERÍA CIVIL-CONSTRUCCIÓN
PRESENTA:**

ING. JAVIER ENRIQUE LUNA SÁNCHEZ

TUTOR:

M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

2008



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez

Secretario: M.I. Octavio García Domínguez

Vocal: M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo

1er. Suplente: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

2do. Suplente: Dr. Carlos Máximo Aire Untiveros

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM

TUTOR DE TESIS:

M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A MI MADRE

EVANGELINA SÁNCHEZ ARCOS QUIEN HAN SIDO MI MOTOR EN ESTE LARGO CAMINO DE LA PREPARACIÓN PROFESIONAL, QUE DE MANERA DESINTERESADA ME HA DADO EL AMOR DE MADRE, QUE DA ALIENTO EN LAS DERROTAS Y VICTORIAS DE LA VIDA.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)

POR LA PREPARACIÓN ACADÉMICA EN ESTA SEGUNDA ETAPA EN LA CARRERA DE ESTUDIANTE UNIVERSITARIO.

A MI TUTOR M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

AGRADEZCO LA CONFIANZA QUE ME OTORGO SIN CONOCERME, TAMBIÉN EL COMPARTIR SU EXTENSO CONOCIMIENTO Y LA OPORTUNIDAD DE PARTICIPAR EN PROYECTOS ACADÉMICOS.

AL INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM

AL DR. CARLOS AIRE, MAURICIO, Y EN ESPECIAL A RAFAEL Y ABRAHAM QUE CON SU APOYO HICIERON POSIBLE ESTA TESIS.

AL IMCYC

AL M.I. DONATO FIGUERO QUE ME APOYO INCONDICIONALMENTE CON SU CONOCIMIENTO Y SUPERVISIÓN EN LA INVESTIGACIÓN.

A MIS AMIGOS DE LA MAESTRIA

A PAULA, BLANCA, DAYANA, HELMUTH Y ELIANA POR APOYARME EN LA ADVERSIDAD DE ESTA ETAPA DE MI VIDA, Y COMPARTIR LOS BUENOS MOMENTOS.

A MIS AMIGOS DE ACONDICIONAMIENTO FISICO UNAM

A TANIA, ROBERTO, VERO, MARIANA, KARLA, MAYRA, LUCY, REBECA, MARTIN, OSWALDO Y FLOR POR AYUDARME A ENTRENAR Y HACER DE ESTA ETAPA UNIVERSITARIA UNA LLUVIA DE ALEGRIA.

A TODOS GRACIAS

Todo lo que somos en este mundo es el resultado de lo que hemos realizado en la vida; está fundado en nuestras acciones, pensamientos y aportaciones a la sociedad.

Javier Enrique Luna Sánchez (Ingeniero Civil)

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
1 GENERALIDADES	7
1.1 ANTECEDENTES DEL CCR	7
1.2 DEFINICIÓN DEL CCR	9
1.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES	9
1.4 CARACTERÍSTICAS DEL CCR	10
1.5 CONCLUSIÓN	11
1.6 BIBLIOGRAFIA	11
2 MATERIALES Y PROPORCIONAMIENTO PARA MEZCLAS DE CCR	12
2.1 ASPECTOS GENERALES	12
2.2 MATERIALES PARA LAS MEZCLAS DE CCR	13
2.2.1 MATERIALES CEMENTANTES	13
2.2.1.1 CEMENTO PÓRTLAND	14
2.2.1.2 PUZOLANAS	14
2.2.2 AGREGADOS	15
2.2.2.1 AGREGADO GRUESO	17
2.2.2.2 AGREGADOS FINO	19
2.2.2.3 FINOS	20
2.2.3 AGUA	21
2.2.3.1 REQUISITOS DE CALIDAD DEL AGUA	21
2.2.3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	21
2.2.3.3 EFECTOS EN EL CONCRETO	22
2.2.4 ADITIVOS	22
2.3 CRITERIOS DE DISEÑO DE MEZCLAS	23
2.3.1 ASPECTOS GENERALES	23
2.3.2 MÉTODO DEL CUERPO DE INGENIEROS.	23
2.3.3 MÉTODO DE ALTO CONTENIDO DE PASTA.	25
2.3.4 MÉTODO PRESA COMPACTADA CON RODILLO.	26
2.3.5 MÉTODO DE MÁXIMA DENSIDAD.	26
2.4 MEZCLA DE PRUEBA DE LABORATORIO	27
2.4.1 ASPECTOS GENERALES	27
2.4.2 EXAMEN VISUAL	27
2.4.3 ENSAYES	27
2.5 AJUSTES DE CAMPO	28
2.6 CONCLUSIÓN	28
2.7 BIBLIOGRAFÍA	30
3 PROPIEDADES DEL CCR	31
3.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO	31
3.1.1 HOMOGENIDAD Y UNIFORMIDAD	31
3.1.2 CONSISTENCIA Y COHESIÓN	32

3.1.3	ESTABILIDAD (SEGREGACIÓN Y SANGRADO)	36
3.2	PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO	37
3.2.1	RESISTENCIA MECANICA	37
3.2.1.1	RESISTENCIA DE LOS AGREGADOS	38
3.2.1.2	RESISTENCIA DE LA PASTA CEMENTO	38
3.2.1.3	ADHERENCIA PASTA-AGREGADO	39
3.2.1.4	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (f'_c)	39
3.2.1.5	RESISTENCIA A TENSIÓN (f_t)	41
3.2.1.6	MÓDULO DE ELASTICIDAD (E) Y RELACIÓN DE POISSON (μ)	44
3.3	PERMEABILIDAD AL AGUA	48
3.4	DEFORMACIÓN DIFERIDA	49
3.5	CAMBIOS POR SECADO	50
3.6	PESO UNITARIO	51
3.7	CONCLUSIONES	51
3.8	BIBLIOGRAFIA	52
4	<u>MATERIALES Y PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CCR EMPLEADOS EN EL ESTUDIO</u>	<u>53</u>
4.1	MATERIALES	53
4.1.1	CEMENTANTES	53
4.1.1.1	CEMENTO PORTLAND ORDINARIO (NMX-414-ONNCE-1999)	54
4.1.1.2	CEMENTO PORTLAND PUZOLANICO (NMX-414-ONNCE-1999)	54
4.1.2	AGREGADOS	55
4.1.2.1	AGREGADOS FINOS	55
4.1.2.2	AGREGADOS GRUESO	57
4.1.3	AGUA	57
4.1.4	ADITIVOS	58
4.2	PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CCR	58
4.2.1	GENERALIDADES	58
4.2.2	SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA	58
4.2.3	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE ACUERDO CON EL CONTENIDO DE MINIMOS VACIOS	59
4.2.3.1	DETERMINACIÓN DEL PVSC MÁXIMO EN FUNCIÓN DE LAS RELACIONES GRAVA-ARENA (G/A).	59
4.2.4	MÉTODO DE CONTENIDO MÍNIMOS DE VACÍOS	60
4.2.5	PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS PARA ALCANZAR LOS LÍMITES ESPECIFICADOS DE CONSISTENCIA.	63
4.3	PROCURA Y MODIFICACIÓN DE EQUIPOS DE LABORATORIO PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE CCR.	68
4.3.1	VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL EQUIPO NEUMÁTICO	68
4.3.2	VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL MARTILLO VIBRATORIO	68
4.4	ELABORACIÓN DE MEZCLAS Y ESPECIMENES DE CCR	69
4.5	CONCLUSIÓN	71
5	<u>EVALUACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS</u>	<u>72</u>
5.1	PROPIEDADES DEL CCR EN ESTADO FRESCO	72
5.1.1	HOMOGENEIDAD Y UNIFORMIDAD	73
5.1.2	CONSISTENCIA	73
5.1.3	TEMPERATURA	73
5.1.4	PESO VOLUMÉTRICO	75

5.1.5	CONTENIDO DE AIRE (%)	76
5.2	PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO	78
5.2.1	RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE ($F'c$)	78
5.2.1.1	EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE CON CEMENTO CPO 30 R ($f'c$)	79
5.2.1.2	EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE CON CEMENTO CPP 30 R RS ($f'c$)	82
5.2.1.3	EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN ENTRE EL CEMENTO CPO 30R Y CEMENTO CPP 30 R RS ($f'c$)	85
5.2.2	RESISTENCIA A TENSIÓN INDIRECTA (FT)	86
5.2.2.1	RESISTENCIA A TENSIÓN INDIRECTA (Ft) DEL CCR REALIZADO CON CEMENTO CPO 30R	86
5.2.2.2	RESISTENCIA A TENSIÓN INDIRECTA (Ft) DEL CCR REALIZADO CON CEMENTO CPP 30R RS	88
5.2.3	TENSIÓN A FLEXIÓN (MR) DEL CCR	89
5.2.3.1	TENSIÓN A FLEXIÓN (Mr) DEL CCR REALIZADO CON CEMENTO CPO 30R	90
5.2.3.2	TENSIÓN A FLEXIÓN (Ft) DEL CCR REALIZADO CON CEMENTO CPP 30R RS	91
5.2.4	MÓDULO DE ELASTICIDAD E_c Y RELACIÓN DE POISSON μ	93
5.2.4.1	MÓDULO DE ELASTICIDAD E_c Y RELACIÓN DE POISSON μ DEL CRR REALIZADO CON CEMENTO CPO.	93
5.2.4.2	MÓDULO DE ELASTICIDAD E_c Y RELACIÓN DE POISSON μ DEL CRR REALIZADO CON CEMENTO CPP.	95
5.3	COMPARACIÓN DEL ESTUDIO EN ESTADO ENDURECIDO CON RESULTADOS INTERNACIONALES	97
5.3.1	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	97
5.3.2	RESISTENCIA A TENSIÓN	99
5.3.3	RESISTENCIA A TENSIÓN POR FLEXIÓN	99
5.3.4	PROPIEDADES ELÁSTICAS	99
5.4	CONCLUSIÓN	100
5.5	BIBLIOGRAFÍA	101
6	CONSTRUCCIÓN DE PRESAS DE CCR	102
6.1	PRODUCCIÓN DE AGREGADO Y LOCALIZACIÓN DE PLANTA	102
6.2	MEZCLADO	103
6.2.1	MÉTODO DE MEZCLADO INTERMITENTE CON MEZCLADORA DE TAMBOR.	103
6.2.2	MÉTODO DE MEZCLADO CONTINUO.	104
6.3	TRANSPORTE Y COLOCACIÓN	104
6.3.1	GUÍA PARA SELECCIÓN DE EQUIPO	104
6.3.2	CONSIDERACIONES SOBRE LA SEGREGACIÓN	105
6.3.3	MÉTODOS DE TRANSPORTE.	105
6.3.3.1	EQUIPOS TRANSPORTADORES	105
6.3.3.2	VEHÍCULOS TRANSPORTADORES	106
6.3.4	COLOCACIÓN Y DISTRIBUCIÓN	107
6.4	COMPACTACIÓN	108
6.4.1	SELECCIÓN DEL RODILLO.	108
6.4.2	PASES MÍNIMOS Y ESPESORES DE CAPA	109
6.4.3	OPORTUNIDAD Y PROCEDIMIENTO	110
6.5	JUNTAS DE CAPAS	110
6.5.1	DESARROLLO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE CAPAS	110
6.5.2	TRATAMIENTO DE LA JUNTA DE LAS CAPAS	111
6.6	JUNTAS DE CONTRACCIÓN	111
6.7	CIMBRAS Y PARAMENTOS	112
6.7.1	ASPECTOS GENERALES.	112

6.7.2	FORMACIÓN DE LOS PARAMENTOS.	113
6.7.3	CIMBRAS DE CONCRETO PRECOLADO.	113
6.7.4	EXTREMOS INCLINADOS NO COMPACTADOS	113
6.7.5	PARAMENTOS MOLDEADOS.	113
6.8	CURADOS Y PROTECCIÓN CONTRA EL CLIMA	114
6.9	GALERIAS Y DRENAJE	115
6.10	CONCLUSIÓN	116
6.11	BIBLIOGRAFÍA	117
<u>7</u>	<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>118</u>
7.1	CONCLUSIONES	118
7.2	RECOMENDACIONES	121
<u>8</u>	<u>BIBLIOGRAFIA GENERAL</u>	<u>123</u>

INTRODUCCIÓN

México es un país que en las últimas décadas ha tenido un incremento considerable en la construcción de presas, destacándose sobre todo las de tipo de tierra y enrocamiento.

Las presas en México, en general, se destinan a usos múltiples y la mayoría tiene por finalidad el riego para desarrollo de la agricultura, indispensable para afrontar el problema que plantea el crecimiento demográfico que registra actualmente el país. También el desarrollo hidroeléctrico ha dado origen, en los últimos años, a que se construyan grandes presas en los ríos que potencialmente presentan ventajas para este aprovechamiento.

El diseño y construcción de presas ha sido acorde con la evolución de la tecnología y disponibilidad de equipo de construcción, en las diferentes épocas en que ésta actividad se ha desarrollado. Durante la época de la colonia y en el primer siglo de México independiente, el tipo predominante de presas es el de mampostería, de diseño totalmente empírico y que actualmente se encuentran en funcionamiento. Esencialmente existen dos formas principales de presas como son las de tierra-enrocamiento y de contrafuertes de concreto (o una combinación y la presa de terraplén), las primeras presas contiene mucho más volumen de material pero económico y la última ocupa un pequeño volumen de material relativamente costoso.

Debido a que la construcción de presas son obras de gran magnitud en la que costos son elevados y de tiempos largos, se requiere de técnicas que minimicen estos aspectos, teniendo siempre en cuenta cumplir con la calidad, la seguridad y el objetivo por el cual será construido.

El concreto compactado con rodillo es una técnica de construcción que ofrece beneficios en la economía de costos, que resultan del método de producción y de la fácil y rápida construcción, por no tener acero de refuerzo, cimbras, cuenta con una producción y colocación continua, además de ser de reducido mantenimiento.

Por otra parte existen profesionistas mexicanos que han tenido participación con esta técnica del CCR en el país, sin embargo se requiere difundirla en México para obras de infraestructura como carreteras y presas hidráulicas.

JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION

La construcción de presas mediante el CCR permite minimizar costos y tiempos de ejecución, por lo tanto es una opción viable en la inversión del Gobierno Federal para que considere esta técnica en la construcción de presas futuras, y así cumplir con las necesidades básicas del país como son:

Almacenar o captar escurrimiento de agua a fin de regar tierras, generar energía eléctrica, o bien, dotar de agua potable a poblaciones y centros industriales o evitar una corriente que provoque inundaciones a tierras o poblados.

Es claro que países desarrollados como Japón y Estados Unidos han optado por esta técnica constructiva desde 1980 a la fecha y han desarrollado investigaciones con la finalidad de mejorar la técnica logrando resultados satisfactorios. Actualmente, no se cuenta con normas técnicas del CCR emitidas en nuestro país. Las investigaciones técnicas que se han desarrollado en diseño, propiedades físico-mecánicas, elaboración y construcción son estudios realizados por los países mencionados anteriormente, lo cual representa un área de oportunidad para integrarlas a nuestras Normas Técnicas Complementarias.

OBJETIVO GENERAL

Identificar los materiales que se utilizan, las proporciones para su elaboración, método de diseño, elaboración de mezclas, obtención resultados en estado fresco y endurecido (resistencias mecánicas).

OBJETIVO PARTICULARES

- Obtener las dosificaciones necesarias a partir de su diseño de mezclas.
- Exponer métodos para elaborar las muestras de pruebas en laboratorio y campo.
- Elaborar pruebas de resistencias mecánicas
- Identificar los agentes que afectan al concreto para su funcionamiento.
- Describir los procedimientos constructivos para su elaboración y colocación en obra.
- Exponer ventajas y desventajas constructivas que ofrece este tipo de concreto.

ALCANCES

Los estudios que se realizaran del CCR comprenderán los aspectos técnicos como son diseños, elaboración de mezclas, pruebas de laboratorio y procedimientos de construcción de presas y un breve análisis de los resultados obtenidos del estudio con los proyectos internacionales de CCR en presas.

HIPOTESIS

La construcción con concretos compactados con rodillo en presas hidráulicas y pavimentación de caminos, es una opción que reduce los tiempos de entrega, la administración de los costos y técnicamente es más rápida la construcción, debido a que no requiere juntas, reforzamiento con acero y mantenimiento reducido.

CAPÍTULO 1

1 GENERALIDADES

México es uno de los países en el mundo que cuenta con gran cantidad de presas de usos múltiples para el desarrollo energético, agrícola, industrial, protección etc. Los ingenieros mexicanos se han destacado en la construcción de presas de tierra y enrocamiento adquiriendo amplia experiencia en ello. A un lado de este método de construcción, surgió una técnica para la construcción de presas con concreto compactado con rodillo en presas.

El concreto compactado con rodillo en presas es una forma viable de construcción de presas que se desarrolló durante los años 80 y que ha tenido gran aceptación en el mundo por su corto tiempo y bajo costo de construcción.

En este contexto, se describe el desarrollo cronológico que han tenido los métodos de construcción de presas de terraplén y de concreto hasta llegar al método de construcción del CCR, combinando las mejores técnicas de los dos métodos anteriores.

Por último, se define el concepto de CCR y las características que tienen éste y su diferencia con el concreto convencional.

1.1 ANTECEDENTES DEL CCR

Esencialmente existen dos formas principales de presas que son:

- Las presas de enrocamiento y tierra, fig. 1
- Las presas de concreto en contrafuerte, fig. 2



Fig. 1. Presa de enrocamiento y tierra, Hidroeléctrica Malpaso

La primera ocupa mucho mayor volumen de material, pero económico y la segunda ocupa menor volumen de material pero relativamente costoso. El método tradicional de construir presas de concreto y presas de gravedad fue desarrollado en los años 30, para los 40 años siguientes, hubieron muy pocas modificaciones del método de construcción.

Durante el mismo periodo se fueron desarrollando las presas de terraplén. Los especialistas en mecánicas de suelos y rocas lograron una mejora significativa en la eficiencia de la práctica constructiva de presas, dando lugar al método de construcción conocido como concreto compactado con rodillo (CCR).

Por un lado, mientras las presas de concreto había seguido siendo un método de labor intensa y relativamente ineficiente de construcción, la construcción de presas de terraplén se había convertido en una práctica intensiva y eficiente.

Hasta los años 60 el 35% de todas las presas eran construidas de concreto, mientras en los años 70 ese porcentaje había caído cerca de 10%. A partir de esa fecha se había invertido debido al éxito del CCR.

El primer registro de una presa de concreto compactado con rodillo parece haber sido en 1930. No fue si no hasta principios de los años 70 en que fue realizado progresos importantes. En ese tiempo se hicieron propuestas por combinar las mejores técnicas de las presas de terraplén, con las de concreto. Las propuestas más significativas se obtuvieron por tres diferentes caminos. El profesor Afad de la Universidad de Bekeley en California, propuso la presa de gravedad óptima.

La autoridad de Tenessee Valley sugirió que las proporciones de las mezclas usadas para el concreto convencional en las presas de gravedad, deberían ser modificadas para poder ser esparcidas por Bulldozer y compactados con rodillos vibradores.

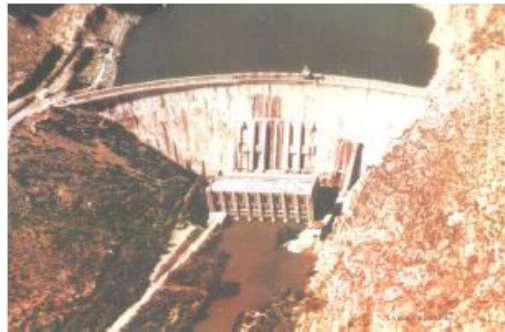


Fig.2.Presa de contrafuerte de concreto, Hidroeléctrica la boquilla

El primer CCR colocado fue en la presa Shimajigawan en Japón en 1978. Esta presa fue concluida en 1980 y un número importante de presas le siguieron rápidamente. Para finales de 1985, varias presas de CCR habían sido completadas y el método de construcción comenzó a aceptarse.

En los siguientes 7 años (finales de 1992), el total de presas se había incrementado a 96 en 17 diferentes países. Esto ha mostrado que el CCR es un método de construcción económico para usarse en presas cuando se tienen los factores adecuados.

1.2 DEFINICIÓN DEL CCR

El ACI 116 define el CCR como “Un concreto compactado con rodillo de compactación; concreto que en su estado no endurecido, soportará un rodillo (vibratorio) mientras que está siendo compactado”. El CCR usualmente es mezclado usando mezcladoras continuas de alta capacidad o equipo por bachadas, entregado con camiones o bandas transportadoras y distribuidos con uno o más tractores en capas antes de su compactación. El CCR puede usar un intervalo de materiales más amplio que el concreto convencional. Es considerado un material versátil en obras como presas hidráulicas y pavimentos de carreteras, por el beneficio económico que resulta de la fácil y rápida construcción.

1.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES

Las ventajas en la construcción de presas de CCR son amplias, pero hay algunas limitaciones que deben ser reconocidas. Algunas de las ventajas se presentan en ciertos tipos de mezclas, diseños estructurales, métodos de producción, clima y otras condiciones. Así mismo, algunas desventajas aplican solamente a condiciones particulares del sitio y del diseño. Cada proyecto de CCR debe ser evaluado integralmente con base en los méritos técnicos y en su costo.

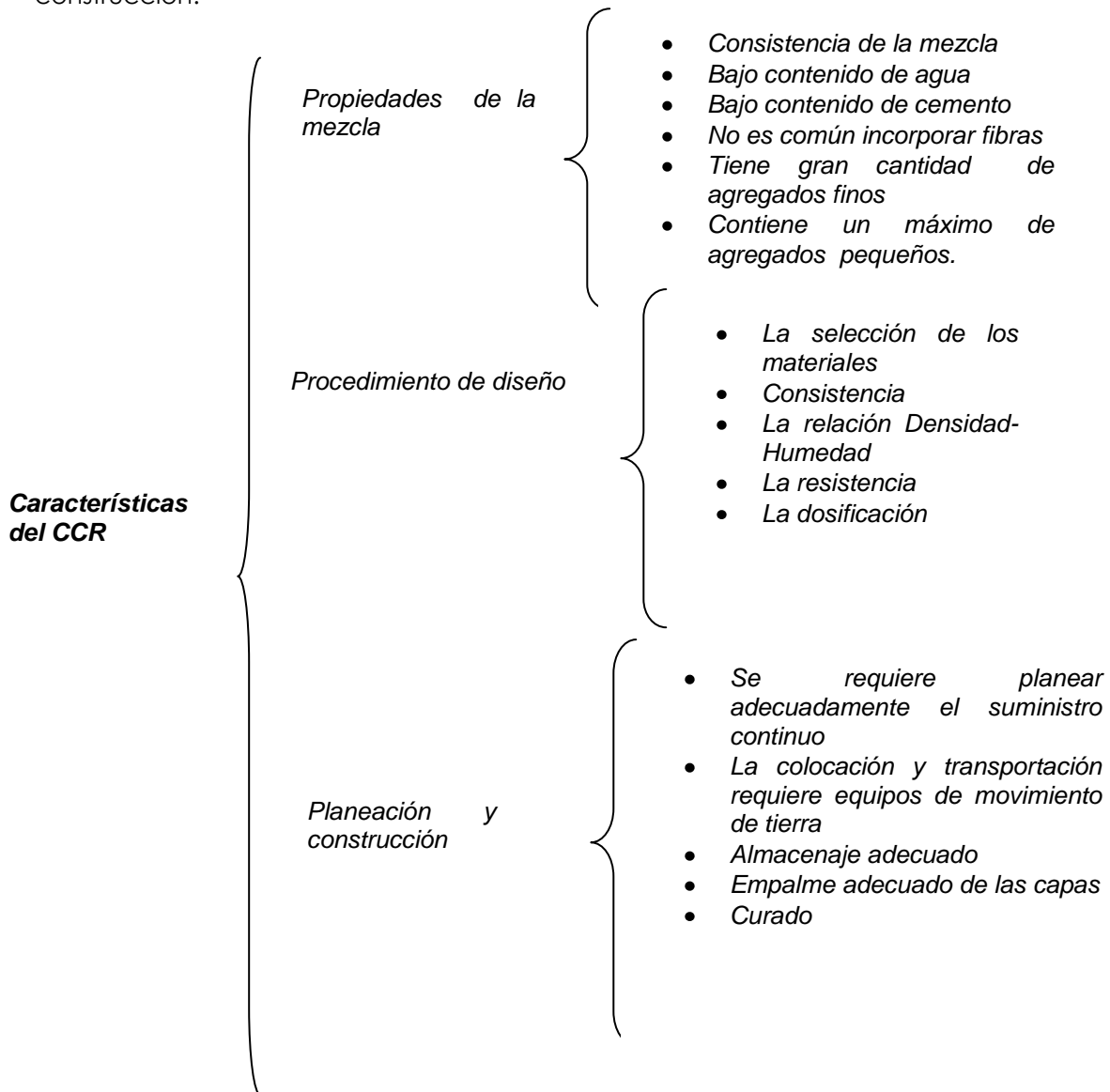
La ventaja principal es el reducido tiempo y costo de su construcción. Otra ventaja de las presas de CCR es que la tecnología puede ser implementada rápidamente. Para los proyectos de emergencia tales como el de la presa Kerrville Ponding, el CCR fue utilizado para construir rápidamente una nueva presa aguas abajo de una presa de terraplén que estaba en inminente condición de falla debido a un sobrepaso del agua por la corona. El CCR también fue usado como medio para construir rápidamente la presa Concepción en Honduras después de la declaración de una emergencia nacional para el aprovisionamiento de agua. Cuando se comparan con las presas del tipo terraplén, las presas de CCR usualmente tienen ventaja cuando el vertedor y los requerimientos de desvío del río son grandes, la roca de cimentación adecuada está cercana a la superficie y cuando los agregados apropiados están disponibles cerca del sitio. Otra ventaja es requerir de una atagüa reducida debido a que, una vez comenzada, una presa de CCR puede ser sobrepasada la corona con impacto mínimo y la altura de la presa de CCR puede exceder rápidamente la altura de la atagüa.

Aunque casi siempre una presa de CCR diseñada eficientemente es la alternativa de menor costo cuando se compara con otros tipos de presa, hay condiciones que pueden hacer al CCR más costoso.

Las situaciones donde el CCR puede no ser apropiado es cuando los materiales para los agregados no están disponibles razonablemente cerca, la roca de cimentación es de pobre calidad y no está cerca de la superficie, o donde las condiciones de cimentación pueden conducir a un asentamiento diferencial excesivo.

1.4 CARACTERÍSTICAS DEL CCR

Las características del CCR difieren del concreto convencional en las características técnicas, en la apariencia física, consistencia, procedimientos de elaboración y construcción:



1.5 CONCLUSIÓN

- Los dos tipos de presas anteriores a la construcción de presas de CCR son:
Las presas de enrocamiento y tierra
Las presas de contrafuerte realizadas con concreto convencional.
- La técnica de CCR tuvo sus orígenes en los años treinta, y es una combinación de las mejores técnicas de las presas de terraplén, con las de concreto convencional.
- El CCR se define como un concreto compactado con rodillos de compactación; que en su estado fresco, soportara un rodillo (vibratorio) mientras está siendo compactado.
- El CCR puede utilizar los mismos materiales componentes del concreto convencional y en otros casos puede aprovechar los materiales disponibles de la zona, y que difiere del convencional en los aspectos de diseño, proporcionamiento de la mezcla, transportación y construcción en obra, por lo que se requiere de un análisis detallado para seleccionar el método adecuado y realizar en forma eficiente la construcción.
- Las condiciones técnicas a evaluar en los proyectos de CCR son los diseños estructurales, métodos de producción, clima, procura de los materiales, la roca de cimentación y condiciones particulares del sitio.

1.6 BIBLOGRAFIA

www.cement.org/pavement
Portland Cement Association

Future Trend in Roller Compacted Concrete Dam Construction
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-89

Presas Construidas en México
Secretaría de Recursos Hidráulicos

Tecnología del concreto
CFE

CAPÍTULO 2

2 MATERIALES Y PROPORCIONAMIENTO PARA MEZCLAS DE CCR

2.1 ASPECTOS GENERALES

Los métodos y objetivos para el proporcionamiento de mezcla de CCR difieren de los correspondientes al del concreto convencional. El CCR debe mantener una consistencia que permita soportar un rodillo vibratorio y vehículos de transporte, mientras también conservan sus propiedades para ser compactados con rodillo vibratorio u otros métodos externos. La granulometría de los agregados y el contenido de pasta son aspectos críticos del proporcionamiento de la mezcla.

Al igual que el concreto convencional, el CCR debe cumplir con los requisitos de resistencia, durabilidad, capacidad de enlace entre capas y permeabilidad reducida (en presas). La apariencia del CCR se puede observar en la Fig. 2.1



Fig. 2.1 Apariencia del CCR

El contenido de material cementante para las presas de CCR ha variado en un amplio intervalo de valores, desde 60 kg/m^3 hasta más de 300 kg/m^3 . En uno de los extremos del espectro, la mezcla para el interior de la Presa Willow Creek con 75 mm de tamaño máximo nominal de agregado (TMNA) contiene 66.5 kg/m^3 de material cementante. La mezcla que incluye 47.5 kg/m^3 de cemento más 19.0 kg/m^3 de ceniza volante, alcanzó una resistencia a compresión promedio de 18.2 MPa (182 kg/cm^2) a un año de edad.

En comparación, la mezcla interior de la Presa Upper Stillwater con TMNA de 50 mm que contiene 251.5 kg/m^3 de material cementante, compuesto por 79.5 kg/m^3 de cemento mas 172.0 kg/m^3 de ceniza volante, alcanzó una resistencia a compresión promedio de 42.6 MPa (426 kg/cm^2) a un año. Muchos de los proyectos de CCR han usado cantidades de material cementante entre 104 y 178 kg/m^3 y alcanzan una resistencia a compresión promedio entre 14 y 21 MPa (140 y 210 kg/cm^2) a una edad entre 90 días y 1 año. En la tabla 2.1 se presentan proporcionamientos de mezclas para algunas presas.

Tabla 2.1 Proporciones de mezcla de algunas presas de concreto compactado con rodillo (CCR)

Presas Proyecto	Tipo de mezcla/ IP	Año	TMNA mm(pulg)	Aire, %	Agua	Cemento	Puzolana	Agregado fino	Agregado grueso	Densidad, kg/m ³	AIA cm ³ /m ³	ARA cm ³ /m ³
Camp Dyer	CCR1	1994	38(1.50)	3.6	90	82	81	750	1344	2347	4	2
Concepción	90 C	1990	76(3.00)	0.5	93	90	0	813	1220	2217	—	—
Cachillo Negro	130C100P	1991	76(3.00)	—	135	77	59	944	1213	2429	—	—
Galesville	CCR1	1985	76(3.00)	—	113	53	51	777	1519	2513	—	—
	CCR2	1985	76(3.00)	—	113	65	68	765	1495	2507	—	—
Middle Fork	66C	1984	76(3.00)	—	95	66	0	683	1268	2113	—	—
Santa Cruz	CCRAIA	1989	51(2.00)	2.3	101	76	75	728	1365	2345	4	2
Siegrist	47C 47P	1992	38(1.50)	1	96	47	47	1140	1216	2548	—	—
	53C 42P	1992	38(1.50)	1	96	53	42	1141	1217	2549	—	—
	59C 42P	1992	38(1.50)	1	96	59	42	1139	1215	2551	—	—
Stacy Spillway	125C 62P	1989	38(1.50)	—	154	125	62	2076	—	—	—	—
Stagecoach	71C 77P	1988	51(2.00)	—	138	71	77	686	1459	2431	—	—
Upper Stillwater	CCR A 85	1985	51(2.00)	1.5	94	79	173	729	1292	2367	—	7
	CCR B 85	1985	51(2.00)	1.5	89	94	207	695	1292	2377	—	12
	CCR A	1986	51(2.00)	1.5	99	79	173	682	1316	2349	—	9
	CCR B	1986	51(2.00)	1.5	100	93	206	682	1264	2345	—	12
Urugua-1	60C	1988	76(3.00)	—	100	60	0	1247	1297	2705	—	—
Victoria	67C 66P	1991	51(2.00)	—	107	67	66	810	1505	2555	—	—
Willow Creek	104C	1982	76(3.00)	1.2	110	104	0	657	1658	2529	—	—
	104C 47P	1982	76(3.00)	1.2	110	104	47	645	1625	2531	—	—
	47C 19P	1982	76(3.00)	1.2	107	47	19	666	1681	2520	—	—
	187C 80P	1982	38(1.50)	1.2	109	187	80	825	1238	2438	—	—
Zintel Canyon	74CA	1992	64(2.50)	4.5	101	74	0	901	1357	2434	11	11
	74CNA	1992	64(2.50)	1.4	112	74	0	941	1407	2533	—	11
	178C A	1992	64(2.50)	—	101	178	0	800	1417	2496	21	25

Un elemento esencial en el proporcionamiento del CCR para presas es la cantidad de pasta. El volumen de la pasta debe llenar o casi llenar los vacíos de los agregados y producir una mezcla de concreto compactable y densa. El volumen de la pasta debe también ser suficiente para propiciar la adherencia e impermeabilidad en las juntas de las capas horizontales, cuando la mezcla es colocada y compactada rápidamente sobre una junta razonablemente fresca. La experiencia ha mostrado que las mezclas que contienen una baja cantidad de material cementante pueden requerir de cantidades adicionales de finos no plásticos para complementar la fracción de pasta requerida para llenar los vacíos de los agregados.

Se pueden alcanzar ciertos beneficios económicos reduciendo los requisitos de procesamiento de los agregados, la separación normal por tamaños, y el manejo, apilamiento y pesado de cada intervalo de tamaño, por separado. Sin embargo, el diseñador debe reconocer que la reducción o cambio de los requisitos normales de los agregados para el concreto debe valorarse contra la mayor variación en las propiedades del CCR producido, y debe tomarse en cuenta en una selección más conservadora de las propiedades promedio del CCR a ser alcanzadas.

2.2 MATERIALES PARA LAS MEZCLAS DE CCR

Un amplio intervalo de materiales se han usado en la producción del CCR. Muchos de los materiales recomendados en la guía ACI 207.1R (concreto masivo) pueden utilizarse para el CCR. Los materiales utilizados para el CCR incluyen materiales cementantes (cemento Portland y puzolanas tales como ceniza volante), agregados, agua y aditivos

2.2.1 MATERIALES CEMENTANTES

El tipo y calidad del Cemento o cemento más puzolana que se requiere para las mezclas de CCR dependerá del volumen de la estructura. Un requisito son las propiedades y las condiciones de exposición. El empleo de un volumen grande de CCR en las presas, requiere considerar el calor de hidratación generado por los materiales cementantes.

2.2.1.1 CEMENTO PÓRTLAND

El CCR puede ser hecho con cualquiera de los tipos básicos de cemento Pórtland. Para aplicaciones masivas, los cementos con un calor de hidratación más bajo que el correspondiente al CPO, ONNCCE, (ASTM C150, tipo I) son apropiados. Incluyen los de moderado calor de hidratación (tipo II) y los de bajo calor de hidratación (tipo V) y los cementos mezclados, cemento pórtland-puzolana (ASTM C595, tipo IP y los cementos pórtland –escoria de alto horno tipo IS). Las resistencias desarrolladas por estos cementos a edades tempranas usualmente son inferiores que las alcanzadas con el cemento pórtland ordinario (tipo I), pero resistencias últimas más altas que las alcanzadas con CPO en los CCR.

En la tabla 2.2 se hace referencia a los cementos producidos en la República Mexicana reglamentados bajo la norma NMX-C-414-ONNCCE-2003 y en el panorama internacional se estandarizan bajo las normas ASTM C-150 Standard Specification for Pórtland Cement (Especificación estándar para cementos pórtland) y ASTM C-595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements (Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados).

TABLA 2.2 Clasificación de los cementos mexicanos

TIPO	DENOMINACIÓN	CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	RS Resistente a los Sulfatos
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30	BRA Baja Reactividad Álcali agregado
TPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R	BCH Bajo Calor de Hidratación
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	40 R	----
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	----	----

FUENTE: NMX-C-414-ONNCCE-2003

2.2.1.2 PUZOLANAS

La selección de una puzolana apropiada para el CCR se debe basar en su conformidad con la norma ASTM C618. Las puzolanas que cumplen con las especificaciones de ASTM C618 para las clases C, F y N se han usado con éxito en mezclas de CCR. 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.

El uso de puzolanas en las mezclas de CCR puede servir para uno o más de los siguientes objetivos: 1) como remplazo parcial del cemento para reducir la generación de calor; 2) como remplazo parcial de cemento para reducir su costo; y 3) como un aditivo para proporcionar finos complementarios para trabajabilidad y volumen de pasta de la mezcla.

En la mayoría de las presas construidas con CCR se ha utilizado puzolana de ceniza volante, clasificación F. A temperaturas frías, retardan usualmente el fraguado inicial de las mezclas de CCR, contribuyen a una resistencia inicial baja, pero extienden el tiempo de

trabajo útil de la junta en la capa recién compactada. En mezclas de CCR con alto contenido de puzolana, el incremento de temperatura puede continuar hasta 60 o 90 días después de su colocación.

2.2.2 AGREGADOS

En los CCR se han usado agregados de calidad similar a los empleados en los concretos convencionales. Sin embargo, agregados que no cumplen con los estándares o requerimientos normales para el concreto convencional también se han usado con éxito en la construcción de presas de CCR.

Para determinar las características y calidades de los agregados, se pueden seguir las normas en la tabla 2.3

Tabla 2.3 Normas ASTM para determinar las características físicas de los agregados

CARACTERÍSTICA	SIGNIFICADO	MÉTODOS DE PRUEBA	NOMBRE DE LA PRUEBA
Granulometría	Consistencia, Compactibilidad económica	ASTM C136 ASTM C117	Análisis de cribado de los agregados finos y gruesos Materiales más finos de 75 um (No. 200) en agregado mineral para lavar
Resistencia a la abrasión	Agregados de calidad, revestimiento de la superficie para mejora la resistencia	ASTM C-131 ASTM C535 ASTM C295	Resistencia a la degradación de agregados por abrasión e impactos en la máquina Los Ángeles Resistencia a la degradación de agregados grandes por abrasión e impactos en la maquina los Ángeles Examinación petrográfica de los agregados del concreto
Gravedad específica-absorción	Cálculos de mezclas de diseño	ASTMC127 ASTMC128	Gravedad específica y absorción del agregado grueso Gravedad específica y absorción del agregado fino
Peso volumétrico	Cálculo de diseño de la mezcla	ASTM C29	Unidad de peso y vacíos en el agregado
Resistencia a los sulfatos	Sondeo contra el desgaste por la acción atmosférica y ataque químico	ASTM C88	Ataque a los agregados por sulfato de sodio o sulfato de magnesio
impurezas orgánicas	Resistencia obtenida	ASTM C40	Impurezas orgánicas en agregados finos para el concreto

La graduación de los agregados combinados será seleccionada para minimizar la segregación. La clave para controlar la segregación y proporcionar una mezcla con buena compactabilidad es tener una graduación que sea consistente y que contenga más material que pase la malla # 4 (4.75 mm) que las cantidades típicas de los concretos convencionales con un tamaño máximo nominal de agregados similar. En la tabla 2.4 se presentan graduaciones típicas de agregados combinados de varios proyectos.

Tabla 2.4 Granulometría combinada de agregados para CCR de varios proyectos de Estados Unidos de América

Tamaño de criba	Willow Creek	Upper Stillwater	Christian Siegrist	Zintel Canyon	Stagecoach	Elk Creek
100 mm(4")	—	—	—	—	—	—
75 mm(3")	100	—	—	—	—	100
62 mm(2.5")	—	—	—	100	—	96
50 mm(2")	90	100	—	98	100	86
37.5 mm(1.5")	80	95	100	91	95	76
25 mm(1")	62	—	99	77	82	64
19 mm(0.75")	54	66	91	70	69	58
9.5 mm(3/8")	42	45	60	50	52	51
4.75 mm(No. 4)	30	35	49	39	40	41
2.36 mm(No. 8)	23	26	38	25	32	34
1.18 mm(No. 16)	17	21	23	18	25	31
0.60 mm(No. 30)	13	17	14	15	15	21
0.30 mm(No. 50)	9	10	10	12	10	15
0.15 mm(No. 100)	7	2	6	11	8	10
0.075 mm (No. 200)	5	0	5	9	5	7
C+P (kg/m ³)	47+19	79+173	59+42	74+0	79+77	70+33
Total de finos*	20%	21%	19%	21%	—	21%
Trabajabilidad	Pobre	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Excelente

* Total de finos – Todos los materiales en la mezcla completa con tamaños de partículas menores que la malla No. 200

Los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60% a 75% del volumen del concreto 70% a 85% en peso (ver fig.2.2 y fig. 2.3). Su calidad es de vital importancia ya que de ella depende la economía, la resistencia, la durabilidad y el desempeño estructural del concreto.



Fig. 2.2 Grava caliza

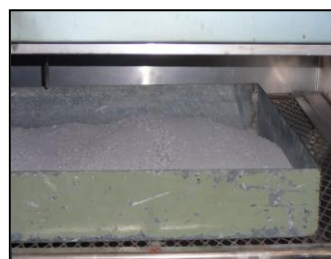


Fig. 2.3 Arena andesítica

Las características a estudiar en el agregado son: la porosidad, distribución de tamaños, la absorción de humedad, la forma, textura de la superficie, la resistencia a la ruptura, el módulo de elasticidad y el material contaminante que contenga.

Los agregados de peso normal comúnmente proceden de la desintegración, por causas y medios naturales o medios artificiales, de roca, con peso específico entre 2.4 y 2.8 aproximadamente, de manera que al utilizarlos se obtienen concretos con peso volumétricos, en estado fresco, en el intervalo aproximado de 2200 a 2500 kg/m³.

Entre las características que define la calidad intrínseca de agregados están:

- ⊗ *Características que dependen de la porosidad:* densidad, absorción de humedad, resistencia, dureza, módulo de elasticidad y sanidad.
- ⊗ *Características que dependen de los factores de procesamiento:* dimensión de partículas, forma y textura.
- ⊗ *Características que dependen de la composición química y mineralógica:* resistencia, dureza, módulo de elasticidad y sustancias nocivas presentes.

2.2.2.1 AGREGADO GRUESO

La selección de un tamaño máximo nominal de agregado debe basarse en la necesidad de reducir los requerimientos de material cementante, en el control de la segregación y en la facilidad de compactación. La mayor parte de los proyectos de CCR han usado TMNA de 37.5 a 75 mm.

La granulometría del agregado grueso usualmente sigue la designación de tamaños ASTM C33. Sin embargo, algunos diseñadores han usado como materiales agregados para base de caminos disponibles localmente con requisitos de granulometría similares a las requeridas en ASTM D2940. Donde se desee un control estrecho de la granulometría del agregado grueso y de la producción del CCR, las separaciones por tamaño debe hacerse de acuerdo con la práctica normal para el concreto, como la recomendada en ACI 304R.

Las mezclas de CCR para la protección externa de las presas frecuentemente usan un TMNA de 25 mm ya que la sección de concreto es más delgada. Debido a que el volumen de concreto requerido para la protección interna normalmente no es importante, las mezclas de CCR pueden obtenerse de un fabricante comercial de concreto.

Para la utilización de la grava se acostumbra subdividirla en fracciones que se manejan y dosifican individualmente en proporciones adecuadas para integrar la curva granulométrica requerida en la grava total. En la figura 2.4 se presenta partículas de dos tipos de gravas.

Las designaciones y aberturas de las mallas que suelen emplearse en el análisis granulométrico de la grava, se indican en la tabla 2.5



Fig. 2.4 Partículas de dos tipos de grava.

TABLA 2.5 Designaciones y aberturas de malla

<u>Designación de malla (ASTM E 11)</u>			<u>Designación</u>	<u>Abertura nominal</u>
Estándar mm	en	Alternativa en pulg.	NMX	en mm
125		5	-	127
100		4	G 100	101.6
90		3 ½	G 90	88.9
75		3	G 75	76.2
63		2 ½	G 63	63.5
50		2	G 50	50.8
37.5		1 ½	G 38	38.1
25		1	G 25	25.4
19		¾	G 19	19.1
12.5		½	G 12.5	12.7
9.5		3/8	G 9.5	9.5
4.75		No.4	G 4.75	4.75
2.36		No.8	G 2.36	2.36

En la norma ASTM C-33 se especifica los porcentajes de retenido de las mallas, el cual depende del tamaño máximo de la grava y la abertura mínima de la malla que se analiza (ver fig. 2.5).

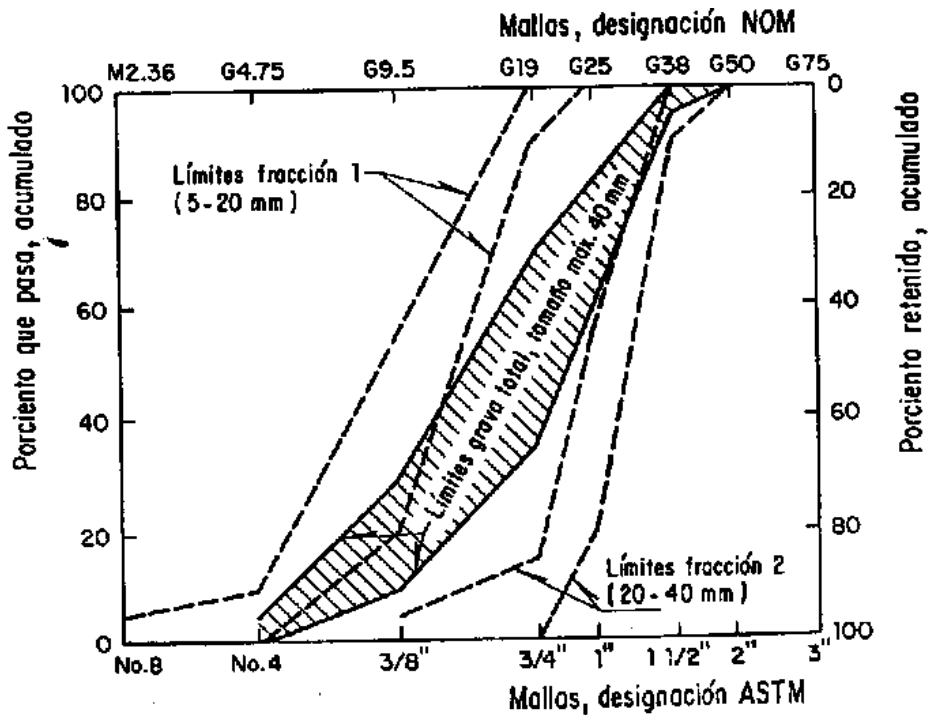


Fig. 2.5 Límites granulométricos para grava con tamaño máximo 40 mm

2.2.2.2 AGREGADOS FINO

La granulometría del agregado fino tiene una fuerte influencia en los requisitos de la pasta y de la compactabilidad del CCR. También afecta los requerimientos de agua y material cementante necesarios para llenar los vacíos de los agregados y recubrir las partículas de agregado.

La composición granulométrica de la arena se acostumbra analizar mediante su separación en 7 fracciones (ver tabla 2.5), cribándolas a través de mallas normalizadas como "serie estándar", las especificaciones para agregados para concreto (**NMX C-111/ASTM C 33**) requieren que en cada fracción exista una proporción de partículas comprendida dentro de ciertos límites establecidos empíricamente, en la figura 2.6 se presenta las partículas de una arena. Dichos límites se muestran en la fig. 2.7



Fig. 2.6 Partículas de arena.

Tabla 2.6 Fracciones de medición del tamaño de arena.

Serie estándar de mallas para arena			Límites de tolerancia (% en peso)	
Abertura en mm	Designación NMX C-111	Designación ASTM C-33	% retenido Acumulado	% que pasa Acumulado
9.5	G 9.5	3/8"	0	100
4.75	G 4.75	No. 4	0 a 5	95 a 100
2.36	M 2.36	No. 8	0 a 20	80 a 100
1.18	M 1.18	No. 16	15 a 50	50 a 85
0.6	M 0.60	No. 30	40 a 75	25 a 60
0.3	M 0.30	No. 50	70 a 90	10 a 30
0.15	M 0.15	No. 100	90 a 98	2 a 10

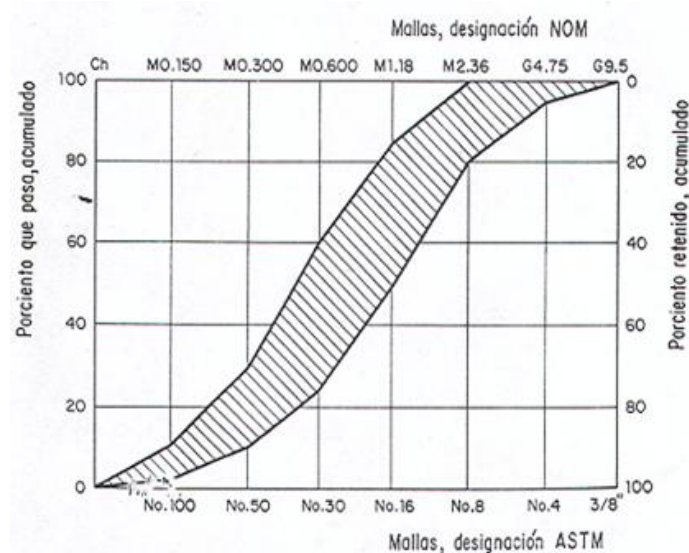


Fig. 2.7 Límites granulométricos especificados para la arena

El análisis granulométrico de la arena se complementa con el cálculo de módulo de finura, que es igual a la centésima parte de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en cada una de las mallas de la serie estándar. De ordinario se considera que la arena presenta un módulo de finura adecuado para la fabricación del concreto convencional o del concreto compactado con rodillo, si no es menor de 2.30 ni mayor de 3.10

Las arenas cuyo módulo de finura es inferior a 2.30, normalmente se consideran demasiados finas e inconvenientes para esta aplicación, porque suelen requerir mayores consumos de cemento, lo que repercute adversamente en los cambios volumétricos y en el costo del concreto. En el extremo opuesto, las arenas con módulo de finura mayor de 3.10 resultan demasiado gruesa y tienden a producir mezclas de concreto áspera, segregables y proclives al sangrado. En la tabla 2.7 se muestra la forma de calcular el módulo de finura.

TABLA 2.7 Ejemplo de la determinación del módulo de finura en agregado fino

Tamaño de la malla	Porcentaje de la fracción individual retenida, en peso	Porcentaje acumulado que pasa, en peso	Porcentaje acumulado retenido, en peso
9.52 mm (3/8")	0	100	0
4.75 mm (No.4)	2	98	2
2.36 mm (No.8)	13	85	15
1.18 mm (No.16)	20	65	35
0.60 mm (No.30)	20	45	55
0.30 mm (No.50)	24	21	79
0.15 mm (No.100)	18	3	97
Charola	3	0	---
Total	100		283 <i>Módulo de finura =</i> 283/100 = 2.83

2.2.2.3 FINOS

En mezclas con contenidos bajos de material cementante, usualmente se requieren finos suplementarios, material que pasa la malla No. 200 (0.075 mm), para llenar todos los espacios vacíos de los agregados. Dependiendo del volumen del material cementante y del TMNA, el total de finos inferiores a 0.075 mm (No 200) requeridos puede ser tan grande como el 10% del volumen total de agregados, con porcentajes entre 3 y 8% para la mayor parte de las mezclas. Las características y contenido de finos afectará la compactabilidad relativa de las mezclas de CCR y puede tener influencia en el número de pasos de rodillo vibratorio requerido para la compactación total de una capa de un espesor dado. Independientemente de que si los finos son complementados agregando agregados finos, cemento, puzolana, o una combinación de esto, la mayor parte de las mezclas de CCR compactables contienen aproximadamente de 8 a 12% de sólidos totales más finos que la malla No. 200 (0.075 mm) por volumen o 12 a 16% por peso. Esto se ilustra en la tabla 2.1. Los finos llenan los espacios vacíos de los agregados, proporcionan una consistencia compactable, ayuda al control de la segregación y decrece la permeabilidad. La inclusión de agregados finos en mezclas con bajo contenido de pasta cementante permite reducciones en el contenido de materiales cementantes. Las adiciones excesivas de finos de los agregados después de que los vacíos son llenados, usualmente son perjudiciales para las mezclas de CCR debido a que decrece la trabajabilidad, incrementan la demanda de agua y subsecuentemente pierden resistencia.

Cuando se agregan los finos de los agregados a la mezcla, otra consideración es la naturaleza de los finos. Los finos de la trituración y los materiales limosos usualmente son aceptables. Sin embargo, los finos de las arcillas, llamados finos plásticos, pueden originar un incremento en la demanda de agua y una pérdida de resistencia, y producir una mezcla rígida que es difícil de mezclar y compactar.

2.2.3 AGUA

El único requisito para el agua en las mezclas de CCR es que esté libre de cantidades excesivas de álcalis, ácidos, o materia orgánica, los cuales pueden inhibir las propiedades de resistencia y afectar la durabilidad del concreto. Las cantidades de agua requeridas varían de 90 a 120 kilogramos por metros cúbico para TMA de 50 mm.

El agua tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de las mezclas (uso interno del concreto) y como medio de curado de las estructuras recién construidas (uso externo del concreto).

El agua suele representar entre 10% y 25% del volumen del concreto recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo del agregado que se utilice y del revenimiento que se necesite.

Una práctica común consiste en utilizar agua potable para fabricar concreto sin ninguna verificación previa, sin embargo, hay ocasiones que las aguas potables con citratos o pequeñas cantidades de azúcares, que no afectan su potabilidad pero pueden hacerlas inadecuadas para el concreto.

La calidad del agua es de importancia ya que las impurezas excesivas en el agua no solo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, si no también pueden ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad.

2.2.3.1 REQUISITOS DE CALIDAD DEL AGUA

Los requisitos de calidad del agua están relacionados con sus características físico-químicas y efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto.

2.2.3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

No parece haber un consenso general en cuanto las limitaciones de las impurezas en el agua, como puede ser el caso de algunas sales inorgánicas (Cloruro, sulfatos), sólidos en suspensión, materia orgánica, dióxido de carbono disuelto. En lo que si hay un acuerdo común, es que el agua no debe contener sustancias como grasas, aceites, azúcares y ácidos.

En el caso del carbonato de sodio, este puede causar fraguados muy rápidos, en tanto que los bicarbonatos pueden acelerar o retardar el fraguado. En concentraciones fuertes, estas sales pueden reducir de manera significativa la resistencia del concreto. Cuando la suma de las sales disueltas exceda 1000 ppm, se deberán realizar pruebas para analizar su efecto sobre el tiempo de fraguado y sobre la resistencia a los 28 días. También se deberá considerar la posibilidad que se presenten reacciones álcali-agregado graves.

Debido al contenido de cloruros en el agua de mezclado, se debe limitar su contenido, principalmente al posible efecto adverso que los iones de cloruro pudieran tener en la

corrosión del acero de refuerzo, o de los torones de presfuerzo. Los iones de cloruro atacan la capa de óxido formada en el acero por el medio químico altamente alcalino (pH 12.5) presente en el concreto.

Cuando el agua sea de origen potable, puede utilizarse las recomendaciones del USBR, en los cuales se considera que si el agua es clara, y no tiene sabor dulce, amargo o salobre, puede ser usada como agua de mezclado o curado del concreto, sin necesidad de mayores pruebas. En el caso de que el agua no provenga de un suministro potable, deberá cumplir los requisitos de las normas ASTM C-94 y NMX-C-122-82 que muestran parámetros mínimos de calidad.

2.2.3.3 EFECTOS EN EL CONCRETO

Los efectos indeseables que el agua de mezclado de calidad inadecuada puede producir en el concreto, son a corto, mediano y largo plazo. Los efectos a corto plazo normalmente se relacionan con el tiempo de fraguado y las resistencias iniciales, los de mediano plazo con las resistencias posteriores (a 28 días o más) y los de largo plazo pueden consistir en el ataque de sulfatos, la reacción álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo.

La prevención de los efectos a largo plazo se consigue por medio del análisis químico del agua antes de emplearla, verificando que no contenga cantidades excedidas de sulfato, álcalis, cloruros y dióxido de carbono disuelto, principalmente. Para prevenir los efectos a corto y mediano plazos, se acostumbra precalificar el agua mediante pruebas comparativas de tiempo de fraguado y de resistencia a compresión a 7 y 28 días. En esta prueba se comparan especímenes elaborados con mezclas idénticas, en la que solo se cambia la procedencia del agua de mezclado: agua destilada en la mezcla testigo y el agua en estudio en la mezcla de prueba.

La prueba de tiempo de fraguado puede efectuarse en pasta de cemento, según los métodos NMX C-58 o C-59 (ASTM C-266 o C-191), o bien en mezclas de concreto conforme al método NMX C-177 (ASTM C 403). Para llevar a cabo las pruebas de resistencia a compresión, se emplean normalmente especímenes de mortero, elaborados y ensayados de acuerdo con el método NMX C-61 (ASTM 109), aunque también es posible utilizar especímenes de concreto, elaborados y ensayados conforme a los métodos NMX C-159 y C-83 (ASTM C-192 y C-39).

2.2.4 ADITIVOS

Los aditivos químicos han sido efectivos en las mezclas de CCR que contienen suficiente agua para proporcionar una pasta más fluida. Los aditivos químicos más comúnmente utilizados son los ASTM C494, tipos A (reductor de agua) y D (reductor de agua y retardante). Los aditivos reductores de agua, usados en dosificaciones muy altas, han mostrado reducir la demanda de agua, incrementar la resistencia, retardar el fraguado, y proporcionar trabajabilidad en algunas mezclas de CCR. Sin embargo, el conocimiento de la efectividad en otras mezclas, típicamente con bajos contenidos de material cementante y bajos niveles de trabajabilidad es limitado. Los aditivos deben ser evaluados con las mezclas de CCR reales, antes de usarlas en campo.

Los aditivos inclusores de aire comúnmente no son usados en mezclas de CCR debido a la dificultad en la generación de burbujas de aire del tamaño y distribución adecuados cuando la mezcla tiene una consistencia de revenimiento cero.

2.3 CRITERIOS DE DISEÑO DE MEZCLAS

2.3.1 ASPECTOS GENERALES

Se han usado un número importante de métodos para el proporcionamiento de mezclas para las estructuras de CCR a través del mundo. Estos métodos difieren en forma importante debido a la localización y requisitos de diseño de la estructura, de la disponibilidad de los materiales, de los equipos de mezclado y colocación usados y tiempo comprometido. La mayor parte de los métodos de proporcionamiento de mezclas son variaciones de los criterios generales: 1) un enfoque a/mc con la mezcla determinada por volumen de sólidos; y 2) un enfoque cementante-agregado con la mezcla determinada ya sea por volumen de sólidos o relaciones humedad-densidad. Ambos enfoques son propuestos para producir concreto de calidad apropiada para su compactación con rodillo y la construcción de presas. Los conceptos básicos atrás de estos enfoques se cubren en ACI 211.3. En la fig. 2.8 se muestran proporcionamientos de mezclas usados para presas de CCR.

Los proporcionamientos de mezclas de CCR pueden seguir la convención usada en el concreto convencional donde la masa de cada ingrediente contenida en un volumen unitario compactado de la mezcla está basado en la condición del agregado saturado superficialmente seco (SSS). Una razón práctica para el uso de esta convención estándar es que la mayor parte de las plantas de mezclado de CCR requieren que los constituyentes de la mezcla sean así identificados para introducirlos al sistema de control de la planta. Para plantas de mezclado continuo, las proporciones de las mezclas pueden ser convertidas a porcentajes del peso del agregado seco.

2.3.2 MÉTODO DEL CUERPO DE INGENIEROS.

Este método de proporcionamiento está basado en la relación a/mc y resistencia. El Apéndice 4 de ACI 211.3 incluye un método similar. Ambos métodos calculan las cantidades de la mezcla a partir de la determinación del volumen de sólidos, como se hace en el proporcionamiento de la mayor parte del concreto convencional. La relación a/mc y contenido de cemento equivalente son establecidas a partir de gráficas basadas en criterios de resistencia usando las figs. 2.9 y 2.10. La demanda aproximada de agua está basada en el tamaño máximo nominal del agregado y en el tiempo Vebe modificado deseado. Un contenido recomendado de agregado fino como un porcentaje del volumen total del agregado está basado en el tamaño máximo nominal del agregado grueso. Una vez que se calcula el volumen de cada ingrediente, se puede hacer una comparación del contenido de mortero con los valores recomendados para verificar las proporciones. Este método puede proporcionar varios aspectos únicos, incluyendo combinaciones ideales de granulometrías de agregados gruesos y límites de granulometrías de agregado fino que incorpora un porcentaje más elevado de finos que los que permite ASTM C33. Debido a que la resistencia de diseño para muchas presas de CCR está basada en la de un año, se puede hacer una estimación de la misma a partir de la de 90 a 180 días con el uso de las figs. 2.9 y 2.10.

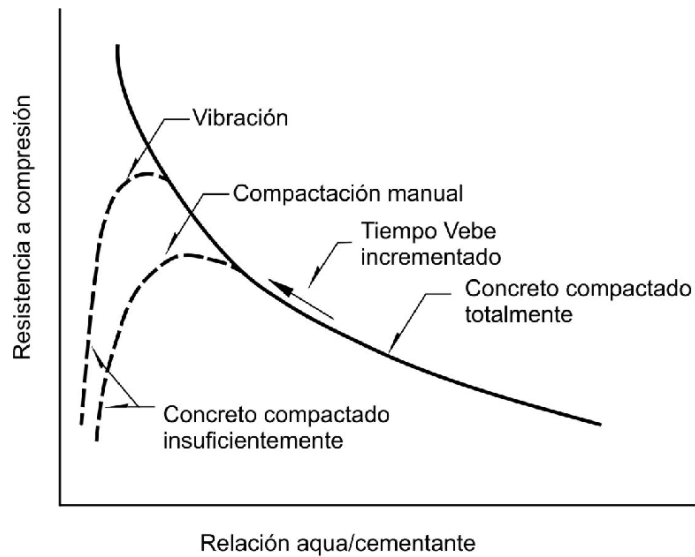
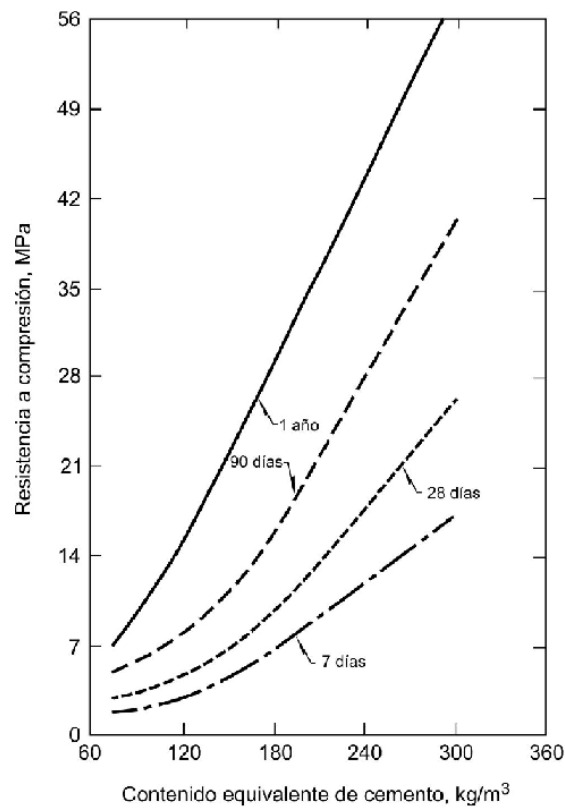
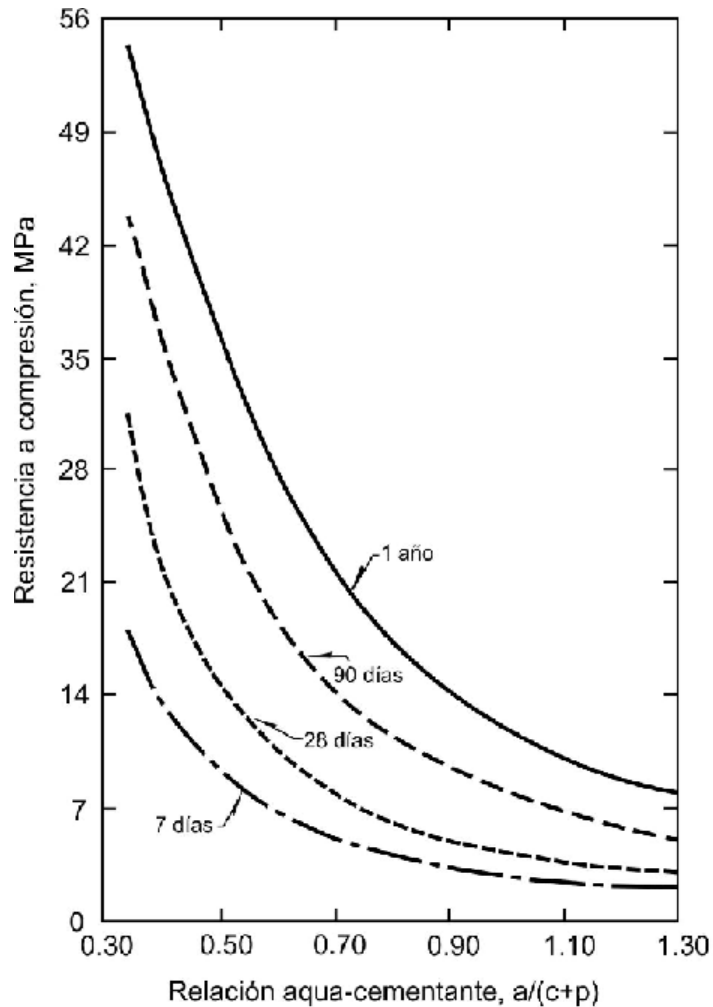


Fig.2.8 Relación general entre resistencia a compresión y a/mc



Nota: Estas curvas están basadas en el uso de un TMNA de 75 mm (3") con 30 a 40 por ciento de ceniza volante por volumen de los materiales cementantes

Fig.2.9 Contenido equivalente de cemento versus resistencia a compresión (USACE, 1992)



Nota: Estas curvas están basadas en el uso de TMNA de 75 mm (3") con 30 a 40% de ceniza volante por volumen de material cementante

Fig.2.10 Resistencia a compresión versus a/mc (USACE, 1992)

2.3.3 MÉTODO DE ALTO CONTENIDO DE PASTA.

Este método de proporcionamiento de mezcla fue desarrollado por U.S. Bureau of Reclamation para usarlo durante el diseño de la presa Upper Stillwater. Las mezclas resultantes de ese programa de ensaye generalmente contienen altas proporciones de materiales cementantes, altos contenidos de pulzolanas, agregados limpios y granulometrías usuales, y alta trabajabilidad. El propósito de las mezclas para la presa Upper Stillwater fue proporcionar una resistencia de adherencia excelente en la junta de las capas y baja permeabilidad en la junta mediante la disponibilidad de suficiente pasta cementante en la mezcla para mejorar el desempeño del junteo de capas.

El método de alto contenido de pasta involucra la determinación de la relación a/mc y la relación ceniza volante-cemento para el nivel de resistencia deseado y el incremento de resistencia con el tiempo. Las relaciones agua óptima, agregado fino, agregado grueso, se determinan de las mezclas de prueba, evaluando la consistencia Vebe para un intervalo de

10 a 30 seg. El volumen y peso de agregado, cemento, puzolana, agua y aire requeridos se calculan posteriormente.

Las mezclas de prueba de laboratorio son evaluadas para verificar si trabajabilidad aceptable, resistencia y otras propiedades requeridas son proporcionadas por la mezcla. Variaciones específicas de las mezclas pueden ser desarrolladas para evaluar sus efectos en las propiedades del concreto fresco, tales como la consistencia, y en las propiedades del concreto endurecido para optimizar las proporciones de la mezcla. Los especímenes para la resistencia se fabrican de acuerdo con ASTM C 1176 con la mesa vibradora.

2.3.4 MÉTODO PRESA COMPACTADA CON RODILLO.

El método presa compactada con rodillo (PCR) fue desarrollado por ingenieros japoneses y es usado principalmente en Japón. El método es similar al de proporcionamiento de concreto convencional de acuerdo con ACI 211.1 excepto que incorpora el uso de un medidor de consistencia. El medidor de consistencia es similar al aparato Vebe en que la mezcla de CCR es colocado en un contenedor y vibrado hasta que se observe mortero en la superficie. El dispositivo es suficientemente grande para permitir la mezcla completa, a menudo de 150 mm (6") de TMNA) a ser evaluada, en lugar de tener que tamizar el concreto para eliminar las partículas grandes.

El procedimiento consiste en la determinación de las relaciones entre la consistencia, llamada valor CV, el contenido de agua, la relación arena-agregado, el peso unitario del mortero y la resistencia a compresión. La mezcla apropiada para el método PCR es la combinación óptima de materiales los cuales cumplen con los criterios de diseño especificados. Debido a los requerimientos de los equipos para los ensayos de consistencia y las diferencias en la naturaleza del diseño y construcción del método PCR, este método no es usado ampliamente en el proporcionamiento de las mezclas de CCR fuera de Japón.

2.3.5 MÉTODO DE MÁXIMA DENSIDAD.

Este método es un enfoque geotécnico similar al utilizado para seleccionar mezclas de suelo-cemento y base estabilizadas con cemento. Proporcionamientos con este enfoque también es cubierto en el Apéndice 4 de ACI 211.3. En lugar de determinar el contenido de agua para el tiempo Vebe o un desempeño visual, el contenido de agua deseado es determinado por la relación humedad-densidad de especímenes compactados, usando el Método D de ASTM D1557.

También pueden utilizarse variaciones de este método dependiendo de la composición de la mezcla y del tamaño máximo nominal del agregado. El equipo de compactación puede ser un martinete estándar, alguna variación de este equipo que resulte más apropiado para mezclas con agregado grande, o algún método alterno de apisonado/vibrado que simule los equipos de compactación de campo para obtener densidades similares.

En este método, se prepara una serie de mezclas para cada uno de los contenidos de materiales cementantes y se dosifican usando un intervalo de contenido de agua. Cada una de las mezclas preparadas se compacta con un esfuerzo estándar. La máxima densidad y el contenido óptimo de agua son determinados de la gráfica densidad vs contenido de agua para los especímenes compactados de cada contenido de material cementante. El contenido real de agua utilizado es generalmente ligeramente mayor (aproximadamente 1% adicional) que el valor óptimo determinado en el laboratorio, para compensar la pérdida de humedad durante el transporte, colocación y distribución. Los especímenes de CCR son hechos con el contenido de agua óptimo o de diseño para los ensayos de resistencia para cada contenido de material cementante.

Conversiones de máxima densidad y contenidos de agua óptimo o de diseño a dosificaciones por peso de ingredientes por m³ se presentan en el Apéndice 4 de ACI 211.3.

2.4 MEZCLA DE PRUEBA DE LABORATORIO

2.4.1 ASPECTOS GENERALES

Es recomendable proporcionar una serie de mezclas y hacer mezclas de prueba de laboratorio para circunscribir el intervalo de requisitos de desempeño. Esta práctica permitirá modificaciones posteriores a la mezcla o ajustes sin necesidad de repetir el proceso de evaluación de la mezcla. Los ajustes finales se podrán hacer con base en las dosificaciones de prueba de campo de tamaño completo, de preferencia en una franja o sección donde pueda ser observada la trabajabilidad y compactabilidad.

2.4.2 EXAMEN VISUAL

Se pueden determinar varias características por examen visual de mezclas de ensaye preparadas en laboratorio. Distribución de agregado en la mezcla, falta de cohesividad y tendencia a la segregación son observables por el manejo de la mezcla con palas en el piso del laboratorio. La textura de la mezcla (ásperas, no trabajable, arenosa, pastosa, lisa) pueden ser vista y sentida con la mano. Estas características serán registradas para cada mezcla.

2.4.3 ENSAYES

Se deben realizar pruebas de laboratorio, incluyendo temperatura, consistencia, peso unitario, y contenido de aire, en el CCR fresco de cada mezcla de prueba. Además, se deben preparar especímenes para ensayos de resistencia a compresión a varias edades, usualmente 7, 28, 90, 180 días y 1 año para indicar la característica de incremento de resistencia de cada mezcla. Estos especímenes también pueden ser usados para la determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson a las edades seleccionadas. También se deben fabricar especímenes adicionales para la resistencia a tensión indirecta (ASTM C496) o resistencia a tensión directa a varias edades para establecer sus relaciones con la resistencia a compresión, y obtener parámetros para su empleo en el análisis estructural.

En los proyectos más grandes, usualmente se cuegan especímenes de una o más mezclas seleccionadas de CCR para determinar las propiedades térmicas, incluyendo incremento de temperatura adiabática, coeficiente de expansión térmica, calor específico y difusividad. También pueden colarse de estas mezclas especímenes para pruebas especiales tales como deformación diferida, capacidad de deformación por tensión y resistencia a cortante. Muchos de los laboratorios comerciales no están equipados para realizar estas pruebas y pueden requerirse arreglos especiales con las universidades que tengan el equipo y las instalaciones para este trabajo.

2.5 AJUSTES DE CAMPO

El objetivo principal del proporcionamiento de mezclas de laboratorio es proveer proporciones que cuando se dosifiquen, mezclen y coloquen en campo, se desempeñen como se desea. Sin embargo, las condiciones de laboratorio rara vez reproducen perfectamente las condiciones de campo debido a la precisión de las dosificaciones, diferencias en el tamaño de la mezcladora y acción de mezclado, cambios en los materiales y en su granulometría, equipo de compactación, curado del CCR, y tiempo entre la incorporación del agua y la compactación. En vista de estas diferencias, el proporcionamiento de las mezclas de laboratorio han demostrado ser un medio efectivo para asegurar el desempeño y minimizar los ajustes de campo.

Los ajustes de campo incluirán: 1) ajustes en el porcentaje de agregado con base en la granulometría combinada requerida; 2) corrección del peso de las dosificaciones por el contenido de humedad de los agregados; y 3) ajustes en el contenido de agua para la consistencia deseada o grado de trabajabilidad con base en la compactabilidad de la mezcla. Los ajustes de campo se harán con precaución para asegurar que la relación original a/mc de la mezcla u otro requisito de la misma no sea excedido.

Antes de usarse en una obra definitiva, se recomienda que la mezcla de CCR propuesta sea proporcionada y mezclada en revolturas de tamaño completo y colocada, distribuida y compactada en franja o sección de prueba empleando los procedimientos de construcción especificados. La franja o sección de prueba proporcionará información valiosa sobre la necesidad de hacer modificaciones menores a la mezcla y que puede ser usada para determinar el esfuerzo de compactación (peso del rodillo) requerido para alcanzar la compactación total de la mezcla de CCR. Una franja o sección de prueba también puede ser usada para evaluar visualmente la condición de junteo de capas y la segregación potencial de la mezcla.

2.6 CONCLUSIÓN

- La mezcla de CCR debe mantener una consistencia que le permita soportar rodillos vibratorios y vehículos de transporte.
- El intervalo de contenido de material cementante en el CCR ha variado de 60 hasta 300 kg/m³.
- El volumen de la pasta en el CCR debe llenar o casi llenar los vacíos de los agregados, producir una mezcla compactable y densa.
- El CCR puede ser fabricado con cualquiera de los tipos básicos de cemento Portland recomendados por el ASTM C-150 y ASTM C-595.
- Las puzolanas que se han utilizado en el CCR han sido las de clase C, F y N, que cumplan con la norma ASTM C-618, con los siguientes objetivos:
 1. Como remplazo parcial del cemento para reducir la generación de calor;
 2. Como remplazo parcial de cemento para reducir su costo; y
 3. Como un aditivo para proporcionar finos complementarios para trabajabilidad y volumen de pasta de la mezcla.

- Los agregados en el CCR pueden no cumplir con los estándares o requerimientos para el concreto convencional.
- La granulometría recomendada para los agregados en el CCR debe ajustarse a la establecida en la norma ASTM C-33/NMX C-111.
- Los finos que pasan la malla No.200 pueden ser utilizados para mejorar la compactación (Agregados finos, cemento y puzolanas). Su proporción en las mezclas de CCR varía aproximadamente de 8 a 12% de los sólidos totales por volumen o de 12 a 16% por peso.
- El Agua en el CCR se recomienda que esté libre de cantidades excesivas de álcalis, ácidos, o materia orgánica.
- Los aditivos químicos más comúnmente utilizados son los tipos A (reductor de agua) y D (reductor de agua y retardante), que cumplan con la norma ASTM C 494.
- Los métodos de diseño generalmente utilizados en el CCR son:
 1. Método del cuerpo de ingenieros
 2. Método de alto contenido de pasta
 3. Método Presa compactada con rodillo
 4. Método de máxima densidad
- El examen visual de laboratorio en la producción de CCR evalúa, la distribución del agregado en la mezcla, falta de cohesividad y tendencia a la segregación.
- Las edades de los especímenes para ensayos de resistencia, usualmente son, de 7, 28, 90, 180 días y 1 año para indicar la característica de incremento de resistencia de cada mezcla.
- Los ensayos de laboratorio en el CCR son los siguientes:

En el estado fresco se medirá la temperatura, la consistencia, el peso volumétrico y el contenido de aire.

En el estado endurecido se medirá la resistencia a compresión, tensión (directa, indirecta y flexión), modulo de elasticidad y relación de Poisson, deformación diferida, contracción por secado y propiedades térmicas.

Los ajustes de campo incluirán:

- Ajustes en el porcentaje de agregado con base en la granulometría combinada requerida; corrección del peso de las dosificaciones por el contenido de humedad de los agregados; y ajustes en el contenido de agua para la consistencia deseada o grado de trabajabilidad con base en la compactabilidad de la mezcla.

2.7 BIBLIOGRAFÍA

Future Trend in Roller Compacted Concrete Dam Construction
By M.R.H Dunstan

Roller Compacted Mass Concrete
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-89

Roller Compacted Mass Concrete
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-11

Roller Compacted Concrete for Dams
State of the Art
By Ernest K. Shrader

Tecnología del concreto
Comisión Federal de Electricidad

Fracture and Material Properties of Roller Compacted Concrete
By Ernest K. Shrader

CAPITULO 3

3 PROPIEDADES DEL CCR

En este capítulo se describen las pruebas aplicables a las propiedades físicas del concreto compactado con rodillo en estado fresco, así como, las propiedades físicas y mecánicas en estado endurecido.

La mayor parte de las propiedades y pruebas que caracterizan al concreto convencional son utilizadas en el concreto compactado con rodillo.

3.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

El concreto fresco es un material progresivo ya que continuamente cambian sus propiedades. Tales cambios comienzan desde que el concreto es fabricado, transportado, colocado, compactado, acabado y curado en una forma homogénea, usualmente sin vacíos, solo con aire atrapado, ver figura 3.1.

Las propiedades del concreto endurecido, como la resistencia, estabilidad volumétrica y durabilidad, son afectados seriamente por el grado de compactación; por lo tanto, es importante que la consistencia y trabajabilidad del concreto fresco sea tal, que permita transportarlo, colocarlo y compactarlo sin problemas de segregación.



Fig. 3.1 Concreto en estado fresco.

3.1.1 HOMOGENIDAD Y UNIFORMIDAD

Una condición necesaria para que una mezcla de concreto pueda considerarse trabajable, es que se conserve homogénea en el curso de todas las operaciones a que se le someta, desde que abandone la mezcladora hasta que se coloque y se compacte.

Para evaluar su homogeneidad, al término del mezclado se pueden obtener dos o más muestras representativas del concreto, en el curso de su descarga de la mezcladora, para efectuarles diversas pruebas cuyos resultados se comparan. A medida que la mezcla es más homogénea se reduce la diferencia de los resultados comparados.

La falta de homogeneidad de la mezcla de concreto puede originarse por:

1. El sistema de carga, el orden y rapidez con que se introducen los ingredientes
2. El tiempo de mezclado
3. El volumen de materiales para fabricación en relación con la capacidad del equipo
4. El sistema y condiciones de descarga del concreto
5. Las características del equipo para fabricación del concreto
6. El procedimiento de muestreo y prueba del concreto

Prácticamente, la finura es la única característica del cemento que puede aportar beneficio a la cohesión y la manejabilidad de las mezclas de concreto. Sin embargo, existen otros

factores con efectos más decisivos para evitar que las mezclas de concreto segreguen durante su manejo y colocación.

En la tabla 3.1 se incluyen los requisitos de homogeneidad del concreto premezclado en el seno de la revoltura, de acuerdo con las especificaciones NMX C-155 y ASTM C 94.

TABLA 3.1.- REQUISITOS DE HOMOGENEIDAD DEL CONCRETO PREMEZCLADO

DETERMINACIÓN	METODO DE PRUEBA ESPECIFICACIONES			
	NMX	ASTM	NXM	ASTM
Peso volumétrico del concreto kg/m ³ Peso volumétrico del mortero, calculado sin aire, kg/m ³	C-162	(a)	15	16
Contenido de aire, para concreto con aire incluido, % en volumen	C-157	C-138, C-173, C-231	1	1
Revenimiento, cm: Si el revenimiento promedio es menor de 5 cm Si el revenimiento promedio es entre 5 y 10 cm Si el revenimiento promedio es entre 10 y 15 cm Si el revenimiento promedio es mayor de 15 cm	C-156	C-143	1.5 2.5 3.5 3.5	2.5 2.5 3.8
Contenido de agregado grueso, porción en peso de cada muestra retenida en la malla de 4.75 mm %		(a)	6	6
Peso unitario del mortero libre, basado en el promedio de todas las muestras comparativas ensayadas, %		(a)		1.6
Resistencia promedio a compresión a 7 días, (b) basada en el promedio de las resistencias de todas las muestras comparativas ensayadas, %	C-160, C-83	C-31, C-39	7.5 (c)	7.5 (c)
(a) Prueba de variabilidad de componente del concreto. (b) Tres especímenes representativos de cada muestra, como mínimo. (c) Puede darse la aprobación provisional de la mezcladora, antes de obtener los resultados de resistencia, si cumple los demás requisitos.				

3.1.2 CONSISTENCIA Y COHESIÓN

La consistencia en el concreto premezclado se identifica con la movilidad para fluir, y admite que la manera más usual para evaluarla es por medio del revenimiento, ver la fig. 3.2. El ACI 309 relaciona a la consistencia con la trabajabilidad y compactabilidad.

En el CCR, es necesaria una trabajabilidad suficiente para alcanzar la compactación o consolidación de la mezcla. También es necesaria suficiente trabajabilidad para proporcionar una apariencia aceptable cuando el CCR es compactado contra las cimbras. La trabajabilidad es afectada mayormente por la porción de pasta en la mezcla incluyendo cemento, puzolana, agregados finos, agua y aire. Cuando hay suficiente pasta para llenar los vacíos de los agregados la trabajabilidad de la mezclas de CCR normalmente es medida en una mesa vibradora con un aparato VeBe, de acuerdo con la norma ASTM C 1170. Este

ensaye produce un tiempo VeBe para una mezcla específica, y se usa de manera similar como la prueba de revenimiento para el concreto convencional. Las mezclas de CCR con el grado de trabajabilidad necesario para fácil compactación y producción de densidad uniforme desde la parte superior a la inferior de la capa, para la adherencia con la capa previamente colocada y para soportar el equipo de compactación, generalmente tienen un tiempo VeBe de 10 a 45 seg. Sin embargo, las mezclas de CCR se han proporcionado con un amplio intervalo de niveles de trabajabilidad. Algunas mezclas de CCR tienen contenidos tan bajos de pasta que la trabajabilidad no puede ser medida con el aparato VeBe. Esto es particularmente cierto en aquellas proporciones de mezclas con contenidos muy bajos de materiales cementantes o diseñada más como un relleno estabilizado con cemento. La trabajabilidad de este tipo de mezclas necesita ser juzgada por observaciones durante la colocación y compactación, junto con mediciones de la densidad y el contenido de humedad.

La demanda de agua para un nivel específico de trabajabilidad estará influenciada por el tamaño, forma, textura y granulometría de los agregados y el volumen y naturaleza de los materiales cementantes y finos. Dependiendo del volumen de pasta, la demanda de agua puede establecerse por el tiempo VeBe o por la relación humedad-densidad, discutido posteriormente.

La cohesión se identifica con el esfuerzo de cedencia, representa en cierto modo la resistencia que la mezcla opone para deformarse e iniciar el flujo, en tanto que la viscosidad plástica da la noción de la facilidad y rapidez con que la mezcla puede fluir, una vez rebasada la cohesión e iniciado el movimiento. Entonces, desde un punto de vista práctico, lo deseable es que las mezclas de concreto fluyan con facilidad, pero permaneciendo homogéneas.



Fig. 3.2 Prueba de revenimiento.

El grado de consistencia, está relacionado con la resistencia que opone para deformarse y fluir; puede hablarse entonces de grados de consistencia valorables en función de dicha resistencia a la deformación y flujo. En la práctica se recurre normalmente a dos modos para expresar los grados de consistencia de las mezclas de concreto:

1. En términos descriptivos, basado en la experiencia con la mezcla de concreto y el comportamiento que exhibe al ser manipulada. En tal caso se dice que una mezcla es de consistencia fluida, plástica o dura, con sus correspondientes calificativos intermedios y superlativos.
2. En términos cuantitativos, expresados con base en los resultados de alguna prueba específica, de uso más o menos común. Por ejemplo la consistencia de las mezclas de concreto suele definirse en centímetro de revenimiento, en segundos de compactación en el aparato Vebe.

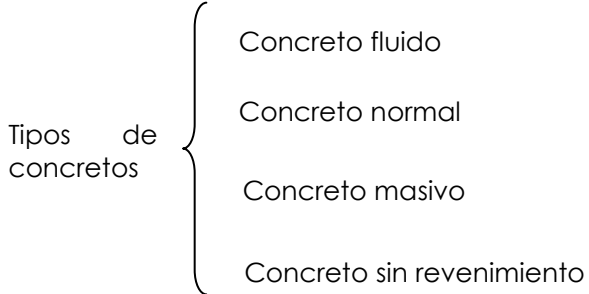
En la fig. 3.3 se presenta un esquema con la escala de los grados de consistencia relacionados gráficamente con los datos de las pruebas del cono de revenimiento y del aparato Vebe, en donde también se acotan los intervalos aproximados de consistencia con que normalmente se producen los tipos de concreto cuyo empleo es más frecuente.

CONSISTENCIA		TIPOS DE CONCRETO	
			32
	Extremadamente dura	Concreto sin revenimiento (ACI 211.3)	18
0	Muy dura		10
3	Dura		5
8	Semi-Plástica	Concreto masivo (ACI 211.1)	3
13	Plástica		0
20	Semi-fluida	Concreto fluido (ASTM C 1017)	
25	fluida		

Dudosa aplicabilidad

Fig. 3.3 Escala de los grados de consistencia

El tipo de concreto y la consistencia con que se deben elaborar las mezclas, normalmente se definen de acuerdo con las características de la estructura, o elemento de concreto por colar, y las condiciones de exposición y servicio. Una vez hecha esa definición, deben seleccionarse los equipos y procedimientos adecuados para mezclar, conducir, colocar y compactar satisfactoriamente y sin segregación el concreto.



Consistencia en el concreto sin revenimiento, de acuerdo con el informe ACI 211.3, en este tipo de concreto se utilizan mezclas con un revenimiento máximo de 2.5 cm; por lo tanto le corresponde ser trabajado con las consistencias identificadas como dura, muy dura y extremadamente dura.

Las pruebas para determinar la consistencia del concreto sin revenimiento son:

- a) El factor de compactación
- b) la mesa de sacudidas de Thaulow, y
- c) la mesa vibratoria Vebe.

En las pruebas de consistencia con la mesa de sacudidas de Thaulow y con la mesa vibratoria Vebe se desarrolla el mismo principio, emanado del aparato de remoldeo de Powers, que consiste en cuantificar el esfuerzo requerido para remoldear una muestra de concreto fresco de aproximadamente 6 litros, partiendo de la forma troncocónica original de la prueba de revenimiento estándar hasta convertirla a la forma de un cilindro con diámetro de 24 cm. En la mesa de Thaulow el esfuerzo se mide por el número de sacudidas, aplicadas manualmente, que es necesario comunicar al dispositivo para lograr la conversión de forma en la muestra de concreto, y en el aparato Vebe, que se muestra en la fig. 3.4, el esfuerzo se cuantifica por el tiempo (medido en segundos) requerido para lograr la misma

finalidad, mediante la operación de la mesa vibratoria sobre la cual descansa el molde que contiene la muestra de concreto.

Normalmente se considera que el aparato Vebe tiene mayor efectividad en las mezclas de consistencia dura, debido a que la energía vibratoria que emplea es más eficaz para deformar y hacer fluir el concreto que la energía que se transmite mediante las sacudidas en la mesa de Thaulow.

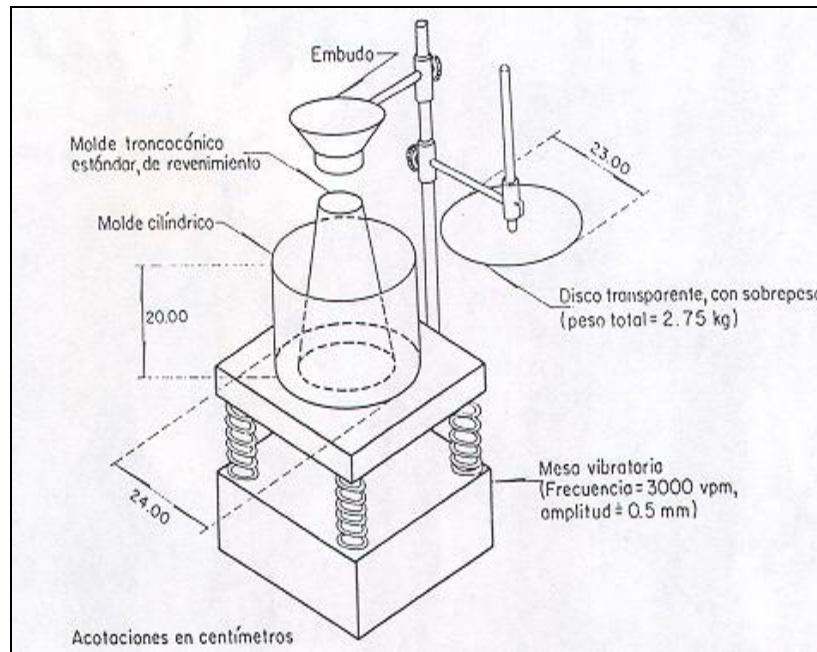


Fig. 3.4 Aparato Vebe para medir la consistencia de mezclas de concreto sin revenimiento (ACI 211.3)

En la tabla 3.2 se muestran resultados típicos de medición de la consistencia en mezclas de concreto duras, muy duras y extremadamente duras, mediante las pruebas con el revenimiento, el dispositivo del factor de compactación, la mesa de Thaulow y el aparato Vebe.

Tabla 3.2 Medición comparada de la consistencia de mezclas de concreto sin revenimiento, por diversos procedimientos

Grados de consistencia	Procedimientos de medición			
	Revenimiento, cm	Factor de compactación	Mesa de Thaulow, Sacudidas	Aparato Vebe, seg
Dura	2.5 a 0 (a)	0.75	14 a 28	5 a 10
Muy dura	(b)	0.7	28 a 56	10 a 18
Extremadamente dura	(b)	(b)	56 a 112 (c)	18 a 32

Notas: (a) Aplicación con reservas
 (b) No aplicable
 (c) Precisión limitada

3.1.3 ESTABILIDAD (segregación y sangrado)

El objetivo principal en el proporcionamiento de las mezclas de CCR es producir una mezcla cohesiva que minimice la tendencia a la segregación durante el transporte, colocación y extensión. Agregados bien graduados con un contenido de agregados finos ligeramente mayor que para el concreto convencional son esenciales para TMNA mayores a 38 mm. Si no se proporcionan adecuadamente, las mezclas de CCR tienden a segregarse debido a la naturaleza más granular de la mezcla. Esto es controlado por la granulometría de los agregados, el contenido de humedad y aumentando el contenido de finos en mezclas con contenido cementante bajo. Mezclas con contenidos cementantes más altos usualmente son más cohesivas y menos proclives a la segregación.

El acto de mezclar el concreto, tiene como funciones básicas provocar el contacto íntimo entre los granos de cemento y el agua y distribuir uniformemente todos los componentes del concreto, previamente dosificados en el seno de la mezcla. De esta manera se producen de hecho dos suspensiones de partículas a escala:

1. La suspensión de los granos de cemento en el agua, para constituir la pasta de cemento
2. La suspensión de las partículas de los agregados grueso y fino

Cada una de estas suspensiones debe alcanzar una suficiente integración y uniformidad al final del mezclado, para que la mezcla de concreto resulte homogénea y estable.

Se considera que una mezcla de concreto se comporta como una suspensión estable, en la medida que se opone a perder su homogeneidad original en el lapso comprendido desde que sale del equipo de mezclado hasta que adquiere el fraguado en su posición final en la estructura.

Al referirse al comportamiento de una mezcla de concreto como suspensión estable, podemos considerar que puede perder homogeneidad por dos conceptos:

1. En el primero, el demérito de la homogeneidad se manifiesta por los fenómenos simultáneos identificados como asentamiento y sangrado.
2. En el segundo, la separación parcial del agregado grueso del resto de la masa, lo cual se conoce como segregación de la grava .

El sangrado del concreto es el desarrollo de una lámina de agua en la superficie del concreto recién colocado. Es causada por la sedimentación de las partículas sólidas (cementante y agregados) y simultáneamente el ascenso del agua hacia la superficie. En el CCR, el sangrado es similar o menor que el que se presenta en el concreto convencional debido a su reducido contenido de agua.

El fenómeno de segregación representa el estado opuesto de la homogeneidad y suele reservarse para el caso en que una parte de la grava se separe ostensiblemente de la masa de concreto originalmente homogénea.

El tamaño máximo de la grava juega un papel muy importante en la tendencia a la segregación de las mezclas de concreto, pues el riesgo de que las gravas se segreguen se incrementa notablemente al aumentar su tamaño y su correspondiente masa, lo cual es aún más crítico cuando el peso específico de la grava es alto. En el concreto convencional, es común trabajarlas con un tamaño máximo de grava que no suele exceder a 40 mm, siendo

preferentemente de 20 mm para reducir el riesgo de segregación en estas mezclas, en el CCR los tamaños son mayores.

El contenido unitario de agregados en la mezcla de concreto es factor decisivo en su aptitud para conservarse homogénea durante su manipulación en obra, por lo cual debe establecerse en cada caso un balance adecuado entre los contenidos de pasta de cemento y de agregados, de acuerdo con las características específicas de estos componentes.

3.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

El concreto es un material de múltiples fases, que contiene pasta de cemento (partículas hidratadas), agua, agregados, aditivos. En términos generales, las propiedades mecánicas y físicas de un sistema compuesto dependen de las propiedades de sus componentes y de la interacción mecánica, física y química entre ellos.

Las propiedades del CCR endurecido son similares a las del concreto masivo. Sin embargo, existen algunas diferencias entre el CCR y el concreto masivo, debido principalmente a la resistencia requerida, desempeño y contenido de vacíos de las mezclas de CCR. La mayor parte de las mezclas de CCR no tienen aire incluido y también pueden usar agregados que no cumplan con la calidad o requisitos de granulometría de un concreto masivo convencional. Las mezclas de CCR también pueden incluir puzolanas, las cuales afectan la velocidad de incremento de resistencia y generación de calor de la mezcla. Debido a que algunas mezclas de CCR pueden usar agregados de baja calidad y bajos contenidos de material cementante (en comparación con los concretos convencionales) el intervalo de las propiedades del CCR endurecido es más amplio que el intervalo de las propiedades del concreto convencional.

3.2.1 RESISTENCIA MECANICA

La resistencia mecánica del concreto ha sido la propiedad más identificada con su comportamiento de construcción, lo cual se considera atribuible a tres principales razones:

1. La resistencia mecánica (a compresión o tensión) tiene influencia directa en la capacidad de carga de las estructuras.
2. Es la propiedad que mejor se puede determinar en el concreto endurecido.
3. Los resultados de su determinación pueden ser utilizados como datos índices de otras propiedades del concreto.

La resistencia mecánica que potencialmente puede desarrollar el concreto depende de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento endurecida, y de la adherencia que se produce entre ambos materiales. La proporción de vacíos en el concreto endurecido tiene un efecto decisivo en su resistencia mecánica.

Las propiedades mecánicas se clasifican en:

- ⊕ Propiedades instantáneas o de corta duración
 - Resistencia a compresión (ASTM C-39)
 - Resistencia a tensión (ASTM C-496)
 - Esfuerzo de flexión (ASTM C-78)
 - Módulo de elasticidad y relación de poisson (ASTM C-469).

- ⊕ Propiedades de larga duración
 - Deformación Diferida (Creep) (ASTM C-512)
 - Contracción por Secado (ASTM C-157)

La ley de la relación agua-cemento (a/c), como fue desarrollada por Abrams en 1918, es solamente válida para mezclas de concreto totalmente consolidadas. Por tanto, la resistencia a compresión del CCR es función de la relación agua-material cementante (a/mc) solamente para mezclas con tiempos Vebe inferiores a 45 seg, pero usualmente en el intervalo de 15 a 20 seg. La fig. 2.8 del capítulo 2 presenta estas relaciones generales. Para mezclas de consistencia seca (sin llenar todos los vacíos con pasta), la resistencia a compresión se controla con relaciones humedad-densidad. Hay un contenido óptimo de humedad que produce una densidad seca máxima para un cierto esfuerzo comparable. Con el mismo agregado, el contenido de humedad necesario para producir una resistencia a compresión máxima es menor que la humedad requerida para producir una mezcla de CCR con un tiempo VeBe en el intervalo de 15 seg. Con variaciones en el contenido de cementante, no hay cambio, o cambios mínimos en el contenido de humedad óptimo.

Si el contenido de agua es menor que el óptimo, determinado por resistencia o por las curvas densidad vs humedad, hay incremento de vacíos en la mezcla. Esta condición conduce a una mezcla compactada difícilmente dando como resultado una pérdida de densidad y resistencia.

3.2.1.1 RESISTENCIA DE LOS AGREGADOS

Cuando las partículas de los agregados son duras y resistentes, la resistencia mecánica del concreto tiende a ser gobernada por la resistencia de la pasta de cemento y/o por la adherencia de ésta con los agregados. Pero si los agregados son débiles, la resistencia intrínseca de éstos se convierte en una limitante para la obtención de altas resistencias mecánicas en el concreto.

Es conveniente que siempre haya una adecuación entre la resistencia que se requiere obtener en el concreto y la de los agregados, a fin de no tener que depender excesivamente de la resistencia de la pasta, lo cual repercute adversamente en el aspecto económico por la necesidad de incrementar el consumo unitario de cemento.

3.2.1.2 RESISTENCIA DE LA PASTA CEMENTO

La adquisición de resistencia mecánica de la pasta de cemento conforme endurece es una consecuencia inmediata del proceso de hidratación de los granos de cemento. La pasta que se encuentra en etapa de fraguado, inicia en la periferia de los granos de cemento la formación de un tejido filamentososo, constituido por los productos de hidratación denominados genéricamente "gel de cemento"

Al crecer e incrementarse estos productos "puentean" los espacios ocupados por la solución acuosa y aglutinan los granos de cemento para darle rigidez a la pasta, que de este modo adquiere el fraguado, pasando así de su condición inicial de masa blanda y viscosa a la de cuerpo rígido pero frágil, prácticamente sin resistencia al fraguar.

Se considera que la resistencia mecánica de la pasta endurecida, es gobernada por la influencia de dos variables:

- ⊕ La cantidad de productos de hidratación generados hasta el momento del ensaye.
- ⊕ La proporción del espacio disponible (cavidades llenas de agua) que ha sido ocupado por dichos productos de hidratación.

En una pasta con cierto grado de endurecimiento, el agua se encuentra en tres formas:

1. El agua combinada, que forma parte de la composición química de los productos de hidratación, y por tanto no es evaporable.
2. El agua cuyas moléculas se encuentran retenidas por absorción de los poros del gel, cuyo desarrollo superficial favorece la hidratación.
3. El agua que permanece en los espacios libres no ocupados por el gel, en los llamados poros capilares de la pasta endurecida.

3.2.1.3 ADHERENCIA PASTA-AGREGADO

La resistencia de la pasta así como la adherencia con los agregados progresan con la hidratación del cemento; existe evidencia de que en el concreto, a edad temprana, la resistencia por adherencia suele ser menor que la resistencia de la pasta, en tanto que a edades avanzadas tiende a ocurrir lo contrario.

Por tanto, con agregados de buena calidad, la resistencia mecánica del concreto a la edad de servicio debiera depender exclusivamente de la resistencia de la pasta. Se debe considerar la compatibilidad entre la resistencia de la pasta y la que se genere por adherencia entre ésta y los agregados, lo cual significa que no tiene sentido práctico tratar de incrementar la resistencia del concreto utilizando una pasta de muy alta resistencia cuando es la falta de adherencia la que limita.

La modificación del tamaño máximo del agregado se manifiesta por dos efectos en la resistencia mecánica del concreto:

- ⊕ el aumento del tamaño máximo reduce el requerimiento de agua en la mezcla y tiende a disminuir la relación agua/cementante, por lo que se incrementa la resistencia mecánica.
- ⊕ al aumentar el tamaño de las partículas disminuye la superficie de contacto de los agregados con la pasta, y así se reduce la resistencia por adherencia con los agregados.

3.2.1.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN (f'_c)

Los ensayos de resistencia a compresión se realizan en la fase de diseño para determinar los requisitos de las proporciones de la mezcla, y también para optimizar las combinaciones de materiales cementantes y agregados.

La resistencia a compresión del CCR está determinada por el contenido de agua, el contenido de cementante, propiedades de los materiales cementantes, la granulometría de

los agregados, y el grado de compactación. Para un CCR completamente compactado, la influencia de la relación a/mc en la resistencia a compresión es válida. La puzolana puede diferir el desarrollo de las resistencias tempranas del CCR. Altos contenidos de puzolanas originan bajas resistencias tempranas. Sin embargo, mezclas proporcionadas para resistencias a edades posteriores, como los 180 días o 1 año, pueden usar cantidades importantes de puzolanas.

Resistencias a compresión típicas y propiedades elásticas del CCR se presentan en las tablas 3.3, 3.4 y 3.7. La resistencia a compresión de diseño de estas mezclas puede variar desde valores tan bajos como (6.9 MPa) 70 kg/cm² a tan altos como (27.6 MPa) 280 kg/cm² a la edad de 1 año. Las figs. 3.5 y 3.6 muestran una familia de curvas de resistencia a compresión desarrolladas para dos agregados diferentes usando un método de máxima densidad para el proporcionamiento de la mezcla.

Tabla 3.3 Resistencia a compresión de algunas presas de CCR: cilindros de control de la construcción

Presa/Proyecto	Tipo de mezcla/IP	Cemento, kg/m ³	Puzolana, kg/m ³	a/mc	TMNA mm(pulg)	Método de Fabricación de cilindro	Resistencia a compresión, MPa, a la edad de ensaye				
							7 días	28 días	90 días	180 días	365 días
Camp Dyer	CCR1	82	81	0.55	38.1(1.5)	VB	6.1	10.1	—	—	25.4
Concepción	90 C	90	0	1.03	76.2(3)	CN	4.0	5.5	7.6	8.8	—
Galesville	CCR1	53	51	1.09	76.2(3)	CN	2.1	4.0	7.0	—	11.2
	CCR2	65	68	0.84	76.2(3)	CN	2.9	5.7	9.4	—	—
Middle Fork	66C	66	0	1.43	76.2(3)	CN	—	8.8	11.4	—	—
Santa Cruz	CCRAIA	76	75	0.67	50.8(2)	VB	7.5	18.8	22.2	—	30.5
Stacy Spillway	125C 62P	125	62	0.82	38.1(1.5)	PM	—	18.1	21.4	—	—
Stagecoach	71C 77P	71	77	0.93	50.8(2)	CN	1.5	2.4	—	6.8	8.6
Upper Stillwater	CCR A 85	79	173	0.37	50.8(2)	VB	10.8	17.7	24.8	38.5	48.1
	CCR B 85	94	207	0.30	50.8(2)	VB	14.1	23.6	29.0	38.1	51.0
	CCRA	79	173	0.39	50.8(2)	VB	7.4	12.6	17.9	—	44.1
	CCRB	93	206	0.33	50.8(2)	VB	9.2	15.4	21.4	—	46.5
Urugua-1	60C	60	0	1.67	76.2(3)	CN	—	6.4	8.1	—	9.6
	104C	104	0	1.06	76.2(3)	CN	6.9	12.8	18.3	—	26.1
Willow Creek	104C 47P	104	47	0.73	76.2(3)	CN	7.9	14.2	27.3	—	28.6
	47C 19P	47	19	1.61	76.2(3)	CN	4.0	8.1	11.9	—	18.1
	187C 80P	187	80	0.41	38.1(1.5)	CN	14.0	23.5	30.8	—	39.9

Nota: Método de fabricación de cilindro: VB-VeBe (ASTM C 1176); PM-próctor modificada (ASTM D 1557); y CN-compactador neumático.

Tabla 3.4 Comparación de resistencia a compresión de CCR: cilindros de control de la construcción versus núcleos

Presa/Proyecto	Tipo de mezcla/IP	Cemento, kg/m ³	Puzolana, kg/m ³	a/mc	TMNA mm(pulg)	Método de fabricación de cilindro	Resistencia de cilindro, MPa			Resistencia de núcleo, MPa			
							27 días	90 días	365 días	Edad, días	Resistencia	Edad, días	Resistencia
Elk Creek	70C 33P	70	33	1.00	76(3)	VB	3	9	16	90	9	730	17
Galesville	CCR 1	53	51	1.09	76(3)	CN	4	7	11	425	14	—	—
Middle Fork	66C	66	0	1.43	76(3)	CN	9	11	—	42	14	—	—
Stacy Spillway	125C 62P	125	62	0.82	38(1.5)	PM	18	21	—	28	14	90	18
Stagecoach	71C 77P	71	77	0.93	51(2)	CN	2	—	9	180	14	365	13
Upper Stillwater	CCR A	79	173	0.39	51(2)	VB	13	18	44	180	34	365	36
Victoria	67C 66P	67	66	0.80	51(2)	—	—	—	—	365	18	—	—
	104C	104	0	1.06	76(3)	CN	13	18	26	365	15	—	—
Willow Creek	104C 47P	104	47	0.73	76(3)	CN	14	27	29	365	19	—	—
	47C 19P	47	19	1.61	76(3)	CN	8	12	18	365	16	—	—
	187C 80P	187	80	0.41	38(1.5)	CN	24	31	40	365	27	—	—
Zintel Canyon	125 CNA	74	0	1.50	64(2.5)	—	—	—	—	345	10	—	—

Nota: Método de fabricación de cilindro: VB-VeBe (ASTM C 1176); PM-próctor modificada (ASTM D 1557); y CN-compactador neumático.

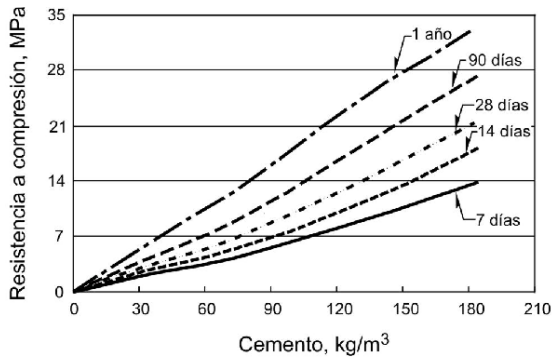


Fig.3.5 Curvas de resistencia de CCR que se pueden alcanzar obtenidas de ensayos de concreto con proporciones de cementos variables y agregados de buena calidad, ACI 207.5R-11.

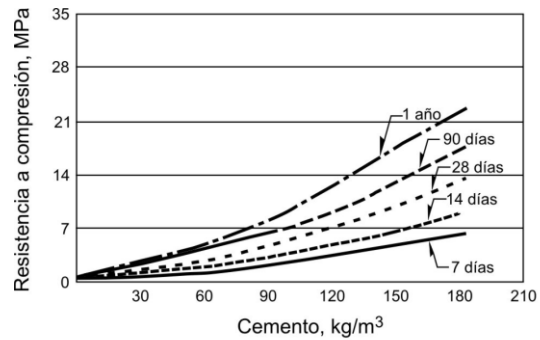


Fig.3.6 Curvas de resistencia de CCR alcanzadas con agregados de calidad menor, ACI 207.5R-11.

La resistencia a compresión es la medida de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Se estima que un concreto a 7 días tendrá 75% de la resistencia a 28 días y a 56 y 90 días se incrementa en 10% y 15%, respectivamente.

La respuesta del concreto a las acciones aplicadas depende no solo del tipo de esfuerzo, sino también de una combinación de varios factores que afecta la interacción de los distintos componentes estructurales del concreto. Estos factores incluyen las propiedades y las proporciones de los materiales que constituyen la mezcla de concreto, el grado de compactación logrado y las condiciones de curado.

Los factores se analizan divididos en los siguientes grupos:

- ⊕ Características y proporciones de los materiales
 - Relación agua/cementante
 - Inclusión de aire
 - Tipo de cemento
 - Agregado
 - Agua de mezclado
 - Aditivo
- ⊕ Condiciones de curado
 - Tiempo
 - Humedad
 - Temperatura
- ⊕ Parámetros de prueba
 - Parámetros de los especímenes
 - Condiciones de carga

3.2.1.5 RESISTENCIA A TENSIÓN (f_t)

La resistencia a tensión del CCR se requiere para fines de diseño, incluyendo cargas dinámicas y análisis térmico. Las relaciones de resistencia tensión a compresión para mezclas compañeras de CCR (no en la junta) tienen intervalos típicos de aproximadamente 5 a 15%, dependiendo de la calidad del agregado, resistencia, edad, y método de ensaye. Mezclas con bajo contenido de materiales cementante, o aquellas con agregados de baja calidad o agregados recubiertos, o ambos, corresponderán a las resistencias a tensión directa más bajas.

La resistencia a tensión directa promedio de las juntas de CCR puede suponerse de aproximadamente 5% de la resistencia a compresión. La resistencia a tensión indirecta del CCR se supone aproximadamente 10% de la resistencia a compresión.

La resistencia a flexión ó cortante es generalmente la propiedad más crítica del concreto endurecido para las presas de gravedad de CCR. La resistencia al cortante total es la suma de la cohesión más la fricción interna, principalmente a través de las juntas de las capas horizontales generalmente adheridas e intactas. Las propiedades a cortante mínimas se presentan en las juntas de construcción entre las capas de CCR. Resultados de ensaye a cortante típicos para CCR y para juntas adheridas y no adheridas se dan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Desempeño a cortante de núcleos barrenados de presas de CCR

Presa/ Proyecto	Tipo de mezcla/ IP	Cemento, kg m ³	Puzolana, kg m ³	a/wc	TMNA (vulz) mm	Tipo de junta	Edad, días	Resistencia a compresión de núcleo, MPa	Cohe sión puco, kPa	Cortante θ , grados	Cohe sión cortante residual kPa	Cortante residual θ , grados	Consistencia Vehesec	Juntas adheridas, %	Madurez de la junta
Cuchillo negro	77C 59P	77	59	0.99	76.2(3)	L	750	17	1551	58	—	—	—	—	—
	77C 59P	77	59	0.99	76.2(3)	G	750	17	2482	52	—	—	—	—	—
	77C 59P	77	59	0.99	76.2(3)	NL	750	17	689	62	—	—	—	—	—
Elk Creek	70C 33P	70	33	1.00	76.2(3)	G	90	9	1551	43	—	—	21	—	—
	70C 33P	70	33	1.00	76.2(3)	L	90	9	862	49	—	49	—	58	—
Galesville	CCR.1	53	51	1.09	76.2(3)	SL	415	14	758	67	552	40	—	24	260°C-h
	CCR.1	53	51	1.09	76.2(3)	L	415	14	2275	52	483	43	—	76	—
	CCR.1	53	51	1.09	76.2(3)	G	415	14	2620	33	655	45	—	—	—
Upper Stillwater	CCR.A	79	173	0.39	50.8(2)	SL	365	36	3103	53	207	49	17	80	—
	CCR.A	79	173	0.39	50.8(2)	SL	545	39	3861	76	138	53	17	—	—
	CCR.A85	79	173	0.37	50.8(2)	G	120	27	2068	55	207	42	29	60	—
	CCR.A85	79	173	0.37	50.8(2)	SL	730	45	3034	48	138	46	29	60	—
Victoria	67C 66P	67	66	0.80	50.8(2)	G	365	18	1931	64	276	47	730	—	—
	67C 66P	67	66	0.80	50.8(2)	L	365	18	1586	69	69	44	—	—	—
	67C 66P	67	66	0.80	50.8(2)	SL	365	18	1172	62	1379	48	—	—	—
Willow Creek	104C	104	0	1.06	76.2(3)	SL	200	—	1278	65	—	—	—	57	260°C-h
	104C 47P	104	47	0.73	76.2(3)	SL	200	—	1279	63	—	—	—	54	260°C-h
	47C 19P	47	19	1.61	76.2(3)	SL	200	—	793	62	—	—	—	58	260°C-h
Zintel Canyon	74C NA	74	0	1.50	63.5 (2.5)	SL	345	10	586	56	69	40	14	—	—
	74C NA	74	0	1.50	63.5 (2.5)	L	345	10	1379	54	69	40	14	65	—
	74C NA	74	0	1.50	63.5 (2.5)	G	345	10	1999	56	0	55	14	—	—

Nota: L-Concreto o mortero de liga; SL-Sin liga; G-Concreto generador

La resistencia a cortante no confinado de una sección sin juntas de CCR ha variado de 16 a 39% de su resistencia a compresión. La resistencia a cortante no confinado de un concreto colocado en forma convencional, como se determina por los ensayes de cortante directo generalmente varía de aproximadamente 20 a 25% de su resistencia a compresión, pero un valor conservador de aproximadamente 10 por ciento es usado frecuentemente para fines de diseño.

El concreto endurecido se manifiesta, en pruebas bajo cargas de corta duración, como un material frágil, pues su falla se produce a una deformación unitaria relativamente reducida: entre 100 y 200 millonésimas a tensión y entre 2,000 y 4,000 millonésimas a compresión, según su resistencia de diseño; y esta deformación a tensión y compresión puede verse como una manifestación de lo heterogéneo de su composición que le confiere el carácter de cuerpo anisótropo.

La mayoría de los elementos de concreto se diseñan bajo la suposición de que el concreto deberá resistir los esfuerzos a compresión, pero no a los de tensión. Pero, los esfuerzos a la tensión no pueden ser ignorados porque el agrietamiento del concreto en muchas ocasiones es el origen de una falla por tensión.

De igual manera que la resistencia del concreto a compresión, la de tensión también depende de las resistencias a tensión propias de la pasta de cemento y de los agregados, y de la adherencia que se genera entre ambos, si bien la influencia relativa de estos factores puede variar en función de los procedimientos que se utilizan para determinar la resistencia del concreto a tensión, que son básicamente tres, tal y como se representa esquemáticamente en la fig. 3.7:

- (1) Prueba de tensión directa, por medio del ensaye de especímenes cilíndricos o prismáticos, sometidos a una fuerza de tensión axial.
- (2) Prueba de tensión indirecta, mediante el ensaye de especímenes cilíndricos, sujetos a la aplicación de una carga de compresión diametral.
- (3) Prueba de tensión por flexión en especímenes prismáticos (vigas), ensayado opcionalmente con una carga concentrada en el centro del claro, o con dos cargas concentradas iguales aplicadas en los tercios del claro.

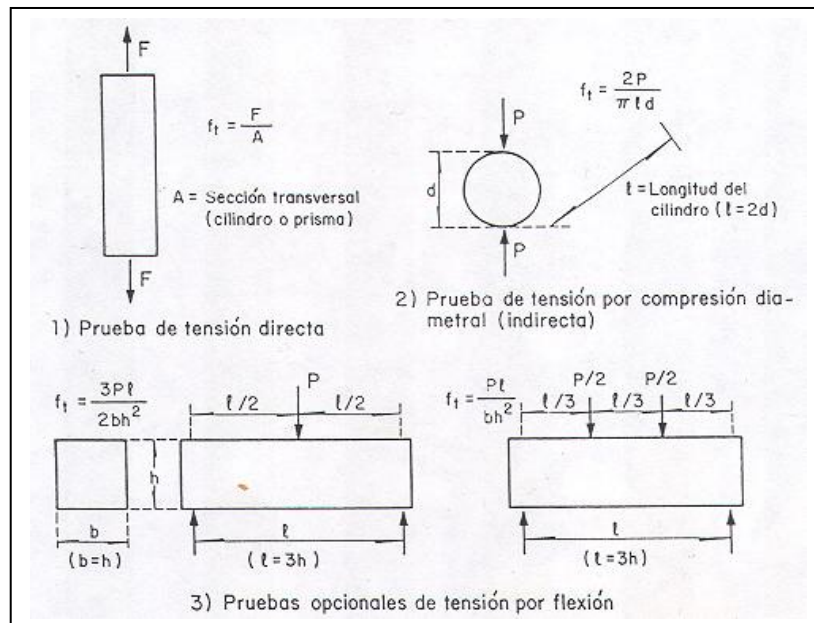


Fig. 3.7 Representación esquemática de los procedimientos usuales para determinar la resistencia a tensión del concreto

La influencia de las microfisuras y otras discontinuidades sobre la resistencia de la pasta endurecida toma más relevancia a tensión que a compresión, porque cuando existe una discontinuidad en un material frágil (la pasta) que se halla sometido a tensión, se producen concentraciones de esfuerzos en los bordes de la discontinuidad con una magnitud varias veces superior al esfuerzo medio de tensión que actúa. En la fig. 3.8 se presenta un esquema de la distribución de esfuerzo.

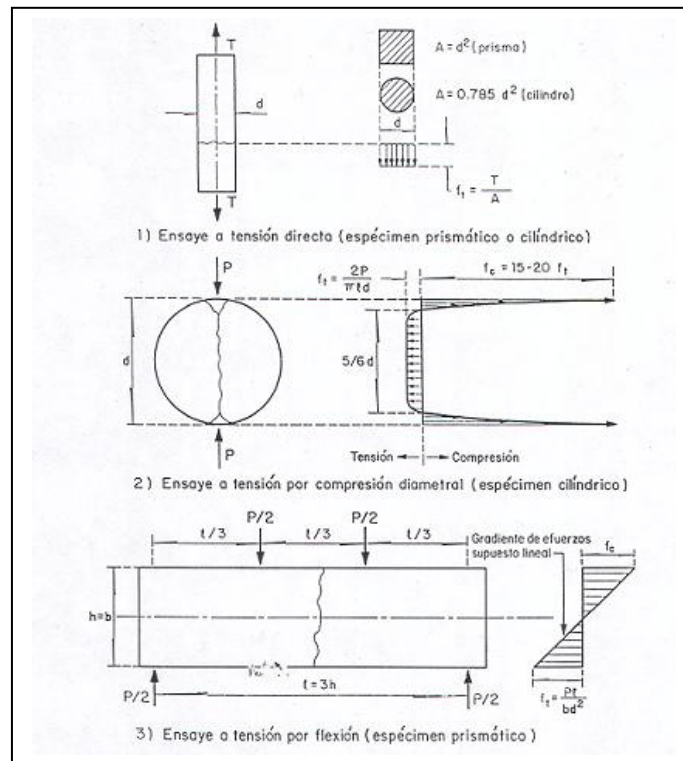


Fig. 3.8 Distribución de esfuerzos en la sección de falla de especímenes concreto ensayados a tensión por tres procedimientos usuales.

3.2.1.6 MÓDULO DE ELASTICIDAD (E) Y RELACIÓN DE POISSON (μ)

El módulo de elasticidad es usualmente un parámetro de entrada requerido por la mayor parte de los programas de análisis de esfuerzos. Los principales factores que afectan las propiedades elásticas del CCR son la edad, la resistencia, el volumen de pasta, y el tipo de agregado. Generalmente, para un tipo de agregado, el módulo de elasticidad es función de la resistencia. Módulos de elasticidad típicos para una variedad de mezclas de CCR se muestran en la tabla 3.6

Tabla 3.6. Resistencia a compresión y propiedades elásticas de algunas mezclas de laboratorio de CCR

Pres/a Proyecto	Tipo de mezcla/ IP	Método de fabrica ción de cilindro	TMNA, mm (plug)	a/mc	Resistencia a compresión, MPa				Módulo de elasticidad, GPa				Relación de Poisson			
					7 días	28 días	90 días	365 días	7 días	28 días	90 días	365 días	7 días	28 días	90 días	365 días
Concepción	90C	CN	76(3)	1.03	4.4	6.8	8.6	11.7	—	7.58	13.17	22.82	—	0.17	—	—
Santa Cruz	1e	VB	51(2)	0.88	4.4	8.9	15.0	21.0	9.38	12.41	15.58	22.34	0.43	0.14	0.19	0.21
Upper Stillwater	L1	VB	51(2)	0.47	9.4	14.7	24.2	36.0	—	7.10	9.10	11.79	—	0.13	0.14	0.17
	L2	VB	51(2)	0.45	5.3	8.4	14.8	33.0	—	5.65	—	10.96	—	0.13	—	0.20
	L3	VB	51(2)	0.43	7.7	11.2	19.1	34.2	—	6.34	—	12.14	—	0.13	—	0.18
Urugua-1	60C	CN	76(3)	1.67	—	6.4	8.1	9.6	—	15.51	21.51	24.82	—	—	—	—
Willow Creek	104C	CN	76(3)	1.06	6.9	12.7	18.3	26.1	15.17	18.41	19.17	—	—	0.19	0.18	—
	104C 47P	CN	76(3)	0.73	7.9	14.2	27.3	28.6	16.55	20.06	22.41	—	—	0.21	0.21	—
	47C 19P	CN	76(3)	1.61	4.0	8.1	11.9	18.1	8.27	10.96	13.17	—	—	0.14	0.17	—
Zintel Canyon	59C 1925	CN	76(3)	2.00	1.9	4.3	7.5	10.7	4.69	10.62	14.82	17.72	—	—	0.21	—
	119C 1975	CN	76(3)	1.00	6.8	11.2	14.7	21.4	10.62	16.48	17.03	22.62	—	—	0.20	—

Método de fabricación de cilindros VB-Vebe(ASTM C 1176); CN-compactador neumático

La rigidez de un material se puede determinar a partir de sus parámetros elásticos. Desde antes de la aplicación de la carga externa existen ya *microgrietas* en la zona de transición entre la matriz del mortero y el agregado grueso en el concreto.

El progreso del microagrietamiento interno en el concreto sigue varias etapas, que dependen del nivel de esfuerzo aplicado, como se presenta en la fig. 3.9.

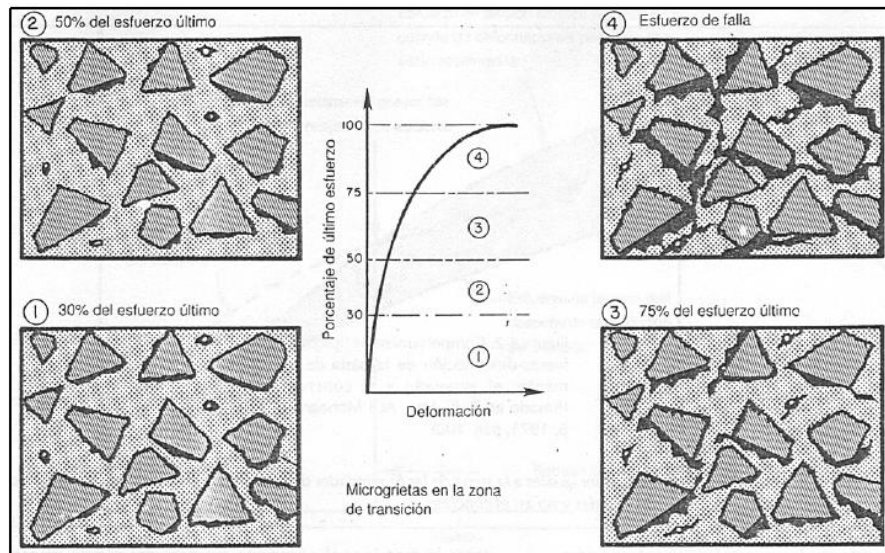


Fig. 3.9 Representación gráfica del comportamiento esfuerzo-deformación del concreto bajo compresión axial.

El módulo de elasticidad estático de un material bajo tensión o compresión, está dado por la pendiente de la curva esfuerzo-deformación (σ - ϵ) del concreto bajo carga axial.

Pero, como se observa en la fig. 3.10, la curva para el concreto no es lineal; se emplean tres métodos para calcular el módulo:

- ⊗ El *módulo tangente* es dado por la pendiente de una línea tangente trazada en la curva (σ - ϵ) en cualquier punto de la curva.
- ⊗ El *módulo secante* es dado por la pendiente de una línea trazada desde el origen a un punto en la curva, correspondiente a un esfuerzo de 40% de la carga de falla.
- ⊗ El *módulo cuerda* es dado por la pendiente de una línea trazada entre dos puntos en la curva (σ - ϵ).

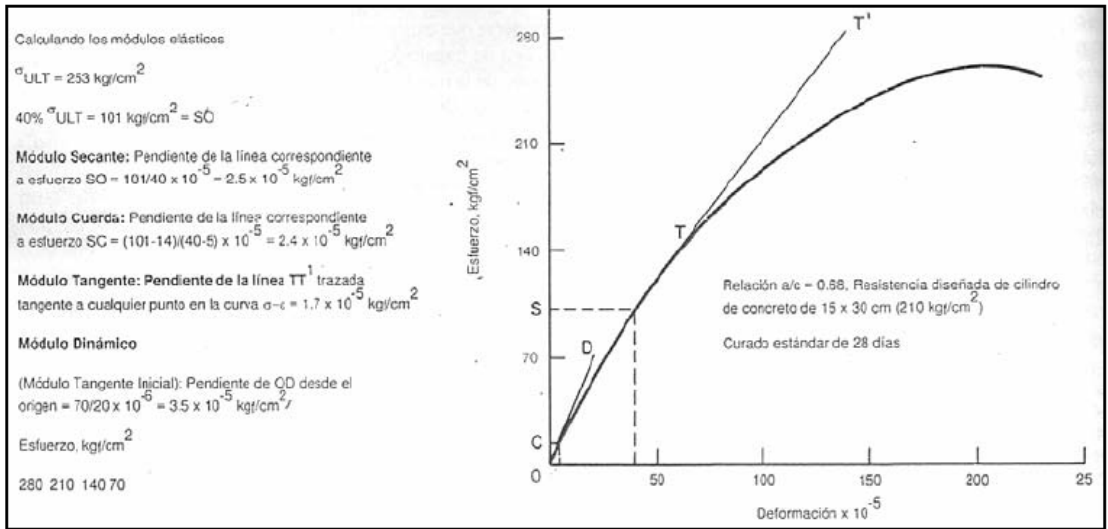


Fig. 3.10 Diferentes tipos de módulos de elasticidad y el método por el cual son determinados.

Relación de Poisson. Valores de la relación de Poisson para el CCR, como se indica en la tabla 3.6, varían de aproximadamente 0.17 a 0.22, con bajas resistencias a compresión. En general, los valores de la relación de Poisson para CCR son similares a los reportados para las mezclas de concreto convencional.

Para un material a carga axial simple, la relación de Poisson es la razón de la deformación lateral a la deformación axial dentro del rango elástico, ver ejemplo de la fig.3.11. Es importante su obtención para los cálculos de diseño avanzado en concreto; en túneles, arcos de presas, placas planas para pisos, cascarones para cubiertas, losas de cimientos y otras estructuras estáticamente indeterminadas.

Estudios anteriores al concreto convencional, señalan que la relación de Poisson varía entre 0.15 y 0.20, pero cabe señalar que este valor es más bajo en concreto de alta resistencia y más alto para concretos con alta relación agua/cementante o concreto cargado dinámicamente.

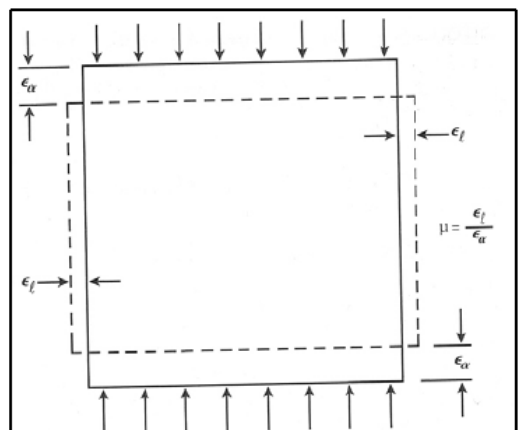


Fig. 3.11 Representación gráfica de la Relación de Poisson.

Como se mencionó anteriormente, en un material como el concreto que es heterogéneo con múltiples fases, la fracción del volumen del componente, la densidad y el módulo de elasticidad de los principales constituyentes y las características de la zona de transición, determinan el comportamiento elástico del compuesto, ver fig.3.12.

Si la densidad está contrariamente relacionada con la porosidad, entonces los factores que afectan la porosidad son:

- Agregado
 - La porosidad del agregado determina su rigidez y controla la capacidad del agregado para restringir las deformaciones de la matriz.
 - En cuanto mayor sea la cantidad de agregado grueso con módulo de elasticidad alto en la mezcla, mayor será su módulo elástico.
 - También influyen el microagrietamiento de la zona de transición el cual a su vez depende del tamaño máximo, la forma, la textura de la superficie, la granulometría y la composición mineralógica del agregado.
- Matriz de la pasta de cemento
 - Los factores que controlan la porosidad de la matriz de pasta de cemento son: la relación agua/cemento, el contenido de aire, los aditivos minerales y el grado de hidratación del cemento.
- Zona de transición
 - Los espacios vacíos, las microgrietas y los cristales orientados de hidróxido de calcio son los que controlan a ésta.

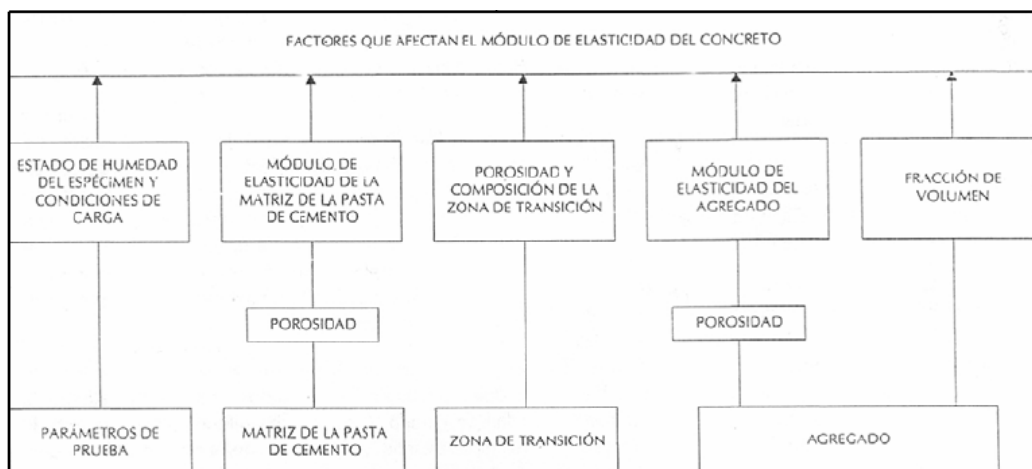


Fig. 3.12 Varios parámetros que influyen en el módulo de elasticidad del concreto

La resistencia a la compresión se incrementa cuando la matriz aumenta su resistencia; sin embargo, el incremento en el módulo de elasticidad no guarda la misma proporción porque el incremento en el microagrietamiento de la zona de transición afecta el comportamiento de la relación esfuerzo/deformación.

En una pasta de cemento saturada, el agua absorbida en el hidrato de silicato de calcio (H-S-C) es soportante de carga, por lo tanto su presencia contribuye al módulo de elasticidad; por otra parte, la presión de separación en el H-S-C tiende a reducir la fuerza de atracción de Van der Waals, disminuyendo así la resistencia.

Hidrato de silicato de calcio (H-S-C) es una de las cuatro fases sólidas presentes en una pasta de cemento hidratada (pch) que representa entre el 50% y 60% del volumen de sólidos.

La fuerza de atracción de Van der Waals es la causa de la adhesión entre los productos de la hidratación y las partículas de agregado; por lo tanto, la resistencia de la zona de transición en cualquier punto, depende del volumen y del tamaño de los huecos presentes.

3.3 PERMEABILIDAD AL AGUA

La permeabilidad del CCR es fuertemente dependiente de los vacíos en la masa compactada, junto con la porosidad de la matriz de mortero, y por tanto es casi totalmente controlada por el proporcionamiento de la mezcla, el método de colocación, y el grado de compactación. El CCR será relativamente impermeable cuando la mezcla contiene suficiente pasta y mortero, una adecuada distribución de partículas finas que minimizan el sistema de vacíos, no se presenta segregación del agregado grueso y es compactada totalmente. En general, una masa de CCR sin juntas proporcionada con suficiente pasta tendrá valores de permeabilidad similares a la masa de concreto convencional. Valores típicos de la permeabilidad variarán de 0.15 a 15×10^{-9} cm/seg. Las mezclas con altos contenidos de cementante tienden a tener permeabilidad más baja que las mezclas con bajos contenidos de cementante.

Si se presentan filtraciones en las presas de CCR, estas usualmente tienen lugar principalmente en las juntas horizontales entre capas y no a través de la masa de concreto compactado y sin juntas. Si las filtraciones se presentan a lo largo de juntas horizontales entre capas, esto también indica una reducción en la resistencia a cortante y a tensión en esta localización.

La permeabilidad de un material se define por la facilidad con que puede ser penetrado por un fluido, ya sea líquido o gaseoso, bajo determinadas condición de aplicación. En el caso del concreto interesa principalmente su permeabilidad al agua y al aire, dado que son los fluidos con los que de ordinario tiene contacto. La permeabilidad al aire es importante porque favorece al fenómeno de carbonatación, con sus consiguientes efectos perjudiciales sobre la contracción del concreto y sobre la corrosión del acero de refuerzo. La permeabilidad al agua es obviamente un asunto de gran interés en las estructuras hidráulicas, pero también lo es en todo tipo de estructuras por su contribución al riesgo de corrosión del acero de refuerzo, y al deterioro prematuro del concreto en general.

Para evaluar la permeabilidad del concreto al agua, es común utilizar especímenes cúbicos o cilíndricos que se someten a presión hidráulica en una de sus caras, de modo que al establecerse a través de ellos un flujo con régimen estable, resulta aplicable la conocida ley de Darcy:

$$V=Ki \text{ o bien } Q=KiA$$

En donde V es la velocidad del flujo por unidad de área, que también puede expresarse como el gasto Q que pasa a través de toda el área A expuesta al agua; i es el gradiente de presión hidráulica; y k es el llamado coeficiente de permeabilidad, el cual depende básicamente de la homogeneidad y porosidad del concreto, y se utiliza para caracterizarlo en este aspecto.

Debe considerarse que en el medio local no se dispone de un procedimiento sancionado (NMX) o de uso alternativo aprobado (ASTM).

La permeabilidad del concreto depende de la permeabilidad individual de sus componentes. El modelo más simple y aceptado para representar la composición del concreto convencional, consiste en considerarlo formado por partículas de roca embebida en una matriz constituida por la pasta de cemento hidratada. De modo, la permeabilidad

de las rocas que constituyen los agregados y la permeabilidad de la pasta endurecida son dos elementos esenciales de la permeabilidad del concreto, pero existe un tercer elemento complementario e indispensable representado por la homogeneidad y la compacidad de la masa de concreto integrada, como resulta finalmente colocada en la estructura.

3.4 DEFORMACIÓN DIFERIDA

El flujo plástico o deformación diferida es el incremento de deformación del concreto con el tiempo debida a una carga sostenida, es decir, es el incremento de la deformación bajo un esfuerzo constante e ininterrumpido; incluye deformaciones relacionadas con el esfuerzo y excluye las causadas por contracción por secado, y/o deformaciones térmicas; por ello, el flujo plástico es considerado a partir de la deformación elástica inicial, la cual depende del esfuerzo aplicado y del módulo de elasticidad a la edad de carga, ver fig.3.13.



Fig. 3.13 Marcos para flujo plástico en la cámara seca

Este ensaye se realiza con base en la norma ASTM C-512 Método de ensayo para determinar la fluencia del concreto a compresión (Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression).

La contracción por secado es un factor aditivo en las deformaciones globales del concreto en servicio a través del tiempo. La evolución del flujo plástico en un espécimen de concreto presenta tres etapas:

1. Condición de precarga
2. Condición de carga aplicada y sostenida
3. Condición de retiro de carga y descarga permanente



Fig. 3.14 Mediciones empleando el deformimetro (equipo whitmore)

Valores de deformación diferida típicos para mezclas de CCR se presentan en la tabla 3.7. Generalmente son deseables propiedades de deformación diferidas más altas para relevar el incremento de esfuerzos y deformaciones debido a la restricción de la cimentación y a las cargas exteriores.

Tabla 3.7. Propiedades de deformación unitaria y deformación diferida de algunas mezclas de laboratorio de CCR

Presa/ Proyecto	Cemento, kg/m ³	Puzolana, kg/m ³	a/mc	Edad de carga, días	Coeficiente de deformación diferida		Resistencia a compresión, MPa	Módulos de elasticidad, GPa
					10 ⁻⁶ /kPa	F(K)		
Concepción	90	0	1.20	7	0.20	0.12	4	—
	90	0	1.20	28	0.11	0.08	7	10
	90	0	1.20	90	0.07	0.03	9	14
Tinner Stillwater	108	125	0.47	28	0.15	0.11	15	7
	77	170	0.43	28	0.10	0.04	14	10
	77	10	0.43	180	0.08	0.01	29	12
	72	160	0.45	180	0.09	0.02	22	9
	108	125	0.47	365	0.08	0.02	34	12
	72	160	0.45	365	0.08	0.01	34	11
	108	125	0.47	90	0.12	0.06	24	9
	77	170	0.43	365	0.08	0.02	35	13
	108	125	0.47	180	0.10	0.03	28	11
Willow Creek	47	19	1.61	7	0.29	0.20	4	8
	104	47	0.73	7	0.08	0.08	8	17
	47	19	1.61	28	0.16	0.11	8	11
	47	19	1.61	90	0.08	—	12	13
	104	0	1.06	7	0.07	0.08	7	15
	104	0	1.06	28	0.05	0.05	13	18
Zintel Canvon	59	0	2.00	28	0.11	0.08	4	11
	59	0	2.00	90	0.07	—	8	15
	59	0	2.00	365	0.06	—	11	18
	119	0	1.00	7	0.11	0.05	7	11
	119	0	1.00	28	0.07	0.03	11	16
	119	0	1.00	90	0.06	—	15	17
	119	0	1.00	365	0.04	—	21	23
	59	0	2.00	7	0.21	0.09	2	5

3.5 CAMBIOS POR SECADO

La contracción por secado está gobernada primordialmente por el contenido de agua de la mezcla y, en menor medida, por el grado de resistencia del agregado. Comparado con el concreto masivo convencional, el cambio de volumen debido a la contracción por secado en el CCR es similar o menor debido al reducido contenido de agua.

Este fenómeno que experimenta el concreto a través del tiempo se traduce en expansiones (incremento del volumen por absorción de agua, indica un movimiento de agua de fuera a dentro de la estructura del gel en el concreto) o contracciones (causadas por la pérdida de agua por evaporación, por la hidratación del cemento, o por carbonatación).

La determinación de esta propiedad del concreto está reglamentada por la norma ASTM C-157 Método de ensayo para determinar el cambio de longitud del mortero y del concreto de cemento hidráulico endurecido (Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete) y la importancia de ésta determinación se debe a que en los elementos estructurales de concreto restringidos, al expandirse y contraerse el concreto se producen esfuerzos de compresión y tensión, respectivamente.

3.6 PESO UNITARIO

La falta de aire incluido y el bajo contenido de agua de muchas mezclas de CCR resultan en una densidad ligeramente más alta cuando se compara con la del concreto masivo convencional con aire incluido hecho con los mismos agregados. El CCR totalmente compactado tiene un bajo contenido de aire (generalmente de 0.5 a 2%) y un bajo contenido de agua. Más sólidos ocupan un volumen unitario y el incremento en la densidad es aproximadamente de 1 a 3% mayor a la del concreto convencional y ordinariamente excede los 2400kg/m³.

3.7 CONCLUSIONES

- En este capítulo se mencionan las propiedades físicas del concreto compactado con rodillo en el estado fresco y endurecido, determinadas de sus correspondientes pruebas experimentales.
- Los aspectos a destacar del CCR son:
- La trabajabilidad en el CCR se mide con la mesa vibratoria Vebe, generalmente en un rango de 10 a 45 seg.
- Es importante seleccionar bien la graduación de los agregados para evitar la segregación, y obtener mezclas de CCR con mayores pesos volumétricos.
- La resistencia a compresión del CCR es función de la relación agua-material cementante (a/mc) solamente para mezclas con tiempos Vebe inferiores a 45 seg, pero usualmente en el intervalo de 15 a 20 seg.
- La resistencia a compresión de mezclas de CCR no consolidadas totalmente, se diseñan por la relación Humedad-Densidad. Hay un contenido óptimo de humedad que produce una densidad seca máxima para un cierto esfuerzo comparable.
- La resistencia a compresión en proyectos de presas de CCR a variado de 70 kg/cm² a 280 kg/cm² a la edad de un año.
- La resistencia al cortante diametral en el CCR representa aproximadamente el 10% de la resistencia a compresión.
- La resistencia a flexión en el CCR varía entre el 16% a 39% de su resistencia a compresión.
- Los módulos de elasticidad del CCR varían entre 7.38 a 20.06 GPa a los 28 días de edad.
- La relación de Poisson en el CCR varía aprox. 0.17 a 0.22 con baja resistencia a compresión.
- La permeabilidad en las presas, generalmente se produce en las juntas de las capas. Se han obtenidos resultados típicos que varían de 0.15 a 15x10⁻⁹ cm/seg

3.8 BIBLOGRAFIA

Comisión Federal de Electricidad, Manual de tecnología del concreto sección 1

Comisión Federal de Electricidad, Manual de tecnología del concreto sección 2

Comisión Federal de Electricidad, Manual de tecnología del concreto sección 3

Comisión Federal de Electricidad, Manual de tecnología del concreto sección 4

Tecnología del concreto, IMCYC.

Future Trend in Roller Compacted Concrete Dam Construction
By M.R.H Dunstan

Roller Compacted Mass Concrete
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-89

Roller Compacted Mass Concrete
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-11

Roller Compacted Concrete for Dams
State of the Art
By Ernest K. Shrader

Fracture and Material Properties of Roller Compacted Concrete
By Ernest K. Shrader

CAPITULO 4

4 MATERIALES Y PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CCR EMPLEADOS EN EL ESTUDIO

MATERIALES

En esta sección de materiales se presentan las características físico-químicas, mecánicas y recomendaciones de uso de los cementos ocupados en las pruebas.

Asimismo las propiedades físicas de la grava caliza y la arena andesítica, como son densidad, absorción, granulometría, módulo de finura, tamaño máximo, etc.

4.1.1 CEMENTANTES

En la investigación se utilizaron los cementos CPO 30 R y CPP 30R RS, la composición de los cementos se presenta en la siguiente tabla 4.1.

TABLA 4.1 Componentes del cemento según la NMX-C-414-ONNCCE-1999

Tipo	Denominación	Componentes Principales					Minoritarios (2)
		Clinker		Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolanicos (3)	Humo de silice	
		Portland + Yeso	Caliza				
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	X	X	X	X	0-5
CPP	Cemento Puzolanico	50-94	X	6-50	X	X	0-5

Nota.-

- (1) Los valores de la tabla representan el % en masa
- (2) Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales, a menos que estén incluidos ya como tales en el cemento.
- (3) Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.

En la tabla 4.2 se clasifican la resistencia mecánica a la compresión, los tiempos de fraguado y la estabilidad de volumen en autoclave de los cementos ocupados en la investigación. El cemento CPP 30R RS Tiene una característica especial, de acuerdo a lo indicado en la tabla 4.3

Tabla 4.2 Especificaciones mecánicas y físicas según la NMX-C-414-ONNCCE-1999

Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm ²)			Tiempo de fraguado (min)		Estabilidad de volumen en autoclave (%)	
	3 días	28 días		Inicial	Final	Expansión	Contracción
	Mínimo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo		
30	-	30	50	45	600	0.8	0.2
30 R	20	30	50	45	600	0.8	0.2

Tabla 4.3 Especificación de los cementos con característica RS según la NMX-C-414-ONNCE-1999

Nomenclatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos (máx %)		Expansión por la reacción álcali agregado (máx %)		Calor de hidratación (máx) KJ/Kg (Kcal/Kg)		Blancura (min. %)
		6 meses	1 año	14 días	56 días	7 días	28 días	
RS	Resistente a los sulfatos	0.05	0.1					

4.1.1.1 CEMENTO PORTLAND ORDINARIO (NMX-414-ONNCE-1999)

Es el cemento producido a base de la molienda de clinker Pórtland y usualmente sulfato de calcio. En condiciones comparables de resistencia mecánica el Cemento Pórtland Ordinario desprende mayor calor de hidratación y es más sensible a los ataques químicos por medios ácidos y salinos (en particular, por sulfatos). No obstante, este cemento puede ostentar, en combinación con puzolanas, características especiales de bajo calor de hidratación y de resistencia a los sulfatos.

El Cemento Pórtland Ordinario es especialmente apto para la fabricación de concretos de altas resistencias, estructuras prefabricadas, concreto presforzado, etc. En la tabla 4.4 se presenta las recomendaciones del Cemento Pórtland Ordinario.

Tabla 4.4 Recomendaciones del Cemento Pórtland Ordinario según la NMX-C-414-ONNCE-1999

Tipo de cemento	Clase resistente	Utilizable para:	No recomendable, salvo precauciones especiales, para:	Precauciones:
CPO	30 y 30R	Obras de concreto armado en las que se requiere un endurecimiento más rápido de lo normal. Obras o elementos de concreto pretensado. Prefabricación, incluso con tratamientos higrotérmicos.	Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos. Obras y piezas de concreto armado, de mediano o de gran volumen o espesor, y estructuras fácilmente fisurables por retracción, tanto plástica como térmica e hidráulica.	Cuidar el almacenamiento, tratando de que no se prolongue más de dos meses. Cuidar la dosificación (en peso), el amasado y, especialmente, el curado. Tomar las medidas necesarias para evitar fisuraciones por retracción, particularmente durante las primeras horas (retracción plástica), y en caso de piezas y elementos voluminosos, o de pequeño espesor.

4.1.1.2 CEMENTO PORTLAND PUZOLANICO (NMX-414-ONNCE-1999)

El Cemento Pórtland Puzolánico es idóneo para estructuras donde se presenta ataque ácido moderado, donde se emplean agregados potencialmente reactivos con los álcalis, o se requiera reducido calor de hidratación. Se puede emplear en tratamientos hidrotérmicos del concreto, bien con vapor de presión atmosférica o, mejor todavía, con vapor a presión en autoclave.

El Cemento Pórtland Puzolánico a edades cortas, genera calores de hidratación inferiores a los del cementos CPO-BCH.

Estos cementos son idóneos para obras de concreto en contacto con aguas moderadamente agresivas de cualquier naturaleza, pero en particular puras, carbónicas y ligeramente ácidas. Son así mismo, aptos para concretos en grandes masas en que interese evitar una gran elevación de temperatura, y con ello la retracción y fisuración de origen térmico. Por ambas circunstancias son especialmente indicados para concreto en presas y cimentaciones masivas. No son en cambio, los más adecuados para concreto pretensados. En la tabla 4.5 se presenta las recomendaciones del Cemento Pórtland Ordinario.

Tabla 4.5 Recomendaciones del Cemento Pórtland Puzolánico según la NMX-C-414-ONNCE-1999

Tipo de cemento	Clase resistente	Utilizable para:	No recomendable, salvo precauciones especiales, para:	Precauciones:
CPP	30, 30R, 40 y 40R	Obras de concreto en masa o armado que toleren un moderado calor de hidratación. Obras de concreto en masa o armado en ambientes ligeramente agresivos por aguas puras, carbonicas o con débil acidez mineral. Obras de concreto en masa o armado con agregados sospechosos de reactividad frente a álcalis. Obras de gran impermeabilidad, con dosificaciones adecuadas. Prefabricación con tratamiento hidrotérmico o higrotérmico. Obras de concreto pretensado.	Fabricación de concreto en tiempo de heladas, obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos.	Las normales en la dosificación y en el almacenamiento, tratando de que no se prolongue más de tres meses. Curar adecuada y prolongadamente, en especial en climas secos y fríos, evitando desecaciones durante el primer período de endurecimiento, en climas cálidos y secos.

4.1.2 AGREGADOS

Los agregados pétreos empleados en el estudio son agregado grueso calizo y agregado fino andesítico. Con el objeto de determinar las propiedades físicas de los agregados pétreos requeridos en el proporcionamiento de las mezclas, se le realizaron ensayos de laboratorio tales como: granulometría, densidad, absorción, peso volumétrico seco suelto y compacto.

4.1.2.1 AGREGADOS FINOS

Como se mencionó anteriormente, el agregado fino es de origen andesítico del banco de mina "La Lupita" en el Estado de México. . La norma ASTM C-33, Especificación Estandarizada para Agregados del Concreto (Standard Specification for Concrete Aggregates), específica que:

- ⊗ El agregado fino de la muestra retenido entre cualquiera de dos tamices consecutivos no debe contener más de 45% del material.
- ⊗ El módulo de finura debe ser mayor de 2.3 y menor de 3.1, y no debe variar más de 0.2 del valor típico de la fuente del agregado.
- ⊗ El material más fino que pasa la malla #200 debe ser como máximo el 5% del total, para el caso de concretos no expuestos a la abrasión.

En la tabla 4.6 se presenta las propiedades físicas de la arena andesítica.

Tabla 4.6 Propiedades físicas de la arena andesítica, determinadas experimentalmente.

Propiedad	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Modulo de finura	-	2.64	2.61		2.62
Densidad seca	g/cm ³	2.22	2.23	2.23	2.23
Densidad saturada	g/cm ³	2.38	2.39	2.38	2.38
Absorción	%	7.06%	6.95%	6.59%	6.87%
Pasa malla #200	%	17.94%	19.22%	18.58%	18.58%
P.V.S.S	Kg/m ³	1529	1558	1527	1538
P.V.S.C	Kg/m ³	1654	1672	1670	1665

Cabe mencionar que el porcentaje de finos excedía el 5% con 18.58% en promedio de las muestras empleadas para las mezclas. El exceso de finos en la arena tendrá repercusión en el consumo de agua requerido, pero no se cambiaron sus características debido a que así se emplea a nivel industrial, además, los finos ayudan a incrementar la cohesión de las mezclas y a mejorar la trabajabilidad en mezclas con un bajo consumo de cementantes. La arena utilizada no cumple con los límites de curva granulométrica recomendados por la norma ASTM C33, ver fig. 4.1.

La misma norma ASTM C33 admite que pueden emplearse agregados que no cumplan con los requerimientos, si se demuestra que con ellos se obtienen concretos que satisfacen las especificaciones del proyecto.

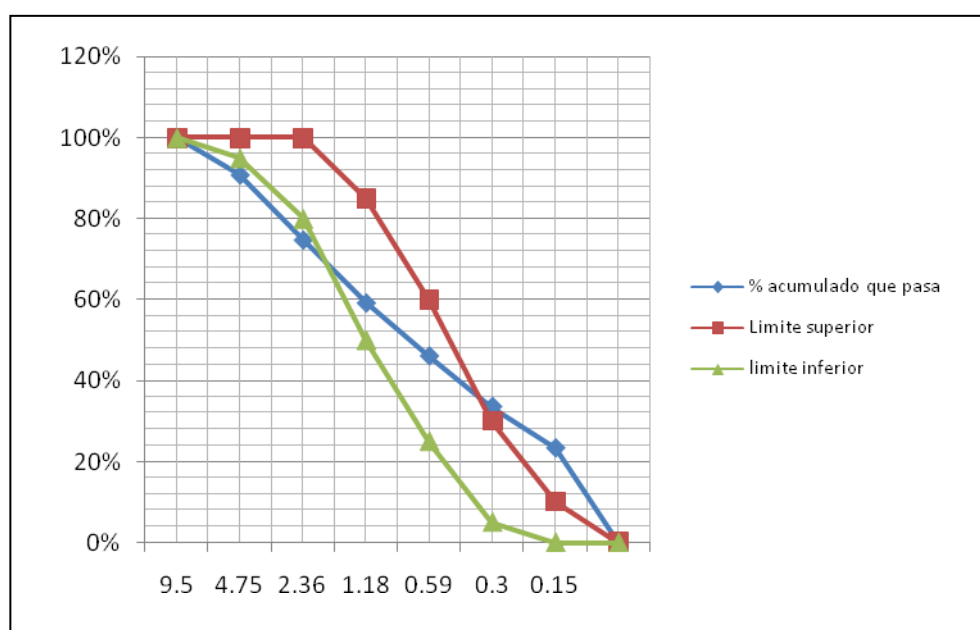


Fig. 4.1 Curva granulométrica de la arena andesítica.

4.1.2.2 AGREGADOS GRUESO

Se utilizó agregado grueso calizo de la mina "San Carlos" en Morelos. Las características físicas de la grava caliza se presentan en la tabla 4.6 y la fig. 4.2.

Tabla 4.6 Propiedades físicas del agregado calizo

Propiedad	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Tamaño máximo	Pulg	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"
Densidad seca	g/cm ³	2.67	2.69	2.68	2.68
Densidad saturada	g/cm ³	2.68	2.70	2.69	2.69
Absorción	%	0.48%	0.46%	0.44%	0.46%
P.V.S.S	Kg/m ³	1417	1418	1422	1,419
P.V.S.C	Kg/m ³	1513	1511	1514	1,512

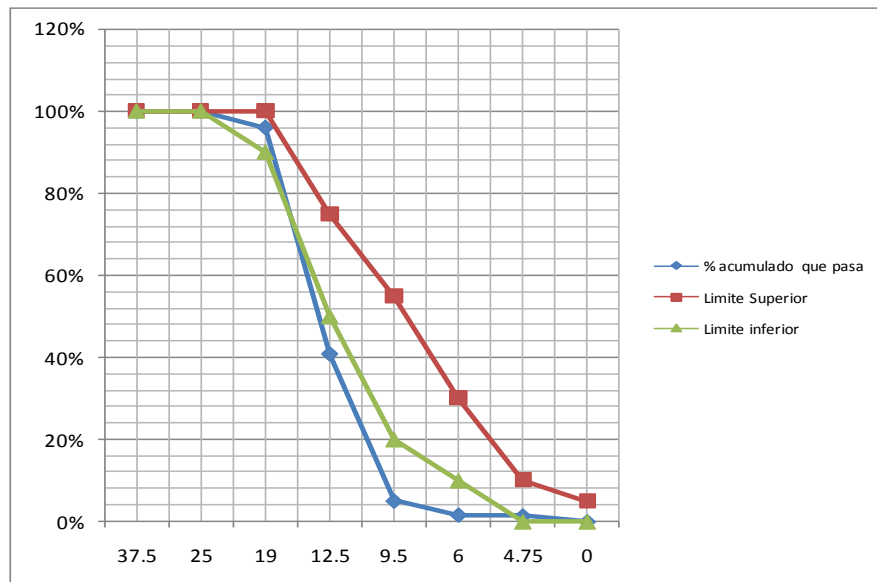


Fig. 4.2 Curva granulométrica de la grava caliza

Como se puede observar en las curvas granulométricas, estas gravas tampoco cumplen con la recomendación de la norma ASTM-C33, pero esto no representa un problema para el objetivo de la investigación, ya que las mezclas que se comparan utilizan los mismos agregados y son estos los que se utilizan en la industria de la construcción.

4.1.3 AGUA

En la fabricación del concreto compactado con rodillo (CCR) se utilizó agua potable procedente del sistema de abastecimiento del campus UNAM.

4.1.4 ADITIVOS

En esta investigación no se utilizaron aditivos dado que no estaba en el alcance. Pero cabe mencionar que los aditivos utilizados en el CCR son los reductores de agua.

4.2 PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CCR

En esta sección se presenta el procedimiento utilizado para el proporcionamiento de las mezclas, que sirvieron para fabricar los especímenes en el laboratorio.

Los métodos utilizados para el proporcionamiento de los materiales son:

- El método de mínimos vacíos
- Proporcionamiento de mezclas para alcanzar los límites especificados de consistencia de acuerdo con el procedimiento descrito en el ACI 207.5R-89.

Las mezclas así diseñadas deberán tener las siguientes características:

- Trabajabilidad aceptable del concreto en estado fresco para soportar el peso de rodillos vibratorios.
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido.
- Economía, debido que es empleado en presas de gravedad.

4.2.1 GENERALIDADES

El objetivo principal del proporcionamiento de una mezcla de concreto es seleccionar los materiales adecuados entre los disponibles y determinar la combinación de ellos para alcanzar características específicas mínimas en el comportamiento del concreto.

Las consideraciones de costo, trabajabilidad, resistencia y durabilidad del concreto son importantes, de acuerdo con lo que se menciona a continuación:

- **Costo.-** Esto refleja si un material está disponible en dos o más fuentes y existe una diferencia significativa en el precio, la fuente menos costosa de abastecimiento es la seleccionada. Es importante respecto al agregado, ya que ocupa del 66% al 75% del volumen del concreto, y al cemento, por ser el material de mayor costo.
- **Trabajabilidad.-** Determinará la facilidad con la que una mezcla de concreto puede ser manejada sin que tenga segregación dañina.
- **Resistencia y Durabilidad.-** Puesto que la durabilidad del concreto está controlada principalmente por la resistencia, no es difícil comprender porque hay una relación directa entre ellas.

4.2.2 SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA

Se determinan las características deseadas considerando el uso que se propone dar al concreto, las condiciones de exposición, el tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto requeridas para la estructura.

Por lo que concierne a este estudio, el concreto diseñado es para uso en presas de gravedad, por lo que es importante que tenga las siguientes características:

- Resistencia a 28 días de 150 a 300 kg/cm².
- Consumo de cemento de 60 a 300 kg/m³.
- Revenimiento 0 cm.
- Consistencia seca, pero sin segregación.
- Capacidad para soportar equipo compactador vibratorio de 6 ton.
- Pesos volumétricos entre 2300 a 2400 kg/m³.

4.2.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE ACUERDO CON EL CONTENIDO DE MINIMOS VACIOS

Este método se basa en las propiedades físicas de los materiales que intervendrán en el CCR para lograr su mejor aprovechamiento. En el laboratorio se trabaja con los agregados, para determinar su curva granulométrica y verificar si esta o no dentro de los límites que establece la norma ASTM C33.

Para asegurar un buen proporcionamiento se deben tomar en cuenta las propiedades de los agregados:

- Densidad
- Humedad y absorción (%)
- Peso volumétrico seco suelto y compactado
- Módulo de finura
- TMA de la grava
- La curva granulométrica debe estar dentro los rangos especificados.
- Obtener el máximo peso volumétrico seco compactado (PVSC) de la relación grava/arena (G/A) .

4.2.3.1 DETERMINACIÓN DEL PVSC MÁXIMO EN FUNCIÓN DE LAS RELACIONES GRAVA-ARENA (G/A).

Se realiza una gráfica de las relaciones (G/A) contra peso volumétrico seco compactado para determinar su PVSC máximo y con esto la óptima relación (G/A) que da la mejor densidad en función de los pesos volumétricos, ver tabla 4.7 y fig. 4.3.

Tabla 4.7 Valores en la determinación de la relación grava-arena óptima

Relación G/A	Peso suelto de la arena (gr)	Peso suelto de la grava (gr)	Grava + Arena (gr)	% Grava	% Arena	% Peso Grava + Arena	Peso Volumétrico (Kg/m ³)
0.374	2645.50	988.65	3634.15	27%	73%	100%	1823.63
0.678	2090.67	1417.30	3507.97	40%	60%	100%	1853.02
0.933	1841.45	1718.30	3559.75	48%	52%	100%	1872.27
1.200	1610.19	1932.39	3542.58	55%	45%	100%	1873.75
1.248	1572.83	1962.50	3535.33	56%	44%	100%	1873.10
2.363	1036.33	2448.87	3485.20	70%	30%	100%	1821.35

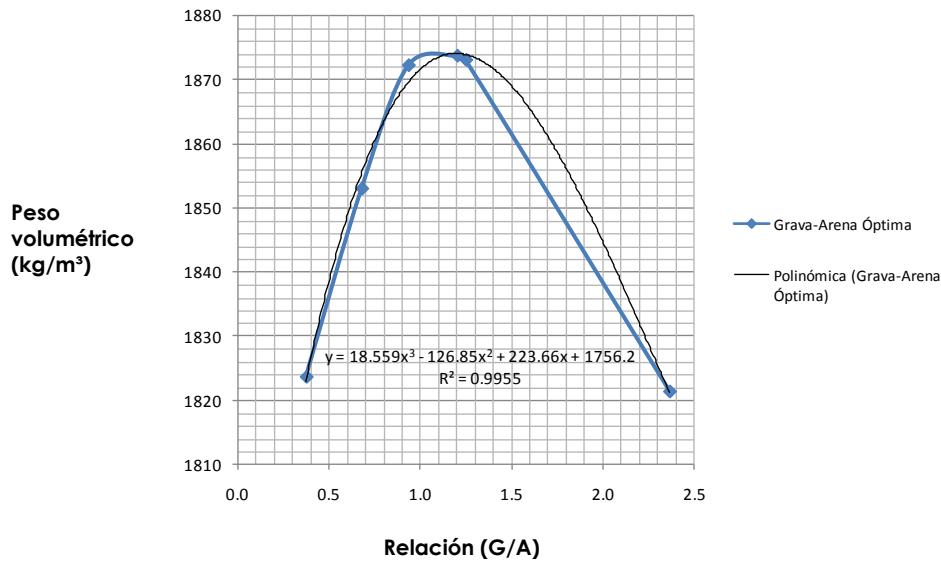


Fig. 4.3 Relación grava-arena óptima

Observando la gráfica y utilizando la fórmula de la misma, se determinó que la relación grava-arena óptima es $G/A=1.2$ para una proporción de grava de 55% y 45 % de arena en peso.

4.2.4 MÉTODO DE CONTENIDO MÍNIMOS DE VACÍOS

Al considerar que el peso volumétrico compactado de la mezcla seca de grava y arena, representa el contenido en peso de ambos agregados en la unidad de volumen de concreto, es válido admitir que los espacios vacíos corresponden al espacio unitario disponible para ser ocupado por la pasta de cemento. De esta manera, si se consideran los datos de los agregados, fig. 4.3, los componentes de una primera mezcla de concreto de prueba con el máximo contenido de agregados, es decir el mínimo de pasta, se puede determinar como sigue:

$$\begin{aligned}
 \text{PV máximo} &= 1873.75 \text{ Kg/m}^3 \text{ (55\% grava y 45\% arena)} \\
 \text{P grava} &= 1873.75 \times 0.55 = 1030.56 \text{ Kg/m}^3 \\
 \text{P arena} &= 1873.75 \times 0.45 = 843.19 \text{ Kg/m}^3 \\
 \text{Vol. Abs. Grava} &= 1030.56 / 2.68 = 384.54 \text{ l/m}^3 \\
 \text{Vol. Abs. Arena} &= 843.19 / 2.23 = 378.11 \text{ l/m}^3 \\
 \text{Vol. Abs. Grava + arena} &= \dots\dots\dots = 762.65 \text{ l/m}^3 \\
 \text{Vol. Abs. Pasta de cemento} &= 1000 - 762.65 = 237.35 \text{ l/m}^3
 \end{aligned}$$

Para definir las cantidades de cemento y agua que son necesarias para producir este volumen de pasta, es necesario establecer la relación agua/cemento requerida (ver fig. 4.4) y estimar el porcentaje del volumen de concreto que le correspondería ser ocupado por el aire natural atrapado o por el aire intencionalmente incluido, según el caso, para lo cual son aplicables los datos de la tabla 4.8

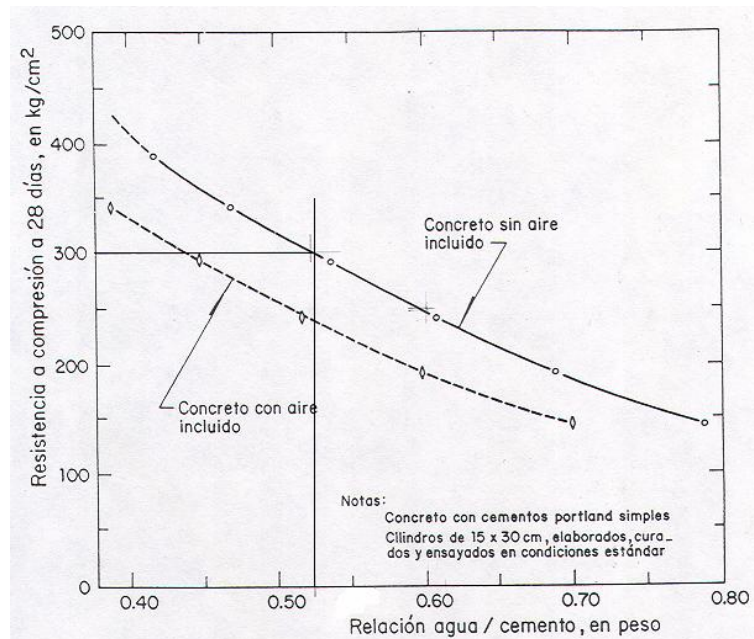


Fig. 4.4 Curva resistencia a compresión predicable en el concreto a 28 días de edad, de acuerdo con la relación agua/cemento en el ACI 211.1.

Tabla 4.8 Contenidos de aire natural atrapado y aire incluido intencionalmente, según el tamaño máximo de agregado en el ACI 211.1.

Tamaño máximo	Contenido unitario de aire, l/m ³			
	Concreto sin inclusión de aire	Concreto con inclusor de aire		
		Exposición benigna	Exposición moderado	Exposición severa
10	30	45	60	75
13	25	40	55	70
20	20	35	50	60
25	15	30	45	60
38	10	25	45	55
51	5	20	40	50
76	3	15	35	45
152	2	10	30	40

Suponiendo un tamaño máximo de grava igual a 20 mm (3/4") en un concreto sin aire incluido intencionalmente, puede estimarse un contenido de aire natural atrapado igual a 20 l/m³. Consecuentemente, el volumen que corresponde exclusivamente al agua y al cemento en el contenido unitario de pasta, es:

$$237.35 - 20 = 217.35 \text{ l/m}^3$$

En este ejemplo se requiere obtener una resistencia a compresión promedio a 28 días de 300 kg/cm², en un concreto sin requisitos específico de durabilidad, la relación

agua/cemento (en peso) necesaria para ello es igual 0.525, según la fig. 4.4 al convertir a volumen esta relación se obtiene:

$$\text{Agua/cemento (Vol. Abs.)} = \frac{0.525 \times 3.15}{1.00} = 1.65$$

(Densidades: Cemento= 3.15, Agua= 1.00)

Entonces, los volúmenes absolutos de cemento y agua en el volumen considerando de pasta, son:

$$\begin{aligned} \text{Vol. Abs. Cemento} &= 217.35 / (1 + 1.65) = 82.02 \text{ l/m}^3 \\ \text{Volumen de agua} &= 217.35 - 82.02 = 135.33 \text{ l/m}^3 \end{aligned}$$

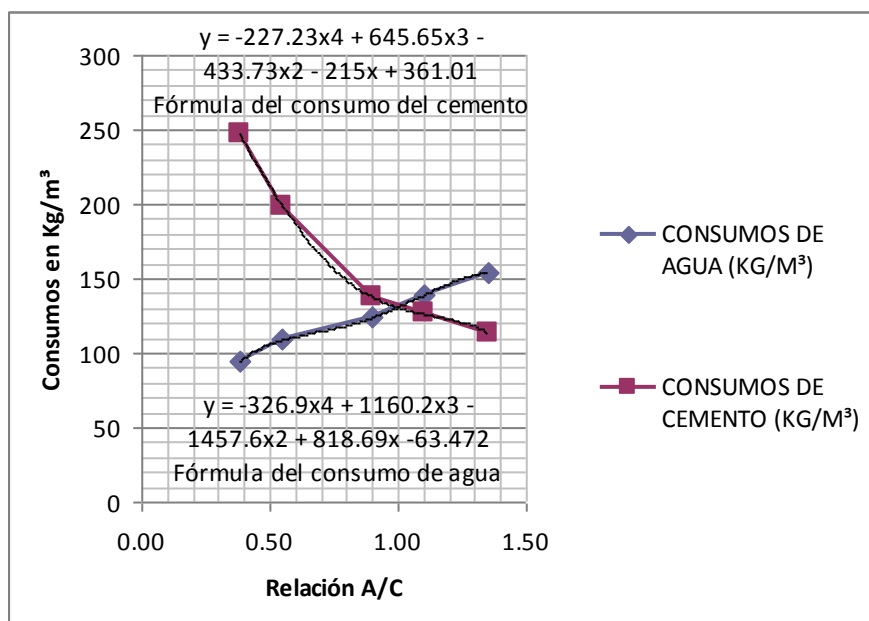
Y por consiguiente, las cantidades en peso de cemento y agua que integran dicho volumen de pasta, resultan:

$$\begin{aligned} \text{Peso de cemento} &= 82.02 \times 3.15 = 258.36 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Peso de agua} &= 135.33 \times 1.00 = 135.33 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Finalmente, las cantidades de componentes para integrar la primera mezcla de concreto de prueba, establecida por este procedimiento, resultan como sigue:

Componentes	Cantidades por m ³ de concreto	
	En peso (kg/m ³)	En vol. Abs. (l/m ³)
Cemento	258.36	82.02
Arena (M.F. =2.62)	843.19	378.11
Grava (T.M.A. = 20 mm)	1030.56	384.54
Agua neta mezclado	135.33	135.33
Aire atrapado	-----	<u>20.00</u>
Sumas	2267.44	1000.00

Los concretos compactados con rodillos en presas tienen un intervalo variado de consumo de cemento en un rango de 60 kg/m³ hasta más de 300 Kg/m³. Tomando esas consideraciones se propusieron las siguientes relaciones a/c de : 1.35, 1.10, 0.90, 0.55, 0.38, para estar dentro de los rangos de consumo de cemento en un CCR, ver fig. 4.5



4.2.5 PRC Fig. 4.5 Relación de consumos de cemento y agua para un metro cúbico ESPECIFICADOS DE CONSISTENCIA.

Este método de proporcionamiento busca la consistencia adecuada que pueda soportar el extendido de un bulldozer y la compactación de un rodillo vibratorio. Se determinó en el laboratorio la consistencia de las mezclas midiendo el tiempo VeBe en segundos, siguiendo el procedimiento descrito en el ASTM C1170. Para todos los casos se buscó que el tiempo VeBe estuviera entre 5 y 32 seg valores correspondiente a mezclas duras, ver fig. 4.6.

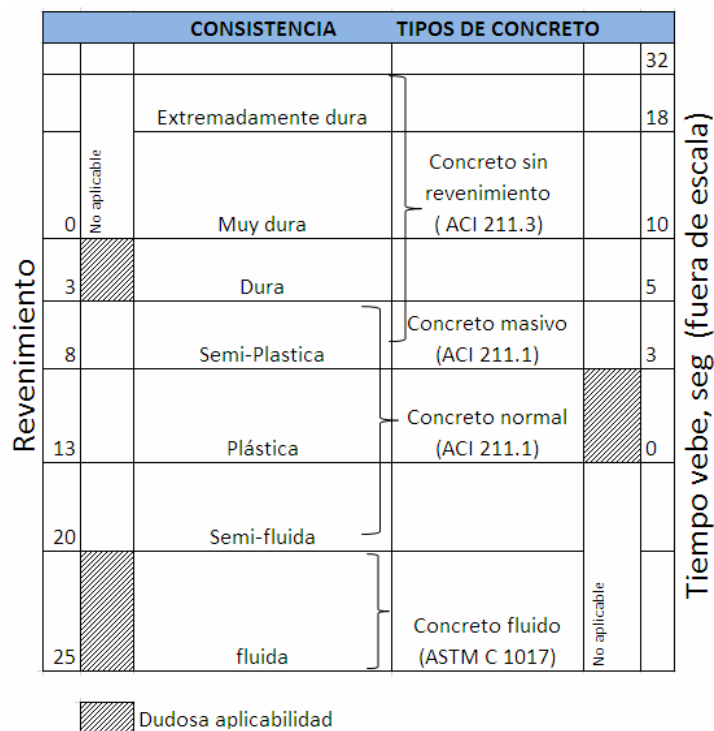


Fig. 4.6 Gráfica de consistencia del concreto

Existen dos procedimientos para realizar la prueba:

1. El procedimiento "A" utiliza un contrapeso de 22.7 kg colocado sobre el espécimen, ver fig.4.7. Éste procedimiento se utilizará para concretos con consistencia dura a extremadamente dura, ó cuando la consistencia Vebe por el procedimiento B sea de 30 seg ó mayor.
2. El procedimiento "B" utiliza un contrapeso de 12.5 kg colocado sobre el espécimen. Éste procedimiento se utilizará para concretos de consistencia plástica-dura a muy dura ó cuando el tiempo VeBe en el procedimiento VeBe sea menor de 20 seg.

La consistencia VeBe es el tiempo requerido en segundos, para que una mezcla de concreto sea consolidada mediante vibraciones y un contrapeso dentro de un molde cilíndrico, ver equipo VeBe en fig. 4.8.

El procedimiento que se utilizó para la investigación fue el "A", debido a que las mezclas tenían un tiempo mayor de 30 seg.



Fig. 4.7 Contrapeso VeBe de 22.7 kg



Fig. 4.8 Equipo VeBe

En la siguiente tabla 4.9, fig. 4.9 y fig. 4.10 se muestran las pruebas preliminares para determinar el tiempo VeBe correspondiente a las mezclas de concreto convencional con sus distintas relaciones agua/cemento y su correspondiente tiempo VeBe.

Tabla 4.9 Valores de la consistencia VeBe con cemento CPO (pruebas preliminares)

No. De Mezcla	Relación A/C	Duración seg.	Peso + olla (grs)	Peso olla (grs)	Peso muestra (grs)	Volumen (ml)	Peso volumetrico (Ton/m ³)
1	1.35	2.0	34638	12730.5	21907	9267	2.364
2	1.10	3.5	34525	12730.5	21795	9267	2.352
3	0.90	17.0	34558	12730.5	21827	9267	2.355
4	0.55	42.0	34505	12730.5	21775	9267	2.350
5	0.38	136.0	33500	12730.5	20770	9267	2.241

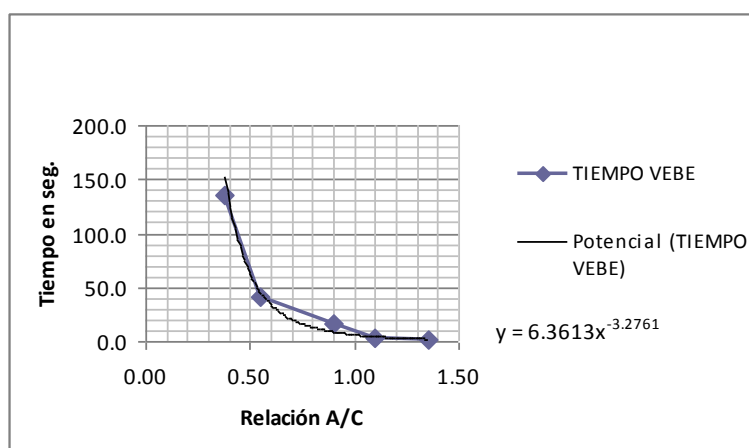


Fig. 4.9 Relación A/C y tiempo Vebe con cemento CPO (pruebas preliminares)

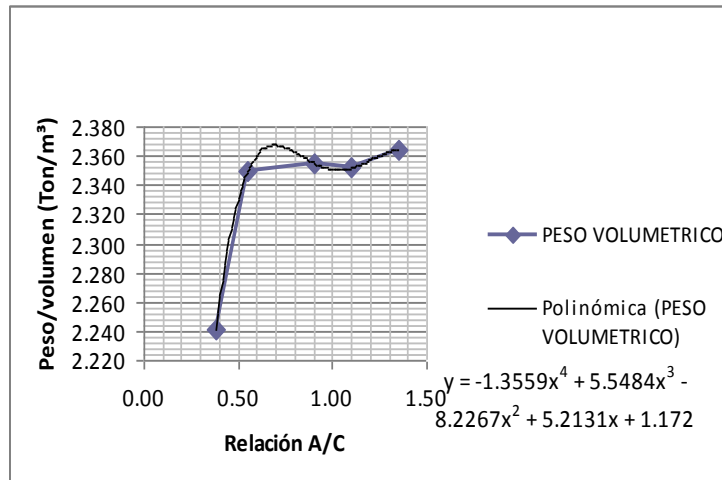


Fig. 4.10 Relación A/C y peso volumétrico con cemento CPO (pruebas preliminares)

Se puede observar que los tiempos en segundos se encuentran en el intervalo de 2 a 136 seg. El intervalo requerido para alcanzar una consistencia *dura a extremadamente dura* oscila entre 5 a 30 seg, por lo tanto, con la ecuación de tendencia del tiempo VeBe de la figura 4.9 se puede determinar las relaciones A/C que cumplan con dichos intervalos (los tiempos teóricos se presentan en la tabla 4.10).

Tabla 4.10 Tiempos VeBe teóricas calculadas

A/C X	Seg. Y
1	6
0.87	10
0.73	18
0.66	25
0.57	40

Con esta nueva relación A/C y tiempo en segundos se realizó una segunda prueba de consistencia para medir el tiempo, para confirmar la suposición teórica. Ver la tabla 4.11, la fig. 4.11 y 4.12.

Tabla 4.11 Valores de la consistencia VeBe con cemento CPO

No. De Mezcla	Relación A/C	Duración seg.	Peso + olla (grs.)	Olla (grs.)	Peso muestra (grs.)	Volumen (ml)	Peso volumétrico (Ton/m³)
1	1.00	7.0	34285	12730.5	21554.5	9267	2.326
2	0.87	10.0	34605	12730.5	21874.5	9267	2.360
3	0.73	22.0	34715	12730.5	21984.5	9267	2.372
4	0.66	31.0	34740	12730.5	22009.5	9267	2.375
5	0.57	38.5	34450	12730.5	21719.5	9267	2.344

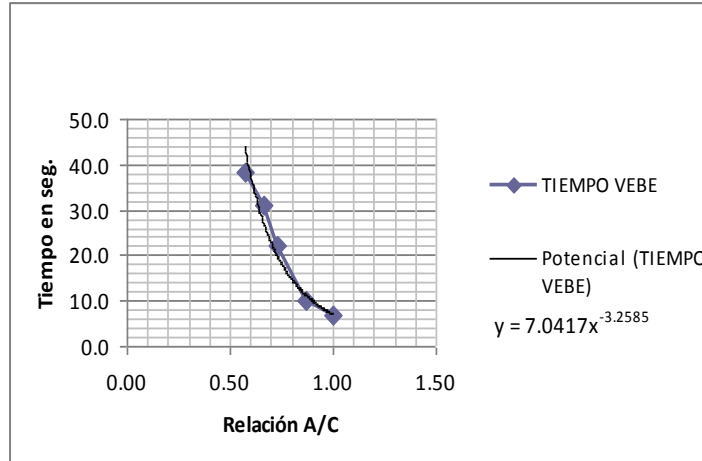


Tabla 4.11 Relación A/C y tiempo VeBe con cemento CPO

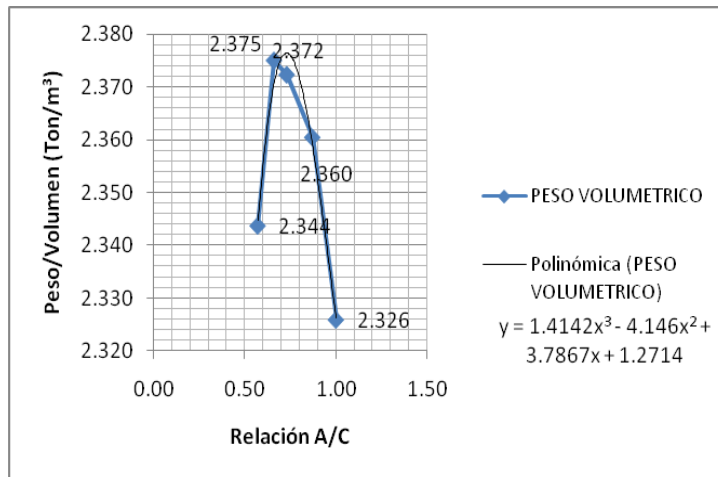


Tabla 4.12 Relación A/C y peso volumétrico con cemento CPO

Una vez confirmado la suposición teórica, se seleccionaron las siguientes relaciones agua/cemento: 1.00, 0.85, 0.70, 0.57. Se fabricarán cuatro mezclas de concreto utilizando cemento CPO 30R y se moldearán especímenes para determinar sus propiedades en estado fresco y endurecido.

Adicionalmente se realizaron cuatro pruebas de consistencia para medir el tiempo VeBe en mezclas utilizando cemento CPP 30R RS. Las relaciones agua/cemento se determinarán siguiendo el mismo procedimiento utilizado con el cemento CPO 30R. Los resultados se presentan en la tabla 4.12, la fig. 4.13 y la fig. 4.14.

Tabla 4.12 Valores de la consistencia VeBe con cemento CPP

No. De Mezcla	Relación A/C	Duración en seg.	Peso + olla (grs.)	Peso olla (grs.)	Peso muestra (grs.)	Volumen (ml)	Peso volumetrico (Ton/m³)
1	1.00	7.0	34665	12730.5	21934.5	9267	2.367
2	0.85	18.0	34750	12730.5	22019.5	9267	2.376
3	0.70	34.0	34715	12730.5	21984.5	9267	2.372
4	0.57	66.0	34475	12730.5	21744.5	9267	2.346

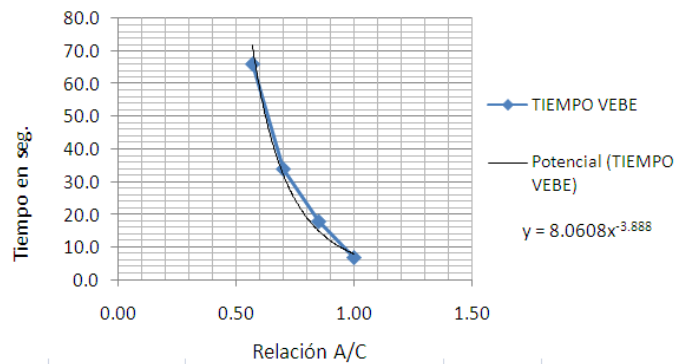


Tabla 4.13 Relación A/C y tiempo VeBe con cemento CPP

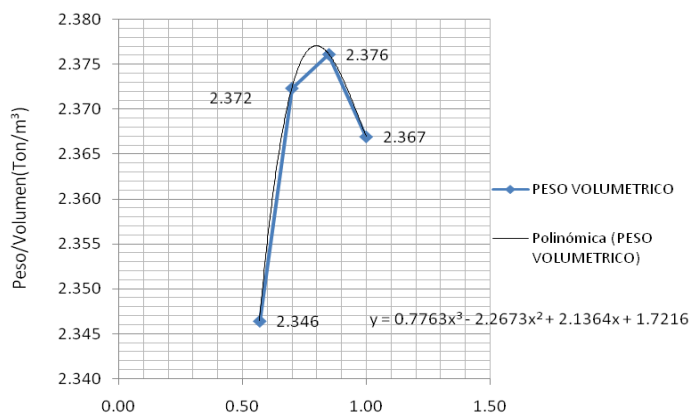


Tabla 4.14 Relación A/C y peso volumétrico con cemento CPP

Los resultados de las pruebas de consistencia con cemento CPP alcanzaron un intervalo de 7 a 66 seg. Las relaciones agua/cemento definitivas que se utilizaron en estas pruebas fueron 1.0, 0.84 y 0.68, dado, a que con ellas se obtienen consistencias de 8, 16 y 36 segundos, respectivamente.

4.3 PROCURA Y MODIFICACIÓN DE EQUIPOS DE LABORATORIO PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE CCR.

Es de gran importancia que los laboratorios cuenten con los equipos necesarios para elaborar los especímenes de CCR.

Los equipos de mayor relevancia en la elaboración de especímenes de CCR son:

- Equipo VeBe
- El compactador neumático, martillo vibratorio ó el equipo Proctor modificado.

Para la compactación de especímenes de concreto se tomaron en cuenta el equipo neumático y el martillo vibratorio. Ambos tienen que cumplir con la energía de compactación $E=27.36 \text{ kg cm/cm}^3$ que se utiliza en la Proctor modificada, la fórmula de energía de compactación es la siguiente:

$$Ee = \frac{N * n * W * h}{V}$$

donde

Ee = Energía específica (Kg.cm/cm³)

N = Número de golpes por capa

n = Número de capas del suelo

W = Peso del pisón (kg)

h = Altura de caída libre (cm)

V = Volumen de suelo compacto (cm³)

4.3.1 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL EQUIPO NEUMÁTICO

Ventajas:

- El tiempo de compactación por capa es mucho más corto que el martillo vibratorio, debido a su peso (19 a 30 kg.) y a la mayor altura de caída del pisón (10 a 15 cm).
- El equipo ya cuenta con un pisón de 15 cm de diámetro.

Limitaciones:

- Se requiere un equipo compresor con sus accesorios de adaptación.
- Fabricar extensiones de tubo de PVC de unos 15 cm diam. Interior y una altura de 50 cm para que la caída del pisón sea guiada en la compactación del cilindro.
- Se necesita fabricar nuevos moldes cilíndricos para que entre la extensión de PVC.

4.3.2 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL MARTILLO VIBRATORIO

Ventajas:

- No requiere extensiones de tubos de PVC, debido a que la carrera del martillo es muy pequeña (0.5 mm a 1 mm).
- El martillo es eléctrico, y por lo tanto, no requiere un compresor.
- La adquisición del equipo es más económica.

Limitaciones:

- Se requiere fabricar el accesorio de apisonado en un taller mecánico.
- El tiempo de compactación es más prolongado que el equipo neumático.

El martillo vibratorio fue la opción más adecuada, por la razón, que no se necesita fabricar nuevos moldes cilíndricos, comprar un compresor de aire y tubos de P.V.C. Los trabajos que se realizaron para el martillo vibratorio son la fabricación del pisón, que incluye: un vástago de acero con cuerda macho, una placa de acero redonda de 15.2 cm de diámetro, 2.54 cm de espesor y cuerda hembra; y una placa rectangular 15.2 X 20 cm, con 2.54 cm de espesor y cuerda hembra, ver fig. 4.15 y 4.16.



Fig. 4.15 Torneado de varilla corrugada para la fabricación del vástago.



Fig. 4.16 Elaboración de cuerda hembra en la placa rectangular.

4.4 ELABORACIÓN DE MEZCLAS Y ESPECIMENES DE CCR

Antes de realizar los colados definitivos para la fabricación de los especímenes de CCR, se realizaron actividades preliminares para ver la forma de trabajo, entre los que destacan:

1. Los tiempos y movimientos de compactación de tres capas en cada cilindro, ver fig. 4.17.
2. Verificación de la revolvedora de 90 lt, para ver si es la adecuada para mezclar el CCR, ver fig. 4.18.
3. La determinación del número de personas que se requieren para la elaboración de especímenes de CCR, ver 4.19.



Fig. 4.17 Compactación de capas de CCR en moldes cilíndricos.



Fig. 4.18 Mezclado de CCR en revolvedora de 90 lt.



Fig. 4.19 Elaboración de CCR

A continuación se hace una breve reseña del proceso que se siguió en la elaboración del CCR. Para cada una de las mezclas, se realizaron veintisiete cilindros y cuatro vigas, por lo que se hicieron tres revolturas para producir nueve cilindros por revoltura y una más para las cuatro vigas.

El orden en la producción de CCR es el siguiente:

- Se determina la humedad de los agregados.
- Se pesa la cantidad de cemento y agua.
- Se humedece la olla revolvedora, se mezclan los agregados, el agua y el material cementante; por espacio de 2 minutos con un reposo de 1 minuto y mezclado adicional de 3 minutos.
- Se vacía el concreto en la artesa de metal, y se quita el residuo de CCR en la revolvedora.
- Se realiza la prueba de revenimiento, contenido de aire y medición de la temperatura.
- Se toman dos cilindros (en su caso las vigas), se comienzan a compactar las capas de CCR de manera alterna y a la vez se limpia la revolvedora.
- Se enrasan los especímenes
- Y se inicia otra vez el proceso de mezclado hasta terminar la serie de especímenes.



Fig. 4.20 Vaciado de CCR en la artesa de metal.

Concluida esta fase, se limpia el área de trabajo y al día siguiente se procederá a descimbrar y llevar lo especímenes a la cámara de curado.



Fig. 4.21 Compactación de capas de CCR en moldes cilíndricos



Fig. 4.22 Compactación de capas de CCR para la fabricación de vigas

4.5 CONCLUSIÓN

En la sección de materiales se hace referencia al desarrollo de los ensayos y resultados experimentales del agregado fino y grueso.

Los aspectos a destacar del CCR se mencionan a continuación:

1. En la investigación se emplearon los cementos CPO 30R y CPP 30R RS.
2. Se especificaron los usos de los cementos
3. Los agregados pétreos empleados en el estudio son arena andesítica y grava caliza.
4. El porcentaje de finos de la arena andesítica excedía el 5%, con 18.49% en promedio de las muestras empleadas para las mezclas.
5. La granulometría de los agregados pétreos no se encontraba dentro de los límites que establece la norma ASTM C33.
6. El agua utilizada fue de la red hidráulica universitaria.
7. No se usó aditivo en la fabricación de CCR

En la sección de proporcionamiento se describió la manera en que se obtuvieron las relaciones agua/cemento para las mezclas con cemento CPO 30 R y CPP 30R RS, los procedimientos de diseño que se emplearon fueron el ACI 207.5R-89 y el método de mínimos vacíos.

Los diseños de mezclas preliminares se originaron del concreto convencional, el cambio que se buscó para llegar a un CCR fue su consistencia determinada con el tiempo veBe. Los dos tipos de cemento se utilizaron para tener una comparación entre las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, ambos ocuparon agregados calizos y andesíticos con una relación G/A=1.2 equivalente a 55% de grava y 45% de arena. En las tablas 4.13 y 4.14 se presentan las proporciones de mezclas que se realizaron.

Tabla 4.13 Proporciones de CCR con cemento CPO 30R

Mezclas	Materiales por m ³				Relación A/C
	Cemento (kg)	Arena andesítica (kg)	Grava caliza (kg)	Agua (lt)	
M1	130.9	843.2	1030.6	130.9	1.00
M2	142.5	843.2	1030.6	121.2	0.85
M3	164.1	843.2	1030.6	114.8	0.70
M4	192.9	843.2	1030.6	110.0	0.57

Tabla 4.14 Proporciones de CCR con cemento CPP 30R RS

Mezclas	Materiales por m ³				Relación A/C
	Cemento (kg)	Arena andesítica (kg)	Grava caliza (kg)	Agua (lt)	
M5	130.9	843.2	1030.6	130.9	1.00
M6	144.2	843.2	1030.6	121.2	0.84
M7	168.9	843.2	1030.6	114.8	0.68

CAPITULO 5

5 EVALUACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

Definido el alcance de los concretos compactados con rodillos (CCR) es conveniente determinar los parámetros asociados a éstos concretos fabricados con cementos Portland CPO 30R y CPP 30R RS, agregados gruesos calizos T.M.N. de 19 mm ($\frac{3}{4}$ "), arena andesítica y agua potable.

De tal manera se presentaran los resultados y análisis del CCR en su estado fresco y endurecido. Los límites superiores e inferiores de las gráficas presentadas en este capítulo corresponden a dos veces la desviación estándar.

PROPIEDADES DEL CCR EN ESTADO FRESCO

El concreto es un material progresivo de constante cambio, ya que recorre un largo proceso que va desde la selección de los materiales hasta su curado. Sin embargo, se hace necesario controlarlo, medirlo y evaluarlo mediante ensayos y normas. A continuación se mencionan algunas características importantes evaluadas al concreto fresco.

La tabla 5.1 presentan las propiedades medidas del CCR en estado fresco (Temperatura, peso volumétrico y contenido de aire).

Tabla 5.1 Propiedades en estado fresco del concreto compactado con rodillo.

Mezclas	Temperatura °C	P.V. (kg/m ³)	% Aire
M1	19	2353	1.7%
M2	21	2355	2.4%
M3	21	2377	2.1%
M4	22	2383	1.8%
Promedio	20.75	2367.25	2.0%
M5	19	2367	1.5%
M6	18	2376	1.6%
M7	17	2370	2.0%
Promedio	18	2371	1.7%

5.1.1 HOMOGENEIDAD Y UNIFORMIDAD

Esta condición de gran importancia se cumplió en las siete mezclas fabricadas en laboratorio.

5.1.2 CONSISTENCIA

Consistencia en el concreto sin revenimiento, de acuerdo con el informe ACI 211.3, en este tipo de concreto se utilizan mezclas con un revenimiento máximo de 2.5 cm; por lo tanto le corresponde ser trabajado con las consistencias identificadas como dura, muy dura y extremadamente dura.

Las pruebas de consistencia para concreto sin revenimiento son:

- El factor de compactación (previamente descrito)
- la mesa de sacudidas de Thaulow, y
- la mesa vibratoria Vebe



Fig. 5.1 Revenimiento cero del CCR.

En esta investigación se utilizó la mesa vibratoria Vebe para medir su consistencia en segundos. La prueba de revenimiento se lleva a cabo antes de realizar la prueba Vebe. Los revenimientos obtenidos fueron de 0 a 1 cm.

5.1.3 TEMPERATURA

En la tabla 5.2 presenta las temperaturas obtenidas de las mezclas de CCR. El concreto fresco fabricado con cemento CPO tiene una temperatura promedio de 20.75 °C, mientras que para el CCR fabricado con cemento CPP la temperatura alcanza 18 °C promedio. La menor temperatura del CCR con CPP se debió al contenido de puzolanas en el cemento. La temperatura de los concretos CCR son inferiores que los concretos convencionales (en el orden de 24 °C) debido al menor consumo de cemento, ó, a la combinación de cemento y puzolana.

Tabla 5.2 Temperatura del CCR en estado fresco.

Mezclas	Cemento	Temperatura °C	Temp. Prom.	Desv. Est.
M1	CPO	19	20.75 °C	1.26 °C
M2		21		
M3		21		
M4		22		
M5	CPP	19	18 °C	1 °C
M6		18		
M7		17		

La figura 5.2 y 5.3 presentan cartas de control de temperatura del CCR elaborado con cemento CPO 30 R y CPP 30 RS respectivamente.

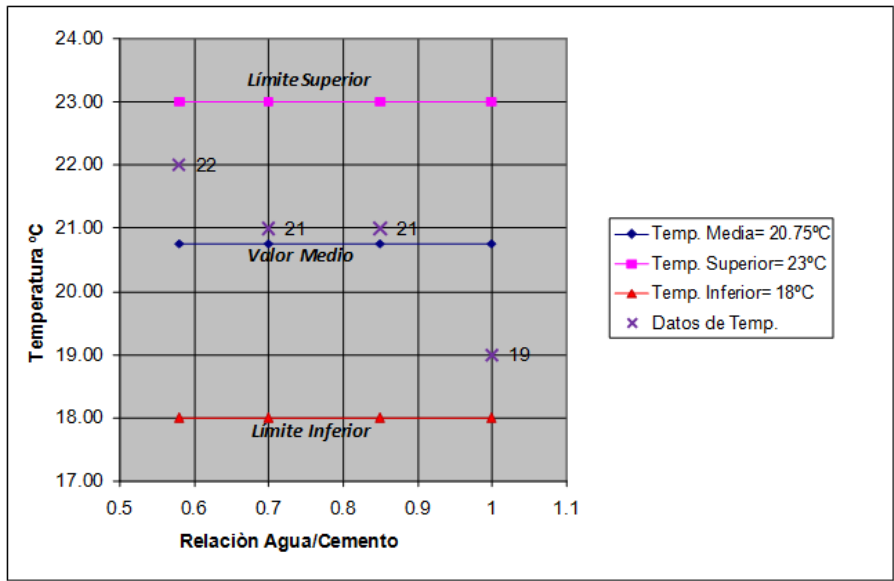


Fig. 5.2 Carta control de temperatura del CCR realizado con cemento CPO 30R.

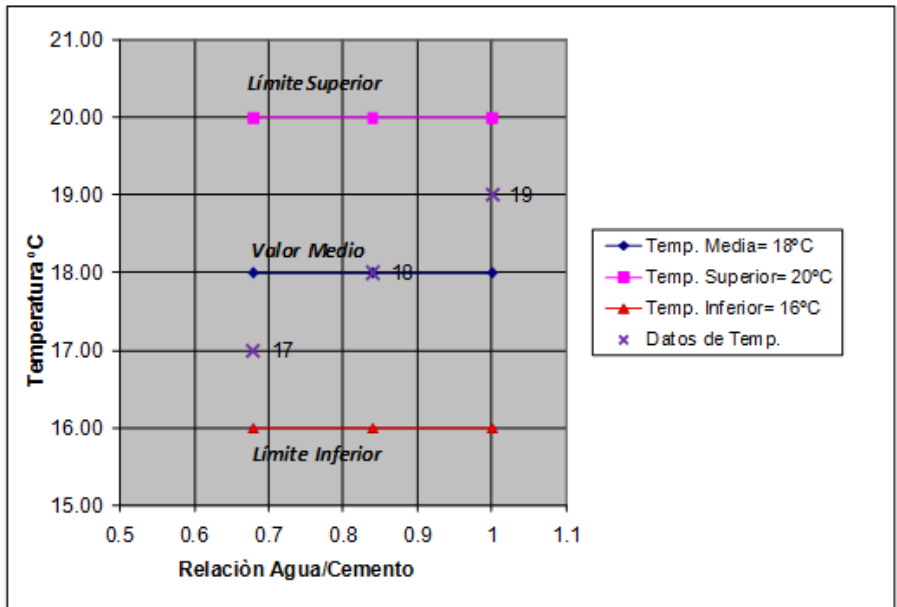


Fig. 5.3 Carta control de temperatura del CCR realizado con cemento CPP 30R RS.

5.1.4 PESO VOLUMÉTRICO

La tabla 5.3 presenta los valores de peso volumétrico del CCR, las mezclas elaboradas con cemento CPO tiene un peso volumétrico promedio de 2367 kg/m^3 , mientras que las mezclas fabricadas con cemento CPP alcanzó un peso volumétrico promedio de 2371 kg/m^3 . La masa volumétrica del CCR es mayor que el concreto convencional que andan en el orden 2200 a 2300 kg/m^3 , esto se debe a la combinación de los materiales que integran el CCR, y al método de compactación.

Tabla 5.3 Peso volumétrico del CCR en estado fresco.

Mezclas	Cemento	P.V. (kg/m^3)	P.V. prom.	Desv. Est.
M1	CPO	2353	2367 kg/m^3	15.06 kg/m^3
M2		2355		
M3		2377		
M4		2383		
M5	CPP	2367	2371 kg/m^3	4.58 kg/m^3
M6		2376		
M7		2370		

Las figuras 5.4 y 5.5 son cartas de control de peso volumétrico del CCR fabricado con los cementos CPO y CPP.

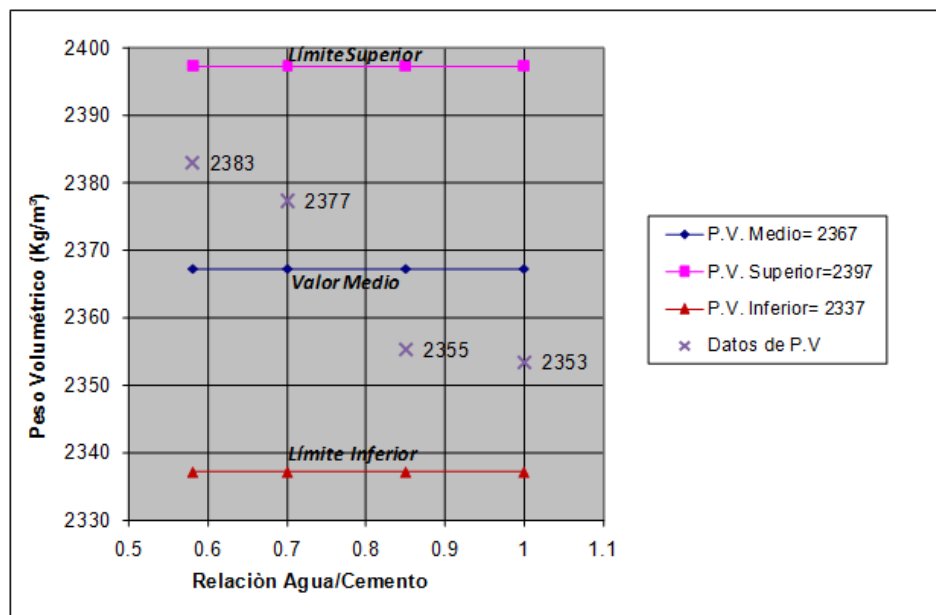


Fig. 5.4 Carta control de Peso volumétrico del CCR realizado con cemento CPO 30 R.

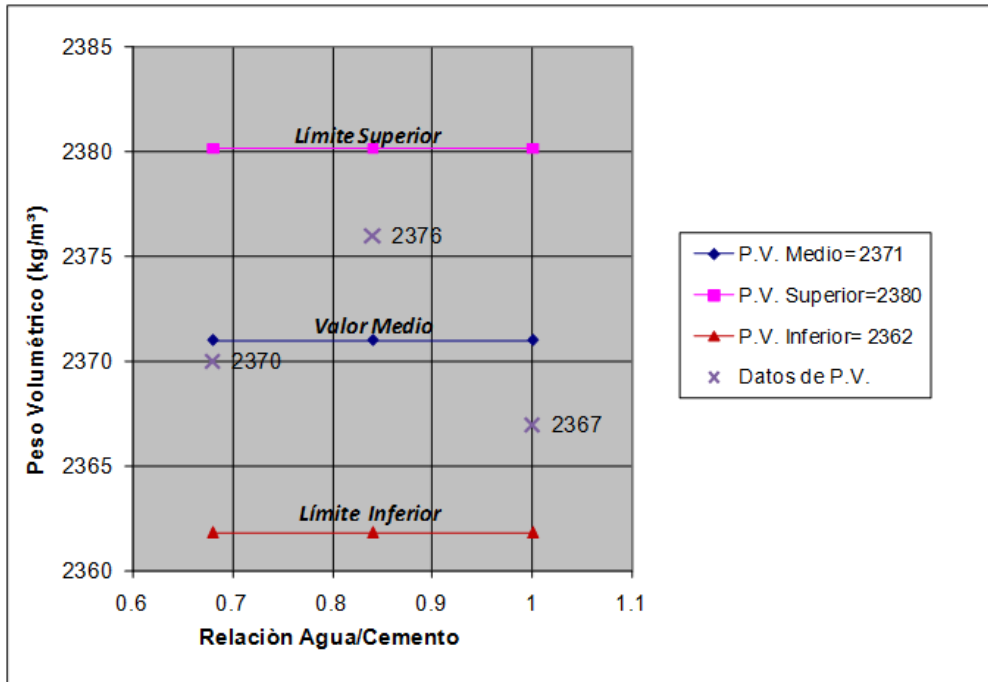


Fig. 5.5 Carta control de Peso volumétrico del CCR realizado con cemento CPP 30 R.

5.1.5 CONTENIDO DE AIRE (%)

La tabla 5.4 muestra los resultados de contenido de aire (%) en el CCR, el concreto fresco elaborado con cemento CPO obtuvo un 2 % de contenido de aire promedio, mientras que el CCR fabricado con CPP alcanzó 1.7%, promedio. Los concretos convencionales alcanzan un 2% utilizando una grava de 3/4", valor similar con el CCR que utilizó el mismo tamaño de grava.

Tabla 5.4 Contenido de aire (%) del CCR en estado fresco.

Mezclas	Cemento	% Aire	% Aire prom.	Desv. Est.
M1	CPO	1.7%	2.00%	0.32%
M2		2.4%		
M3		2.1%		
M4		1.8%		
M5	CPP	1.5%	1.7%	0.26%
M6		1.6%		
M7		2.0%		

Las figuras 5.6 y 5.7 presentan las cartas de control del porcentaje de contenido de aire en el estado fresco del CCR.

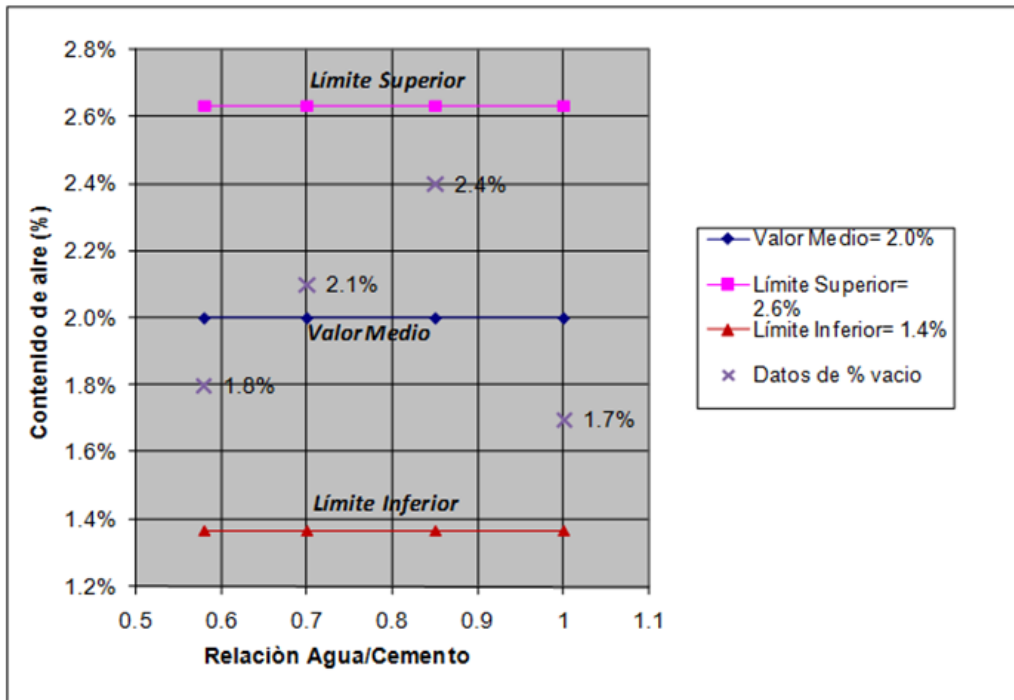


Fig. 5.6 Carta control de contenido de aire, en %, del CCR realizado con cemento CPO 30 R.

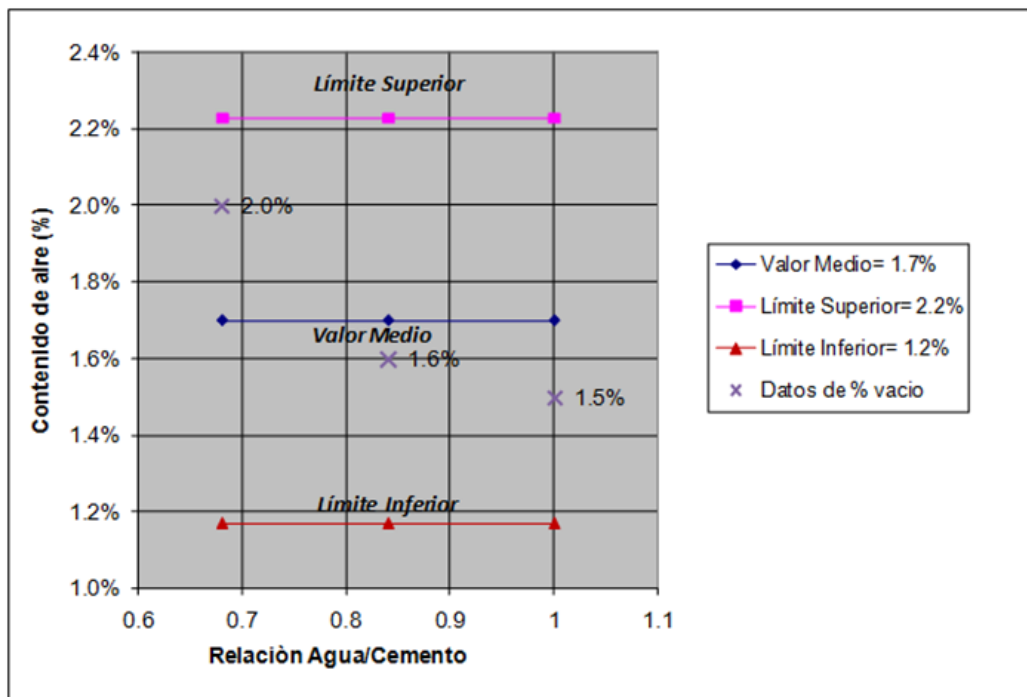


Fig. 5.7 Carta control de contenido de aire en % del CCR realizado con cemento CPP 30 RS.

5.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Al CCR en su estado endurecido se le realizaron las pruebas de compresión simple, tensión diametral, tensión por flexión, módulo de elasticidad y relación de Poisson.

5.2.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (f'_c)

La determinación de esta importante propiedad se determinó bajo la norma ASTM C-39 (Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens), que consiste en medir la resistencia del concreto a la carga axial, ver fig. 5.8 Se hicieron ensayos a 7, 28 y 90 días, para cada ensayo se hicieron 3 probetas de 15 X 30 cm. Para la aplicación de la carga se utilizó la Maquina Universal con capacidad de 250 ton, y la velocidad de carga fue de 25 ton/min.



Fig. 5.8 Especímenes de CCR de 15 X 30 cm ensayados a compresión simple

En la investigación se trabajo bajo la influencia de la relación agua/cemento debido a que se tenía una buena distribución de la pasta cementante en los especímenes de concreto y estos alcanzaban altos pesos volumétricos. Para las puzolanas a emplear, se utilizó el cemento CPP 30R RS por que tiene este material ya incluido como producto comercial.

No se tenía alguna aproximación previa de las resistencias esperadas del CCR con el cemento CPO 30 R y CPP 30R RS, por lo que las relaciones agua/cemento y las cantidades de agua fueron propuestos. Los resultados obtenidos con la relación A/C y la resistencia se muestran en las figs. 5.9 y 5.10.

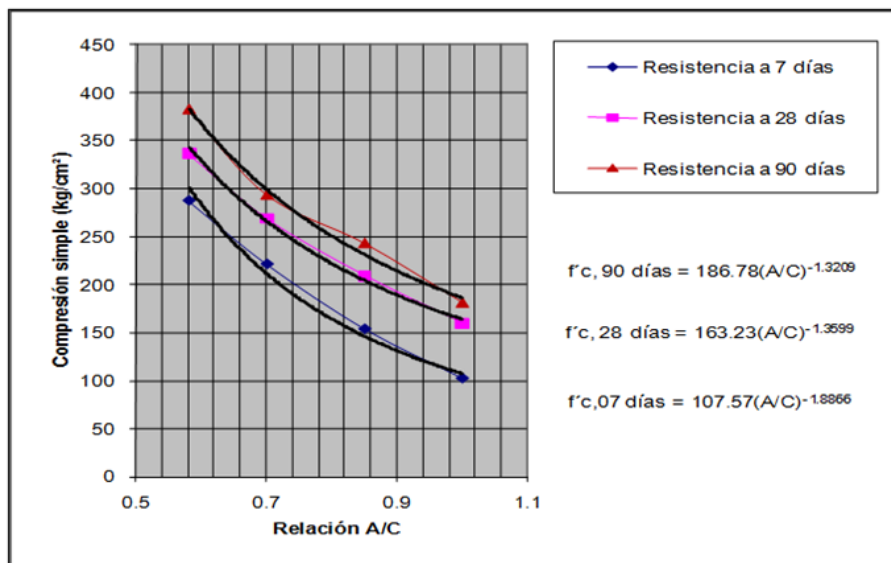


Fig. 5.9 Curva de resistencia a compresión simple con cemento CPO 30R, agregados calizos y arena andesítica.

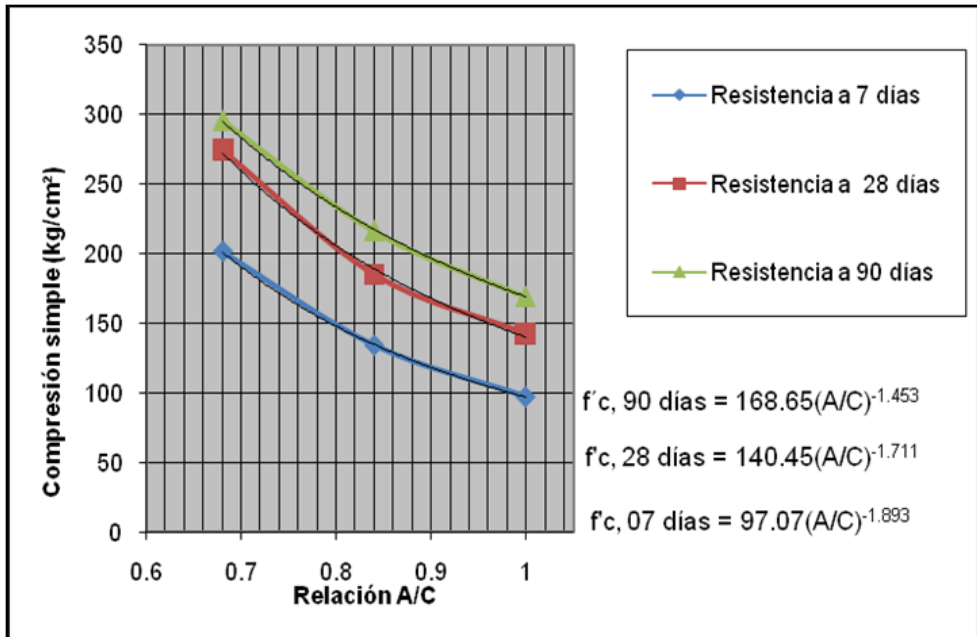


Fig. 5.10 Curva de resistencia a compresión simple con cemento CPP 30R RS, agregados calizos y arena andesítica.

5.2.1.1 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE CON CEMENTO CPO 30 R (f'c)

En la Tabla 5.5 se presenta los incrementos de resistencias de las mezclas M1, M2, M3 y M4 con sus respectivas relaciones agua/cemento y edades del concreto. La mezcla M1 a la edad de 7 días tiene una resistencia a la compresión simple del 64%, comparado con su resistencia a los 28 días, luego incrementa un 14 % de su resistencia a los 90 días edad.

TABLA 5.5 RESULTADOS DE LAS MEZCLAS CON CEMENTO CPO en kg/cm²

MEZCLA	f'c,7 días	f'c,28días	f'c,90 días	f'c,7/f'c28	f'c,90/f'c28	A/C
M1	102	159	182	64%	114%	1
M2	154	209	243	73%	116%	0.85
M3	221	269	294	82%	109%	0.7
M4	287	337	383	85%	114%	0.58
Promedios				76%	113%	

La mezcla M2 a la edad de 7 días tiene una resistencia a la compresión simple del 73% comparado con su resistencia a los 28 días, posteriormente, incrementa un 16% a los 90 días edad. La mezcla M3 tiene una resistencia a la compresión simple del 82% a los 7 días, respecto al de 28 días edad, y se incrementa un 9% a los 90 días. La mezcla M4 a los 7 días, tiene una resistencia a la compresión simple del 85% , con respecto a los 28 días de edad, y presenta un incremento del 14% a los 90 días.

El resultado de los Promedios de porcentaje de resistencia fueron los siguientes: las mezclas a los 7 días tienen una resistencia del 76%, comparada con la de 28 días de edad, y aumenta un 13% de la resistencia al llegar los 90 días. En la fig. 5.11 se presenta los incrementos de resistencia a compresión simple de las mezclas M1, M2, M3 y M4 a diferentes edades.

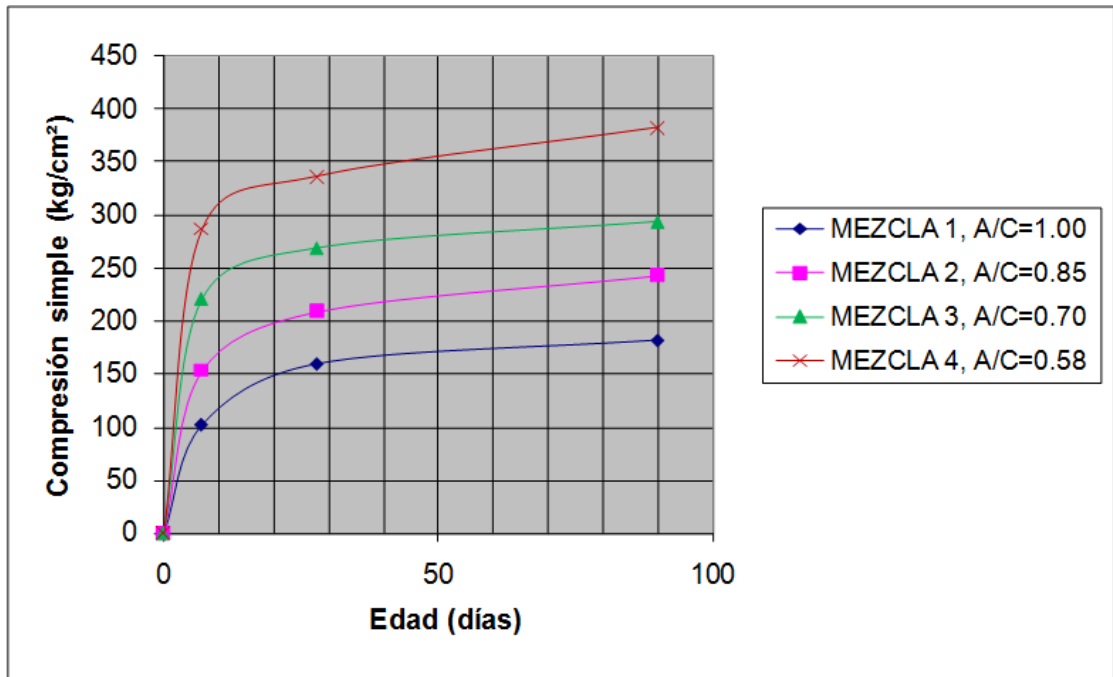


Fig. 5.11 Resistencia a compresión simple a diferentes edades para Mezclas con cemento CPO 30 R.

Las figuras 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15 son gráficas para estimar la resistencia del CCR a diferentes edades.

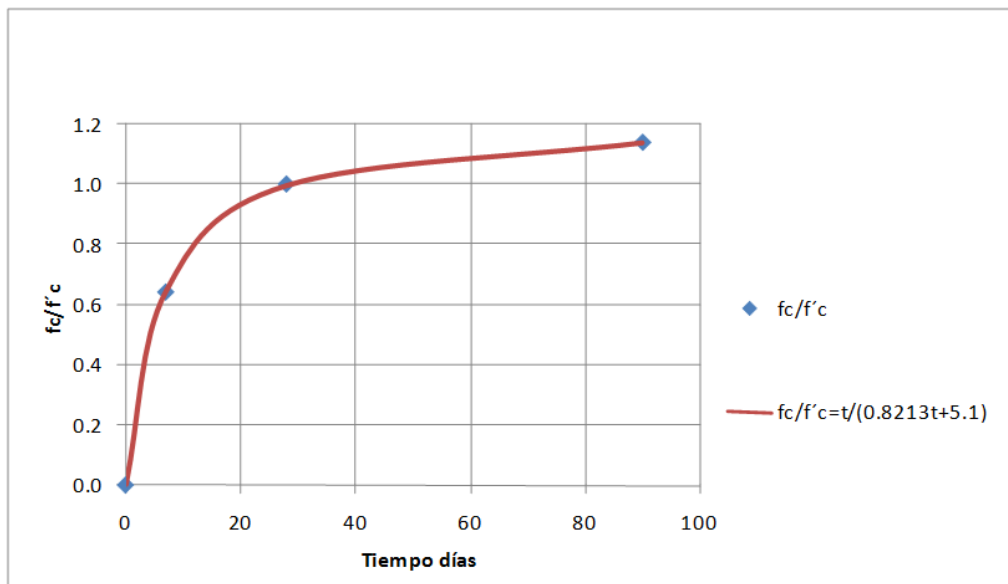


Fig. 5.12 Gráfica y expresión para estimar la resistencia a compresión de la mezcla M1.

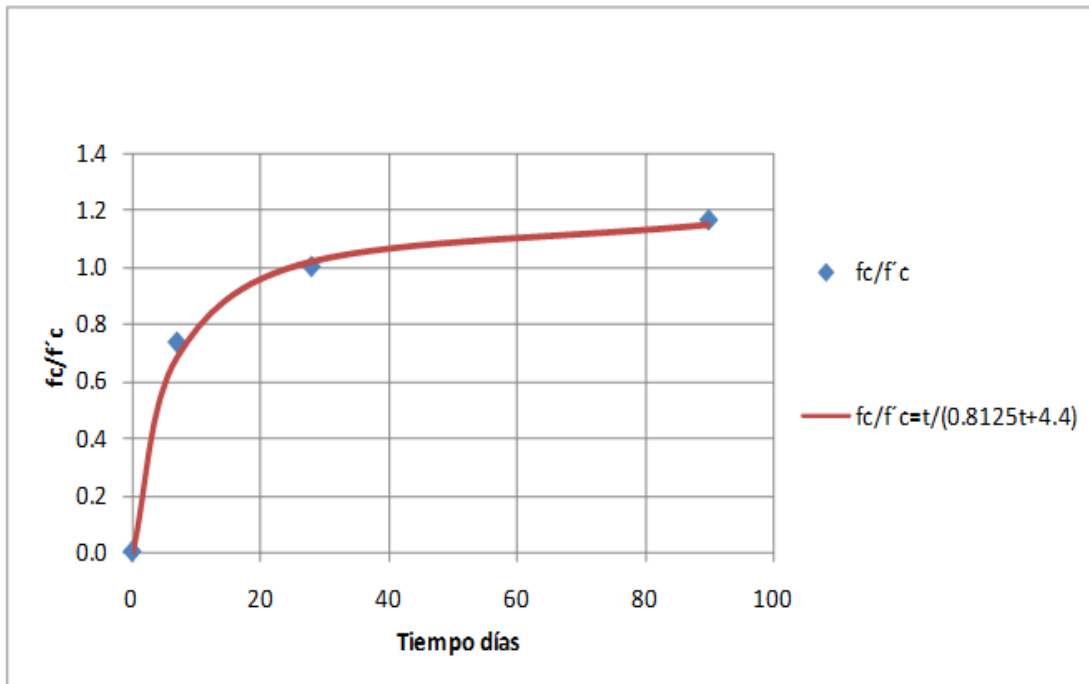


Fig. 5.13 Gráfica y expresión para estimar la resistencia a compresión de la mezcla M2.

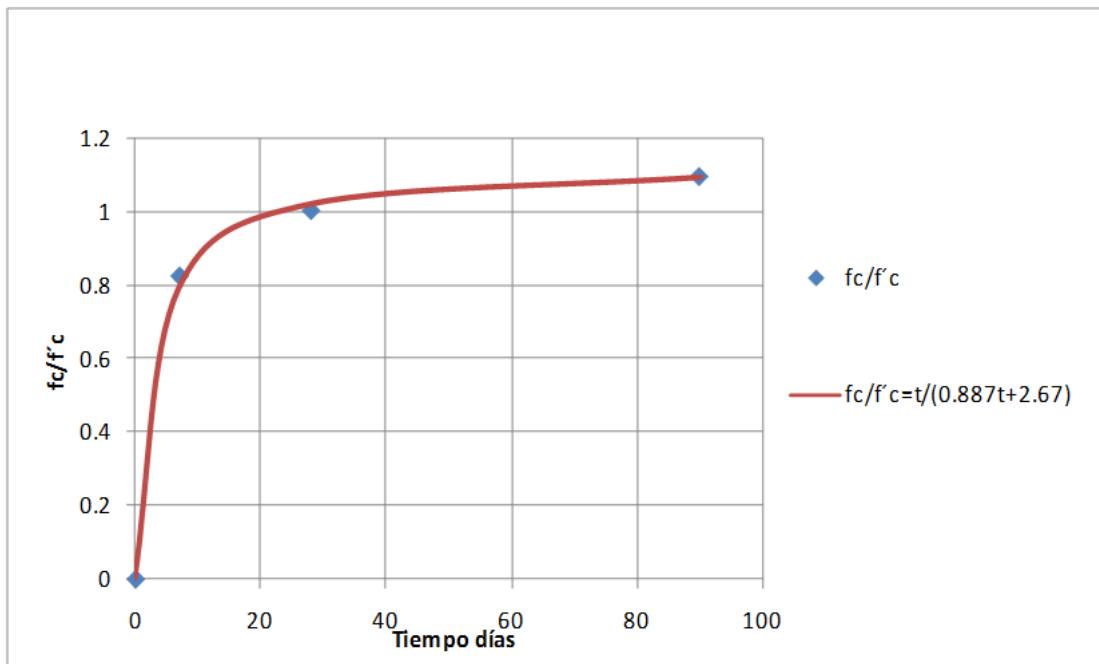


Fig. 5.14 Gráfica y expresión para estimar la resistencia a compresión de la mezcla M3.

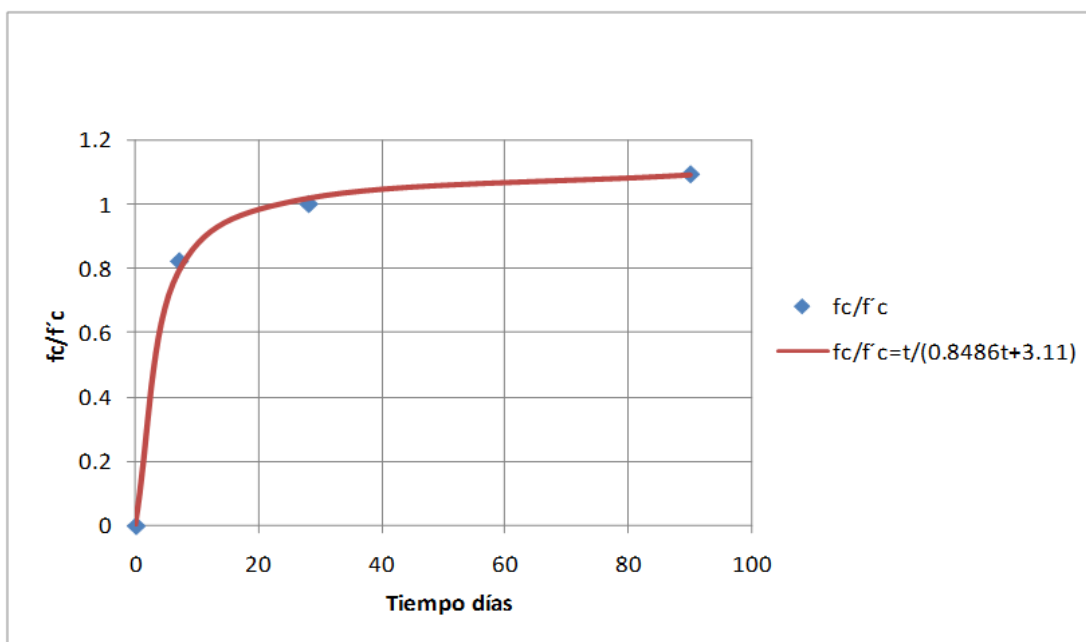


Fig. 5.15 Gráfica y expresión para estimar la resistencia a compresión de la mezcla M4.

5.2.1.2 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE CON CEMENTO CPP 30 R RS (f'c)

La tabla 5.6 presenta los incrementos de resistencia a compresión simple de las mezclas M5, M6, y M7. Los especímenes de la mezcla M5 ensayados a los 7 días tienen un 68% de la resistencia a compresión simple a 28 días, y un incremento del 19% a los 90 días.

TABLA 5.6 RESULTADOS DE LAS MEZCLAS CON CEMENTO CPP 30R RS en kg/cm²

MEZCLA	f'c,7 días	f'c,28días	f'c,90 días	f'c,7/f'c28	f'c,90/f'c28	A/C
M5	97	142	169	68%	119%	1
M6	134	185	216	73%	117%	0.84
M7	202	275	296	74%	108%	0.68
Promedios				72%	115%	

Los especímenes de la mezcla M6 ensayados a los 7 días tienen un 73% de la resistencia a compresión simple a 28 días, y un incremento del 17% a los 90 días. Los especímenes de la mezcla M7 elaboradas a los 7 días tienen un 74% de la resistencia a compresión simple a 28 días, y un incremento del 8% a los 90 días.

Las mezclas a la edad de 7 días tiene un 72% promedio de la resistencia a 28 días, y un 15% promedio de incremento a los 90 días.

En la fig. 5.16 se presenta los incrementos de resistencia a compresión simple de las mezclas M5, M6 y M7 a diferentes edades.

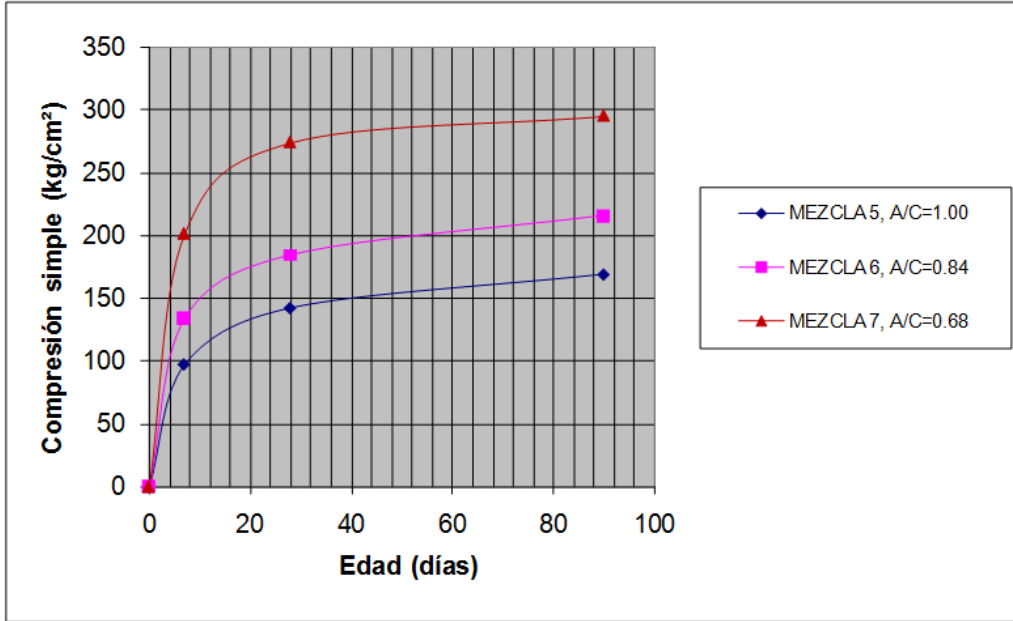


Fig. 5.16 Resistencia a compresión simple a diferentes edades para mezclas con cemento CPP 30 RS.

Las figuras 5.17, 5.18, y 5.19 son gráficas para estimar la resistencia del CCR a diferentes edades, a partir de los 28 días.

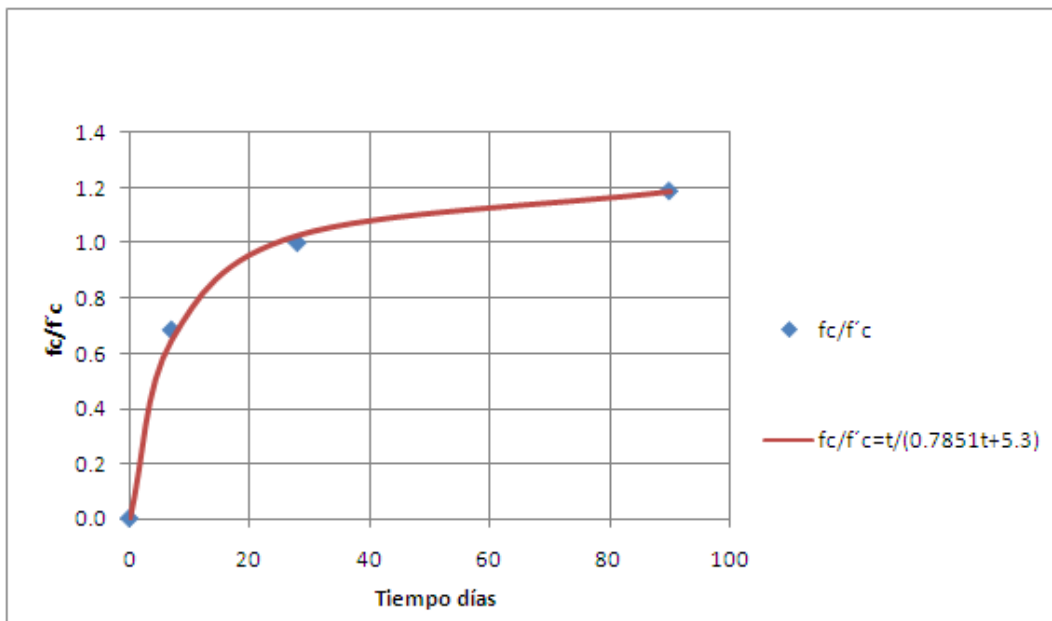


Fig. 5.17 Gráfica y expresión para estimar la resistencia a compresión de la mezcla M5.

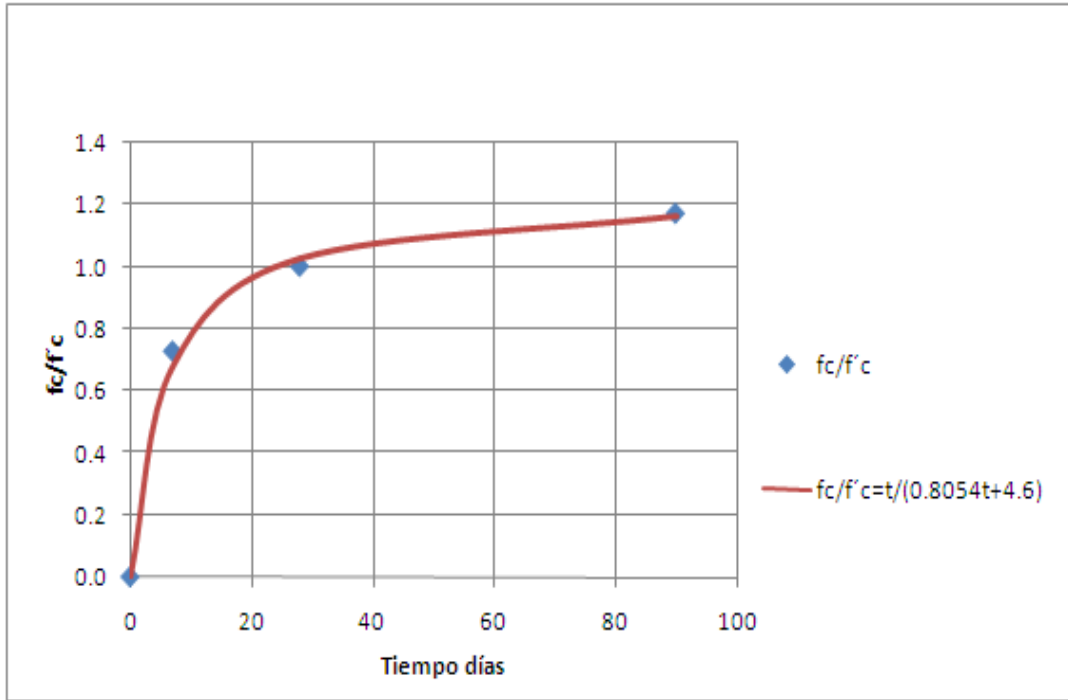


Fig. 5.18 Gráfica y expresión para estimar la resistencia a compresión de la mezcla 6.

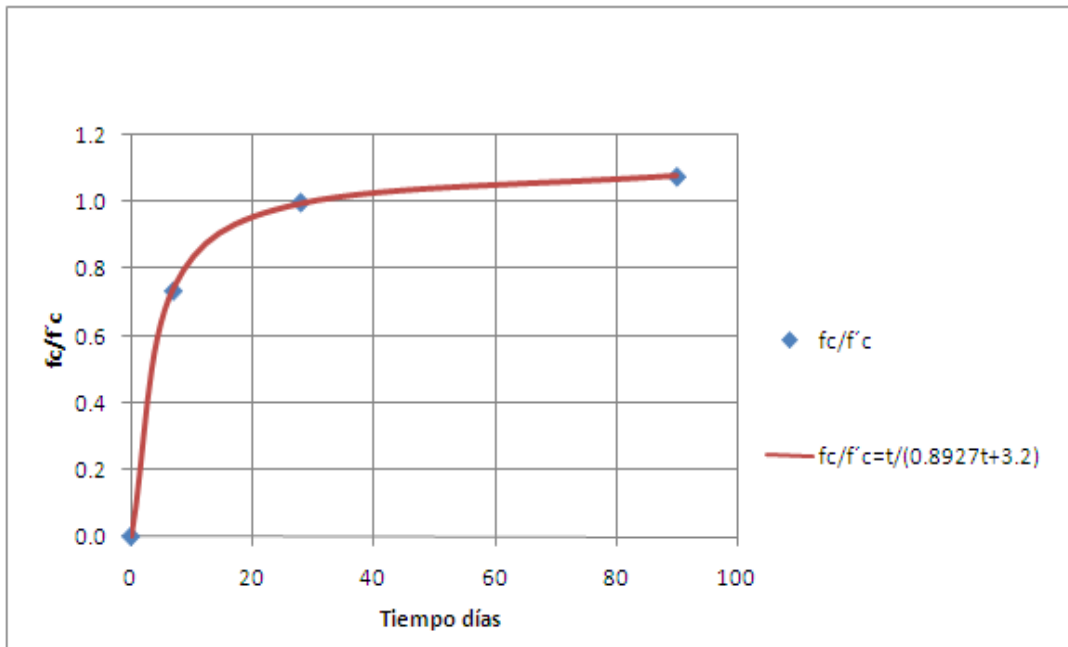


Fig. 5.19 Gráfica y expresión para estimar la resistencia a compresión de la mezcla M7.

5.2.1.3 EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN ENTRE EL CEMENTO CPO 30R Y CEMENTO CPP 30 R RS (f_c)

En las tablas 5.7, 5.8 y 5.9 se presentan las resistencias estimadas de los concretos fabricados con los cementos CPO y CPP, las ecuaciones fueron obtenidas a partir de las tendencias de las gráficas de resistencia y A/C (ver fig. 5.9 y 5.10). En la tabla 5.7 se observa que las resistencias obtenidas a 7 días con el cemento CPO 30R son mayores que las obtenidas con el cemento CPP 30 R RS, la diferencia de resistencia oscila en un promedio de 10%.

TABLA 5.7 Estimación de resistencias del concreto con CPO 30R y CPP 30R RS a 7 días.

EDAD	$f'c(Kg/cm^2) = 107.57(A/C)^{1.8866}$	$f'c(Kg/cm^2) = 97.07(A/C)^{1.8933}$	CPP 30R RS /	A/C
	CON CEMENTO CPO 30R	CON CEMENTO CPP 30R RS	CPO 30R	
			%	
7 Días	108	97	90%	1
	146	132	90%	0.85
	211	191	90%	0.7
	301	272	91%	0.58
		Promedio	90%	

En la tabla 5.8 se puede ver que la resistencia con el cemento CPO continua siendo mayor que las obtenida con el cemento CPP, y que la diferencia de resistencia promedio es de un 5 %. Las mezclas elaboradas con cemento CPP 30R RS han reducido la diferencia de resistencia a la edad de 28 en días.

TABLA 5.8 Estimación de resistencias del concreto con CPO 30R y CPP 30R RS a 28 días.

EDAD	$f'c(Kg/cm^2) = 163.23(A/C)^{1.3599}$	$f'c(Kg/cm^2) = 140.45(A/C)^{1.7114}$	CPP 30R RS /	A/C
	CON CEMENTO CPO 30R	CON CEMENTO CPP 30R RS	CPO 30R	
			%	
28 Días	163	140	86%	1
	204	185	91%	0.85
	265	259	98%	0.7
	342	357	104%	0.58
		Promedio	95%	

En la tabla 5.9 se muestra que la resistencia con el cemento CPO continua siendo mayor que las obtenida con el cemento CPP, y que la diferencia de resistencia promedio es de un 6 %.

TABLA 5.9 Estimación de resistencias del concreto con CPO 30R y CPP 30R RS a 90 días.

EDAD	$f'c(Kg/cm^2) = 186.78(A/C)^{1.3209}$	$f'c(Kg/cm^2) = 168.65(A/C)^{1.453}$	CPP 30R RS /	A/C
	CON CEMENTO CPO 30R	CON CEMENTO CPP 30R RS	CPO 30R	
			%	
90 Días	187	169	90%	1
	232	214	92%	0.85
	299	283	95%	0.7
	384	372	97%	0.58
		Promedio	94%	

5.2.2 RESISTENCIA A TENSIÓN INDIRECTA (Ft)

Las figuras 5.20 y 5.21 se muestran la prueba a compresión diametral especificada por la norma ASTM C496. La tabla 5.10 presenta los valores de CCR obtenidos de la prueba a compresión diametral.



Fig. 5.20 Ensayo a tensión indirecta de cilindro de concreto en laboratorio.



Fig. 5.21 Falla de cilindro ensayada a tensión indirecta.

TABLA 5.10 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS A COMPRESIÓN DIAMETRAL, en kg/cm²

Mezclas	Cemento	f't	f't	f't	A/C
		7 días	28 días	90 días	
M1	CPO	13	17	18	1
M2		18	24	27	0.85
M3		22	29	31	0.7
M4		28	34	35	0.58
M5	CPP	11	17	20	1
M6		18	23	25	0.84
M7		21	29	29	0.68

5.2.2.1 RESISTENCIA A TENSIÓN INDIRECTA (Ft) DEL CCR REALIZADO CON CEMENTO CPO 30R

La tabla 5.11 presenta los resultados obtenidos de la prueba a compresión diametral a las edades realizadas, y la relación correspondiente con la resistencia a compresión simple expresada en porcentaje, además, de la expresión empírica para estimar la compresión diametral a partir de f'_c de diseño.

La resistencia a tensión indirecta a la edad de 28 días, en promedio, es de un 11% correspondiente a la de compresión simple.

TABLA 5.11 Evaluación de resultados de compresión diametral (f't).

Mezclas	Resistencia a tensión, ft (kg/cm ²)			ft/fc (%)			ft/vf'c	A/C
	7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	90 días	28 días	
M1	13	17	18	13%	11%	10%	1.37	1.00
M2	18	24	27	12%	11%	11%	1.64	0.85
M3	22	29	31	10%	11%	11%	1.74	0.70
M4	28	34	35	10%	10%	9%	1.85	0.58
Promedios				11%	11%	10%	1.65	

La figura 5.22 se presenta una gráfica de relación de resistencias entre los resultados de tensión indirecta y compresión a diferentes edades, que se originan de las expresiones $1.47\sqrt{f'c}$ (7 días), $1.65\sqrt{f'c}$ (28 días) y $f't=1.68\sqrt{f'c}$ (90 días).

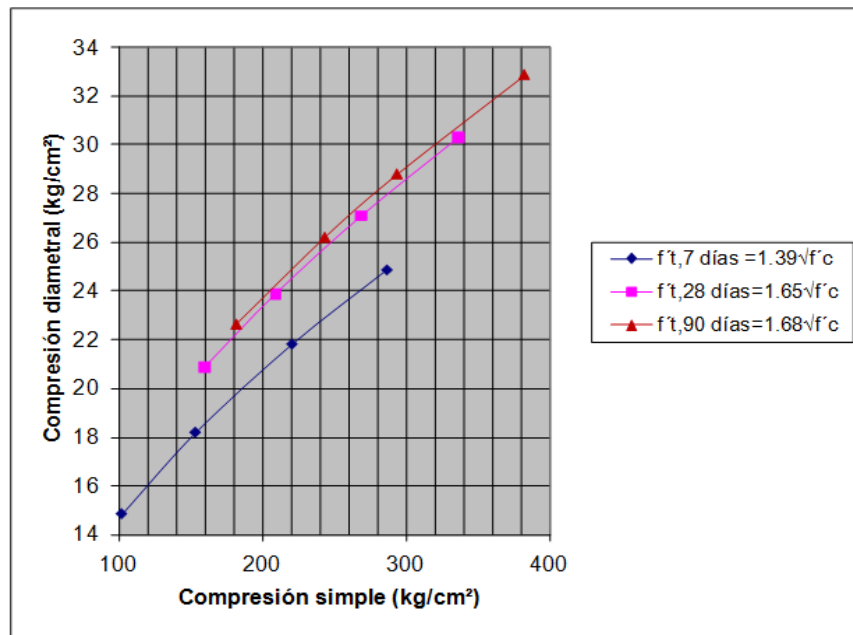


Fig. 5.22 Gráfica y expresiones para estimar la resistencia a tensión diametral, relacionada con la resistencia a compresión simple en

La fig. 5.23 presenta los límites de la fórmula $1.65\sqrt{f'c}$ que se utiliza para estimar la resistencia a tensión por compresión diametral con relación a la compresión simple a 28 días, la cual permite establecer un rango de los valores esperados de los ensayos.

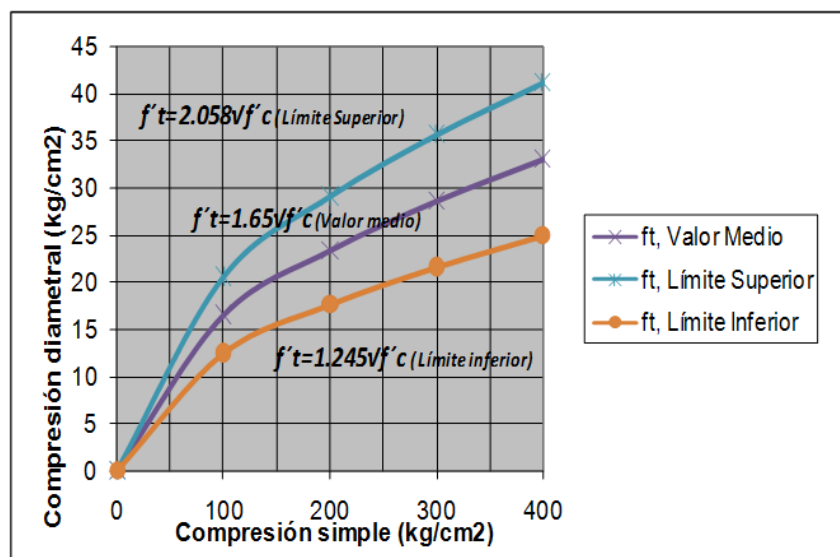


Fig. 5.23 Gráfica y expresiones para estimar la resistencia a tensión diametral a 28 días, con los límites superiores e inferiores.

5.2.2.2 RESISTENCIA A TENSIÓN INDIRECTA (Ft) DEL CCR REALIZADO CON CEMENTO CPP 30R RS

La tabla 5.12 presenta los resultados obtenidos de la prueba a compresión diametral a las edades realizadas, y la relación correspondiente con la resistencia a compresión simple expresada en porcentaje, además, de la expresión empírica para estimar la compresión diametral a partir de $f'c$ de diseño.

La resistencia a tensión indirecta a la edad de 28 días, en promedio, la resistencia es de un 12% respecto a la de compresión simple.

TABLA 5.12 Evaluación de resultados de compresión diametral ($f't$).

Mezclas	Resistencia a tensión, ft (kg/cm ²)			ft/fc (%)			ft/vf'c	A/C
	7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	90 días	28 días	
M5	11	17	20	12%	12%	12%	1.42	1
M6	18	23	25	13%	12%	11%	1.66	0.84
M7	21	29	29	11%	11%	10%	1.75	0.68
Promedio				12%	12%	11%	1.61	

En la figura 5.24 se presenta la gráfica de relación de resistencia entre los resultados de tensión indirecta y compresión a la edad de 7, 28 y 90 días, que se originan de las expresiones $1.39\sqrt{f'c}$ (7 días), $1.61\sqrt{f'c}$ (28 días) y $1.62\sqrt{f'c}$ (90 días).

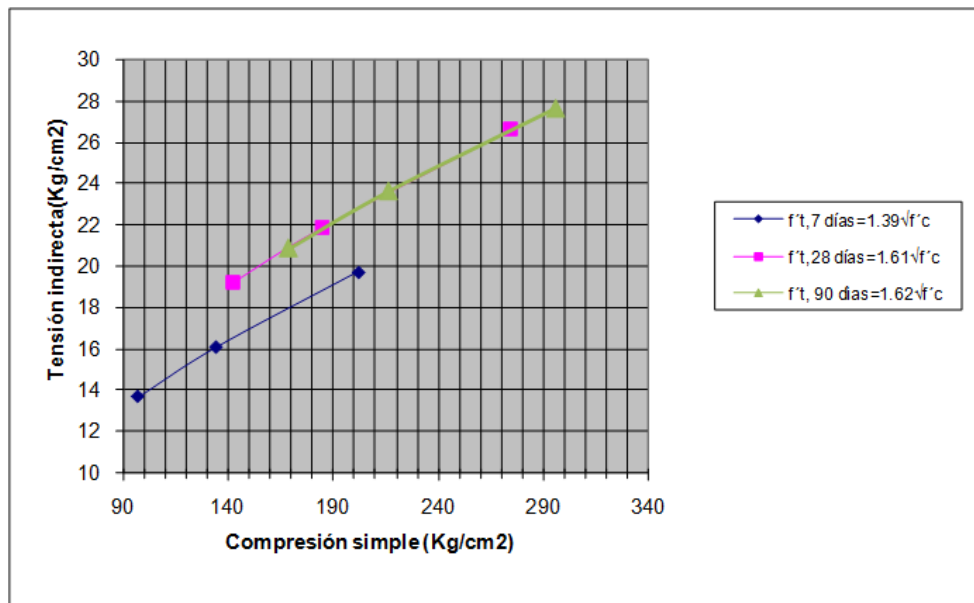


Fig. 5.24 Gráfica y expresiones para estimar la resistencia a tensión diametral, relacionada con la resistencia a compresión simple en CCR elaborado con cemento CPP 30R RS.

La fig. 5.25 presenta los límites inferior y superior de la fórmula $1.608\sqrt{f'c}$ que se utiliza para estimar la resistencia a tensión diametral con relación a la compresión simple a 28 días, la cual permite establecer un rango de los valores esperados de los ensayos.

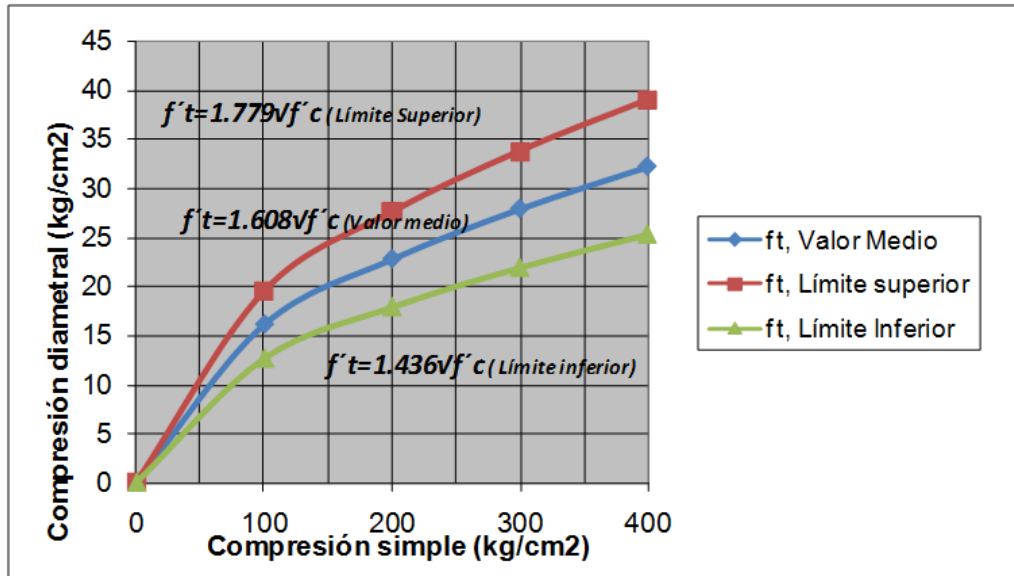


Fig. 5.25 Gráfica y expresiones para estimar la resistencia a tensión por compresión diametral a 28 días, con los límites superiores e inferiores.

5.2.3 TENSIÓN A FLEXIÓN (Mr) DEL CCR

Las figuras 5.26 y 5.27 se muestran la prueba a tensión por flexión especificada por la norma ASTM C-78. La tabla 5.13 presenta los valores de CCR obtenidos de la prueba a tensión por flexión a las edades de 28 y 90 días.



Fig. 5.26 Ensayo ASTM C-78. Viga de CCR de 15 cm X 15 cm X 60 cm.



Fig. 5.27 Viga ensayada fallando en su tercio medio trazado

TABLA 5.13 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS A TENSIÓN POR FLEXIÓN

Mezclas	Cemento	Resistencia a flexión, Mr (kg/cm²)		A/C
		28 días	90 días	
M1	CPO	28	33	1
M2		38	39	0.85
M3		44	44	0.7
M4		46	45	0.58
M5	CPP	29	33	1
M6		35	37	0.84
M7		40	44	0.68

5.2.3.1 TENSIÓN A FLEXIÓN (M_r) DEL CCR REALIZADO CON CEMENTO CPO 30R

La tabla 5.14 presenta los resultados de las pruebas a tensión por flexión. La resistencia a tensión por flexión es de un 16% con relación a la compresión simple a la edad de 28 días, y la expresión empírica para estimar el M_r a partir de su $f'c$ de diseño es $M_r=2.5\sqrt{f'c}$.

TABLA 5.14 Evaluación de resultados de tensión por flexión (M_r).

Mezclas	Resistencia a compresión, f_c (kg/cm ²)		Resistencia a flexión, M_r (kg/cm ²)		M_r/f_c (%)		$M_r/\sqrt{f'c}$	A/C
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	
M1	159	182	28	33	17%	18%	2.20	1
M2	209	243	38	39	18%	16%	2.63	0.85
M3	269	294	44	44	16%	15%	2.66	0.7
M4	337	383	46	45	14%	12%	2.50	0.58
Promedio					16%	15%	2.50	

En la figura 5.28 se presenta las gráficas de relación de resistencia entre los resultados de tensión por flexión y compresión simple a la edad de 28 y 90 días, que originan las expresiones $2.5\sqrt{f'c}$ (28 días) y $2.4\sqrt{f'c}$ (90 días).

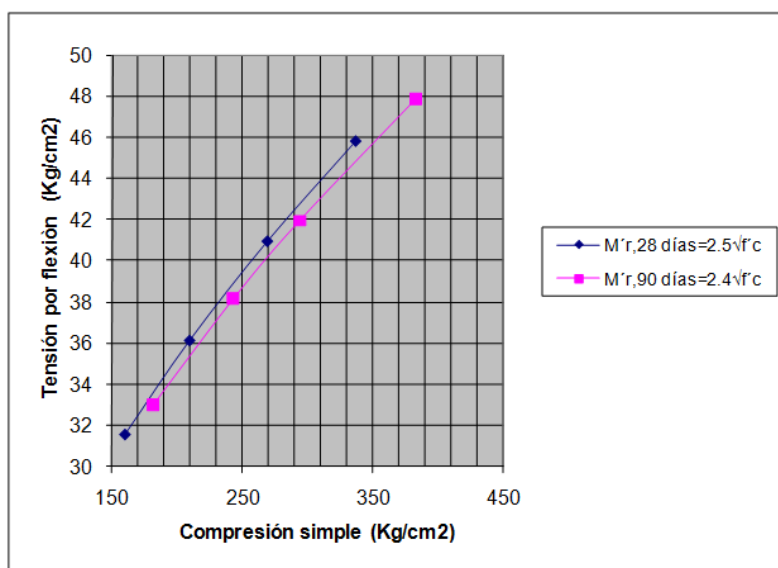


Fig. 5.28 Gráfica y expresiones para estimar la resistencia a tensión por flexión, relacionada con la resistencia a compresión simple en CCR elaborado con cemento CPO 30R.

La fig. 5.29 muestra los límites inferior y superior de la fórmula $2.50\sqrt{f'c}$ que se utiliza para estimar la resistencia a tensión por flexión con relación a la compresión simple a 28 días, la cual permite establecer un intervalo de valores esperados en los ensayos.

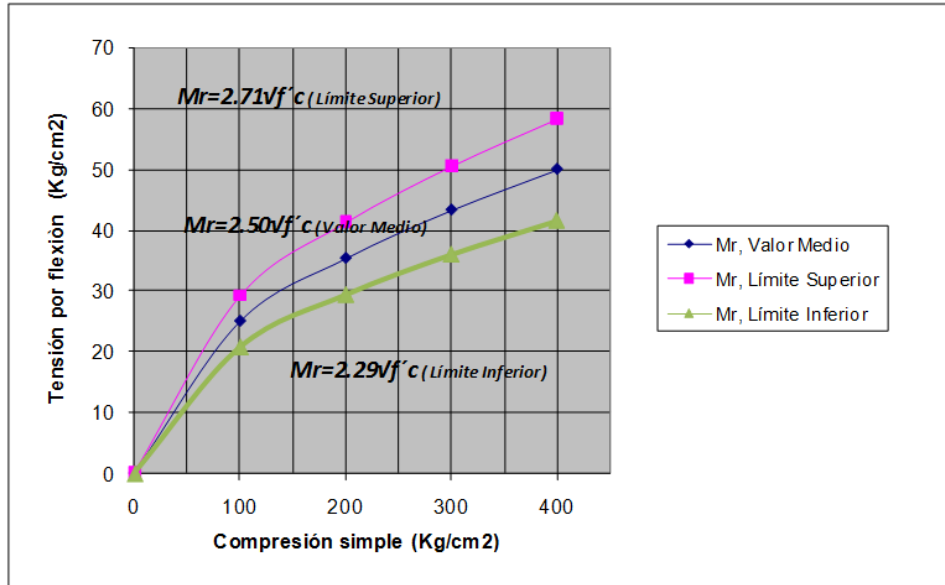


Fig. 5.29 Gráfica y expresiones para estimar la resistencia a tensión por flexión a 28 días, con los límites superiores e inferiores.

5.2.3.2 TENSIÓN A FLEXIÓN (Ft) DEL CCR REALIZADO CON CEMENTO CPP 30R RS

La tabla 5.15 presenta los resultados de las pruebas a tensión por flexión. La resistencia a tensión por flexión es de un 18% con relación a la compresión simple a la edad de 28 días, y la expresión empírica para estimar el M_r a partir de su $f'c$ de diseño es $M_r=2.46\sqrt{f'c}$.

TABLA 5.15 Evaluación de resultados de tensión por flexión (M_r).

Mezclas	Resistencia a compresión, f_c (kg/cm ²)		Resistencia a flexión, M_r (kg/cm ²)		M_r/f_c (%)		$M_r/\sqrt{f'c}$	A/C
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	
M5	142	169	29	33	20%	20%	2.43	1
M6	185	216	35	37	19%	17%	2.55	0.84
M7	275	296	40	44	15%	15%	2.41	0.68
Promedio					18%	17%	2.46	

La figura 5.30 muestra la gráfica de relación de resistencia entre los resultados de tensión por flexión y compresión simple a la edad de 28 y 90 días, que originan las expresiones $2.46\sqrt{f'c}$ (28 días) y $2.55\sqrt{f'c}$ (90 días).

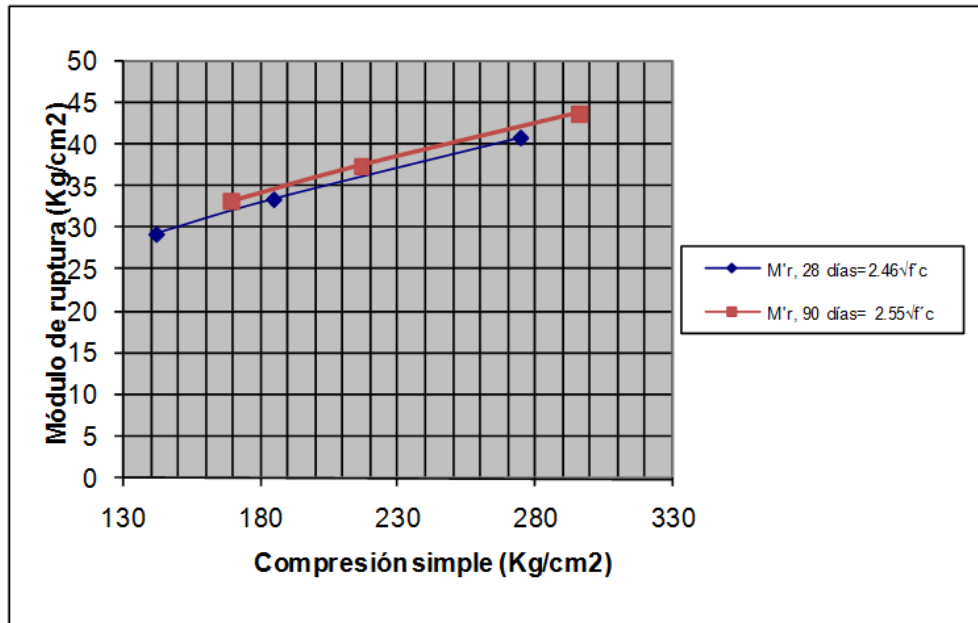


Fig. 5.30 Gráfica y expresiones para estimar la resistencia a tensión por flexión, relacionada con la resistencia a compresión simple en CCR elaborado con cemento CPP 30R RS.

La fig. 5.31 muestra los límites de la fórmula $2.46\sqrt{f'c}$ que se utiliza para estimar la resistencia a tensión por flexión con relación a la compresión simple a 28 días de los especímenes elaborados con cemento CPP 30R RS, la cual permite establecer un intervalo de valores esperados en los ensayos.

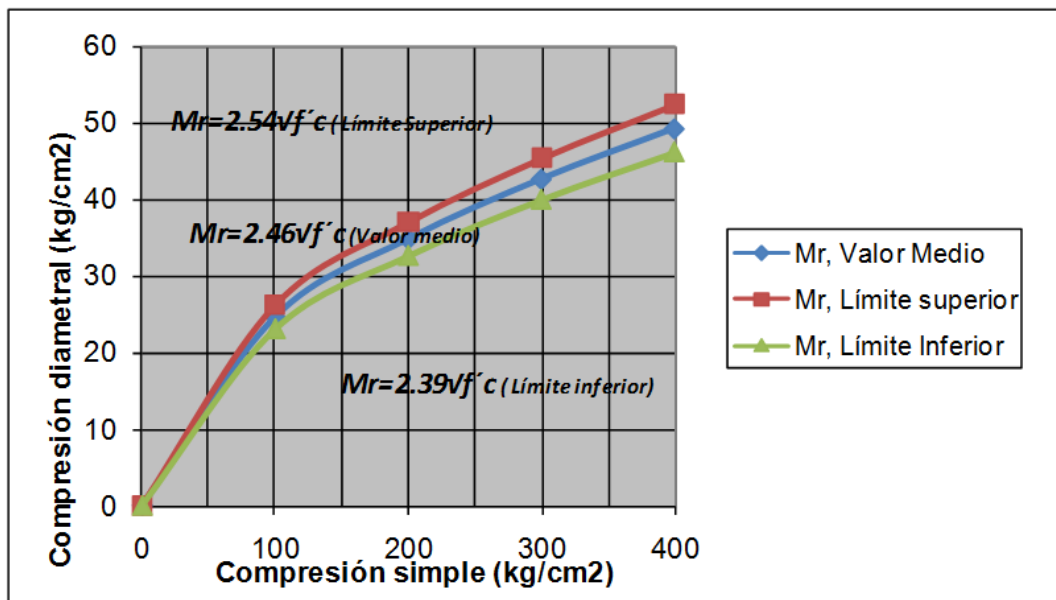


Fig. 5.31 Gráfica y expresiones para estimar la resistencia a tensión por flexión a 28 días, con los límites superiores e inferiores.

5.2.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD E_c Y RELACIÓN DE POISSON μ

Para estimar deformaciones debidas a cargas de corta duración se requiere conocer el módulo de elasticidad y la relación de Poisson. Se obtienen mediante la prueba reglamentada por ASTM C-469 (Ver figura 5.32), método estándar de ensaye para módulo de elasticidad estático y relación de Poisson de concreto a compresión (Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression).

La tabla 5.16 presenta los valores de CCR obtenidos de la prueba ASTM C-469 a las edades de 28 y 90 días.



FIG. 5.32 Ensaye a módulo de elasticidad y relación de Poisson.

TABLA 5.16 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON

Mezclas	Cemento	Resistencia a compresión, f_c (kg/cm ²)		Módulo de elasticidad, E_c (kg/cm ²)		Relación de Poisson, μ .		A/C
		28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días	
M1	CPO	160	184	255124	250337	0.14	0.19	1
M2		215	236	247045	282916	0.20	0.22	0.85
M3		283	301	265041	314077	0.11	0.20	0.7
M4		340	374	308304	299050	0.22	0.18	0.58
M5	CPP	145	173	229953	260017	0.22	0.16	1
M6		188	222	243067	264444	0.20	0.14	0.84
M7		267	300	257678	290617	0.14	0.15	0.68

5.2.4.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD E_c Y RELACIÓN DE POISSON μ DEL CRR REALIZADO CON CEMENTO CPO.

La tabla 5.17 presenta los módulos de elasticidad de cada una de las mezclas realizadas con el cemento CPO, la deformación máxima unitaria promedio que alcanzó el CCR fue de 0.0025 y 0.0022 correspondiente a los 28 y 90 días de edad. Las expresiones $17,376\sqrt{f'_c}$ (28 días) y $17,612\sqrt{f'_c}$ (90 días).

TABLA 5.17 Evaluación de resultados de módulo de elasticidad (Ec).

Mezclas	Resistencia a compresión, f_c (kg/cm ²)		Módulo de elasticidad, E_c (kg/cm ²)		Deformación unitaria máxima, E_o		E_c/f_c		A/C
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días	
M1	160	184	255,124	250,337	0.0025	0.0022	20,182	18,450	1
M2	215	236	247,045	282,916	0.0024	0.0023	16,860	18,429	0.85
M3	283	301	265,041	314,077	0.0028	0.0020	15,746	18,108	0.7
M4	340	374	308,304	299,050	0.0023	0.0022	16,718	15,460	0.58
Promedio					0.0025	0.0022	17,376	17,612	

La fig. 5.33 muestra los límites de la fórmula $17,376\sqrt{f_c}$ que se utiliza para estimar los módulo de elasticidad con relación a la compresión simple a 28 días de los especímenes elaborados con cemento CPO 30R, la cual permite establecer un intervalo de valores esperados en los ensayos.

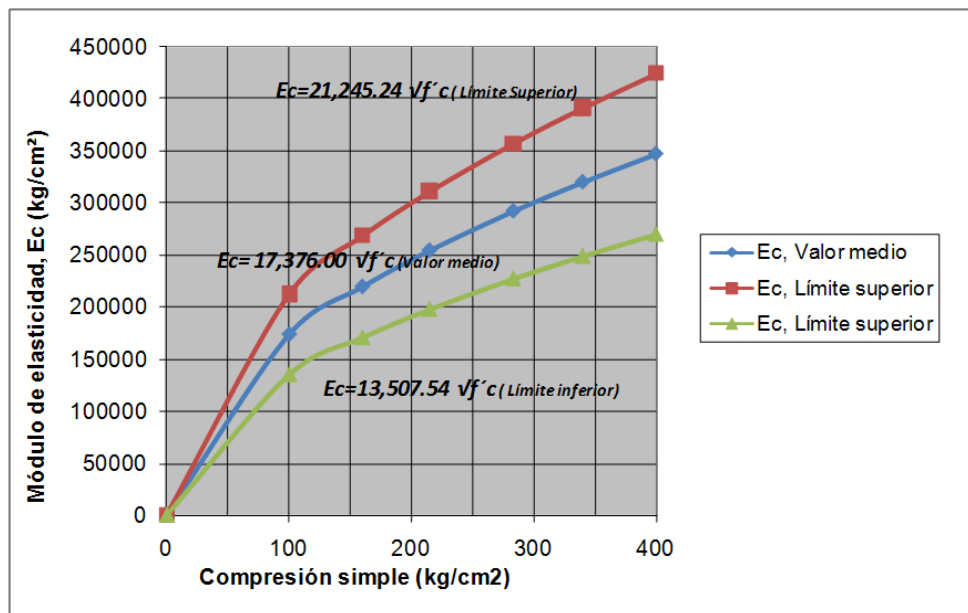


Fig. 5.33 Gráfica y expresiones para estimar el módulo de elasticidad a 28 días, con los límites superiores e inferiores.

La tabla 5.18 presenta los resultados de la relación de Poisson que relaciona la deformación transversal con respecto a su deformación axial, de las cuatro mezclas estudiadas se obtuvieron promedios de 0.167 y 0.197 a los 28 y 90 días de edad, respectivamente. Las expresiones para estimar la relación Poisson con relación a la resistencia de compresión simple son $0.011\sqrt{f_c}$ y $0.012\sqrt{f_c}$ correspondiente a los 28 y 90 días de edad, la gráfica de estas expresiones y valores de la μ se presenta en la figura 5.34.

TABLA 5.18 Evaluación de resultados de la relación de Poisson (μ).

Mezclas	Resistencia a compresión, f_c (kg/cm ²)		Relación de poisson, μ		$\mu/\sqrt{f'c}$		A/C
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días	
M1	160	184	0.14	0.19	0.011	0.014	1
M2	215	236	0.20	0.22	0.014	0.015	0.85
M3	283	301	0.11	0.20	0.006	0.012	0.7
M4	340	374	0.22	0.18	0.012	0.009	0.58
Promedios			0.167	0.197	0.011	0.012	

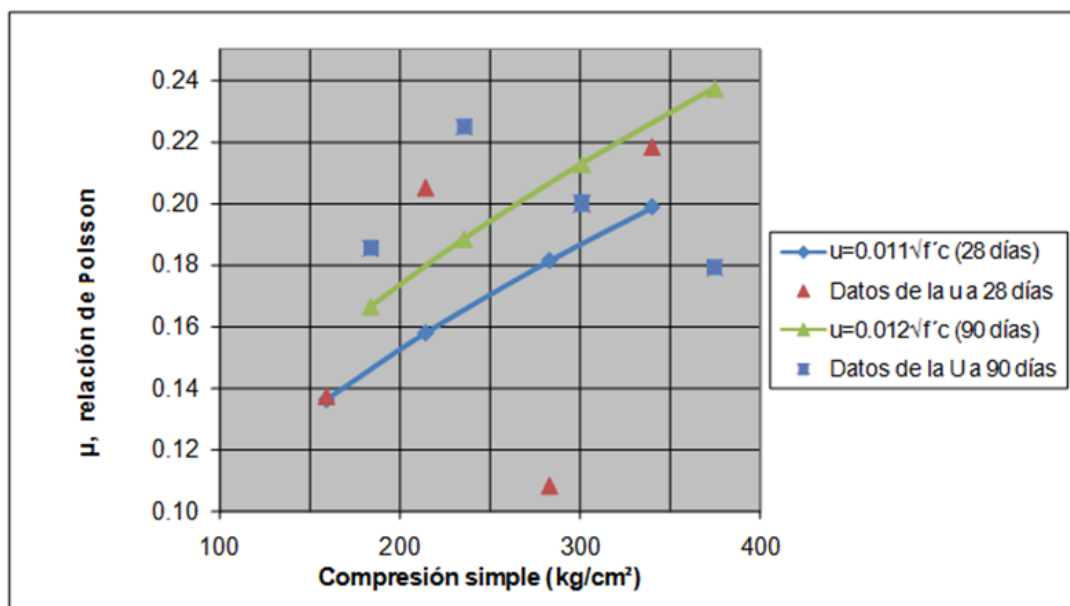


Fig. 5.34 Gráfica y expresiones para estimar la relación de Poisson a 28 y 90 días de edad.

5.2.4.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD E_c Y RELACIÓN DE POISSON μ DEL CRR REALIZADO CON CEMENTO CPP.

Las tabla 5.19 presenta los módulos de elasticidad de cada unas de las mezclas realizadas con el cemento CPP, la deformación máxima unitaria promedio que alcanzó el CCR fue de 0.0026 y 0.0025 correspondiente a los 28 y 90 días de edad. Las expresiones $17,538\sqrt{f'c}$ (28 días) y $18,091\sqrt{f'c}$ (90días).

Tabla 5.19 Evaluación de resultados de módulo de elasticidad

Mezclas	Resistencia a compresión, f_c (kg/cm ²)		Módulo de elasticidad, E_c (kg/cm ²)		Deformación unitaria máxima, E_o		$E_c/\sqrt{f'c}$		A/C
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días	
M5	145	173	229,953	260,017	0.0024	0.0026	19122	19761	1
M6	188	222	243,067	264,444	0.0028	0.0025	17729	17742	0.84
M7	267	300	257,678	290,617	0.0026	0.0023	15764	16771	0.68
					0.0026	0.0025	17538	18091	

La fig. 5.35 muestra los límites de la fórmula $17,538 \sqrt{f'c}$ que se utiliza para estimar los módulo de elasticidad con relación a la compresión simple a 28 días de los especímenes elaborados con cemento CPP 30R RS, la cual permite establecer un intervalo de valores esperados en los ensayos.

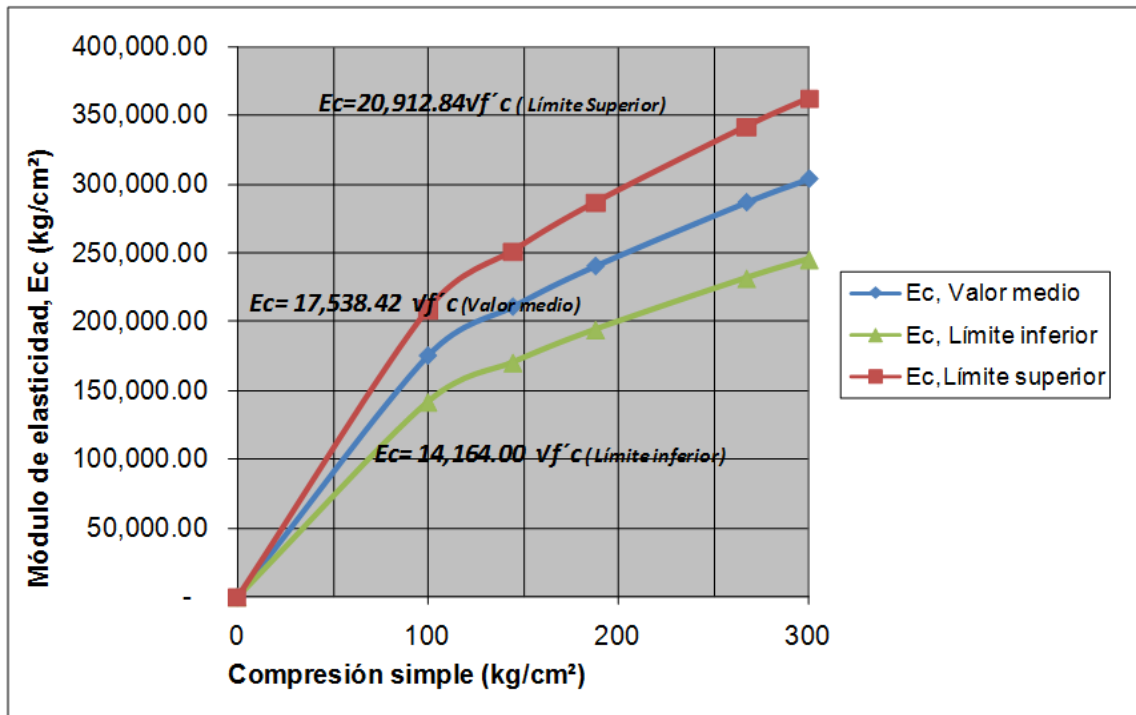


Fig. 5.35 Gráfica y expresiones para estimar el módulo de elasticidad a 28 días, con los límites superiores e inferiores.

La tabla 5.20 presenta los resultados de la relación de Poisson que relaciona la deformación transversal con respecto a su deformación axial, de las tres mezclas estudiadas se obtuvieron promedios de 0.19 y 0.15 a los 28 y 90 días de edad, respectivamente. Las expresiones para estimar la relación Poisson con relación a la resistencia de compresión simple son $0.014\sqrt{f'c}$ y $0.010\sqrt{f'c}$ correspondiente a los 28 y 90 días de edad, la gráfica de estas expresiones y valores de la μ se presenta en la figura 5.36.

TABLA 5.20 Evaluación de resultados de la relación de Poisson μ

Mezclas	Resistencia a compresión, f_c (kg/cm²)		Relación de Poisson, μ		$\mu/\sqrt{f'c}$		A/C
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días	
M5	145	173	0.22	0.16	0.019	0.012	1
M6	188	222	0.20	0.14	0.015	0.010	0.84
M7	267	300	0.14	0.15	0.009	0.009	0.68
Promedios			0.19	0.15	0.014	0.010	

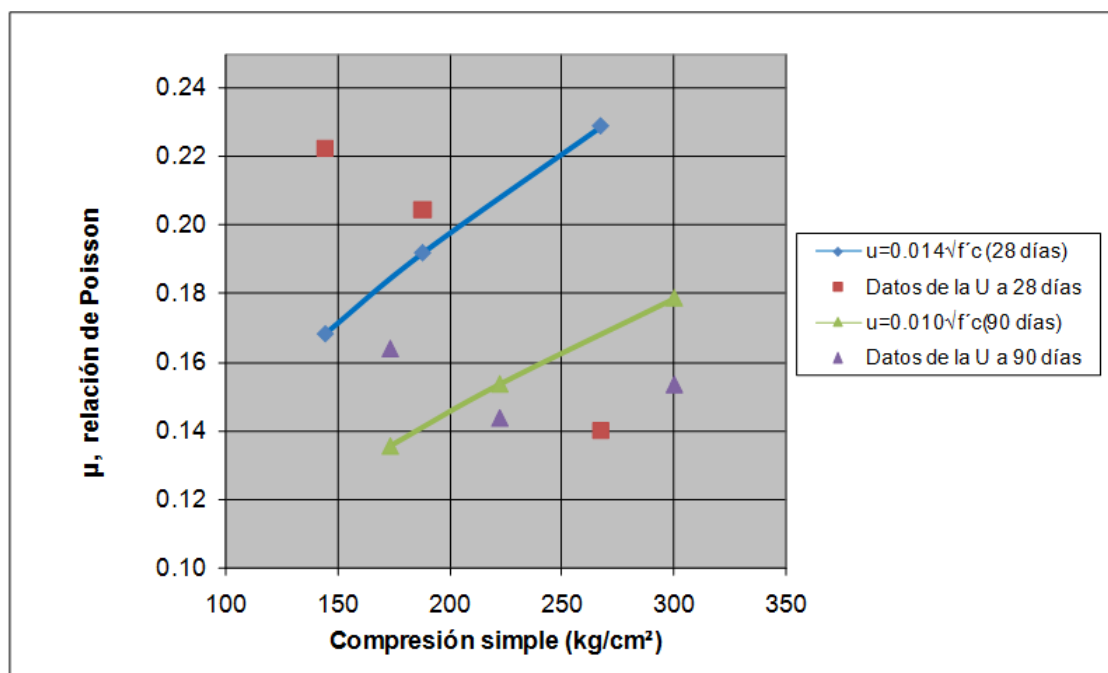


Fig. 5.36 Gráfica y expresiones para estimar la relación de Poisson a 28 y 90 días de edad.

5.3 COMPARACIÓN DEL ESTUDIO EN ESTADO ENDURECIDO CON RESULTADOS INTERNACIONALES

En esta sección se presenta la comparación de los resultados obtenidos con el concreto en estudio y proyectos internacionales de las presas de CCR.

5.3.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En la tabla 5.21 y la fig. 5.39 se presenta una comparación de resistencia de los resultados obtenidos por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (ver fig. 2.9 y fig. 2.10) y las obtenidas en el estudio, donde, las resistencias de este último son mucho mayores. La resistencia del USACE representa un 29% y 31% aproximadamente para los CCR realizados con cemento CPO y CPP, respectivamente.

El USACE utilizó gravas con un TMNA de 75 mm (3") con 30 a 40 por ciento de ceniza volante por volumen de materiales cementantes.

Tabla 5.21 Comparación de resistencia a compresión a los 28 días de edad.

Mezcla	Cemento IIUNAM (kg/m³)	Cementante USACE 1992 (Kg/m³)	Resistencia CPO (Kg/cm²)	Resistencia CPP (Kg/cm²)	Resistencia USACE 1992 (Kg/cm²)	A/C
M1	131	107	163	140	43	1
M2	143	128	204	185	54	0.85
M3	164	163	265	259	81	0.7
M4	193	189	342	357	113	0.58

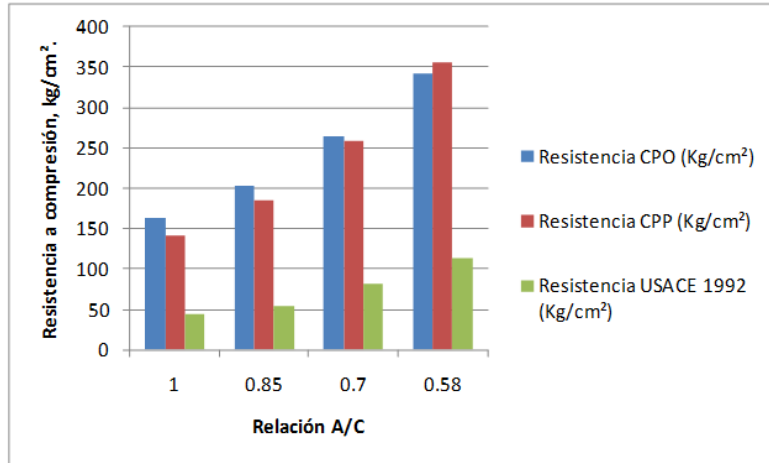


Fig. 5.39 Resistencias del CCR en estudio y el USACE(1992)

La tabla 5.22 y la fig. 5.40 se presentan las resistencias a compresión simple con relación al equivalente de cemento por m³ del CCR fabricado con cementos CPO y CPP y la norma ACI 207.5R, donde, los concretos realizados en la investigación experimental alcanzaron resistencia superiores. La resistencia del ACI 207.5R representa un 76% y 81% aproximadamente para los CCR realizados con cemento CPO y CPP, respectivamente. En este caso en particular, el ACI 207.5R no especifica el porcentaje de puzolanas que utilizo.

Tabla 5.22 Tabla de resistencia del CCR II-UNAM y el ACI 207.5R

Mezcla	Cemento kg/m ³	Resistencia CPO kg/cm ²	Resistencia CPP kg/cm ²	Resistencia ACI 207.5R kg/cm ²	A/C
M1	131	159	140	141	1
M2	143	209	185	157	0.85
M3	164	269	259	188	0.7
M4	193	337	357	233	0.58

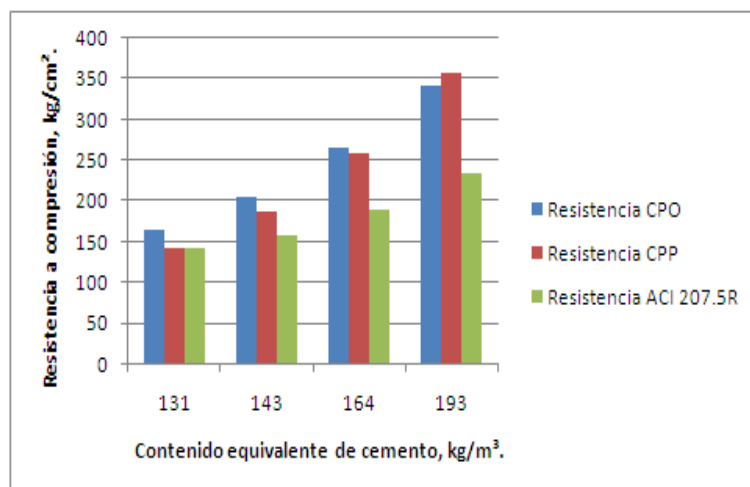


Fig. 5.40 Resistencias del CCR del estudio y el de ACI 207.5R

La diferencia en los resultados del CCR del estudio y el de los proyectos internacionales, se debe principalmente al consumo más alto de puzolanas en los concretos internacionales.

5.3.2 RESISTENCIA A TENSIÓN

Las pruebas experimentales de tensión indirecta del CCR fabricadas con cemento CPO y CPP alcanzaron valores de entre 11% y 12% de la resistencia a compresión simple. Estando dentro del intervalo que recomienda ACI 207.5R de 10% a 15%.

5.3.3 RESISTENCIA A TENSIÓN POR FLEXIÓN

Las pruebas experimentales de tensión por flexión del CCR fabricadas con cemento CPO y CPP alcanzaron valores de entre 16% y 18% de la resistencia a compresión simple. Estando dentro del intervalo que recomienda ACI 207.5R de 12 a 20%.

5.3.4 PROPIEDADES ELÁSTICAS

Los módulos de elasticidad presentados en la tabla 3.6 de proyectos de presas de CCR, tienen una relación con su resistencia a compresión de $11,405.1vf'c$ a los 28 días de edad y $12,802vf'c$ a los 28 días. Los módulos de elasticidad del CCR en estudio, obtuvieron una relación con su resistencia a compresión de $17,457vf'c$ a los 28 días y $17,852vf'c$ a los 90 días. El CCR en estudio tiene un mayor módulo de elasticidad que los CCR realizados en proyectos de presas anteriores y similares al concreto convencional.

Los valores promedios de la relación Poisson del CCR en estudio a la edad de 28 días fueron de 0.17 y 0.19 y a los 90 días de 0.20 y 0.15 con los cementos CPO y CPP, respectivamente. Los resultados de relación de Poisson obtenidos experimentalmente, están dentro del intervalo de los proyectos realizados de CCR que especifica ACI en la tabla 3.6 del orden de 0.17 a 0.22.

5.4 CONCLUSIÓN

En este capítulo se presentó la evaluación y análisis de los resultados de las pruebas del concreto compactado con rodillo en su estado fresco y endurecido, dando como resultado lo siguiente:

Las temperaturas promedio obtenidas fueron de 20.75°C y 18 °C para el CCR realizado con cemento CPO y CPP, respectivamente. Las Temperaturas del CCR son menores que el concreto convencional (del orden de 24°C promedio) debido a su bajo consumo de cemento y contenido de puzolanas.

El peso volumétrico promedio alcanzado fue de 2367 y 2371 kg/m³ para las mezclas elaboradas con cemento CPO y CPP, respectivamente. El peso volumétrico del CCR es mucho mayor que el concreto convencional (del orden de 2250 kg/m³ promedio) debido a su relación grava- arena óptima, y a su método de compactación.

El porcentaje de contenido de aire que se obtuvo fue de 2% y 1.7% para el CCR con cemento CPO y CPP, respectivamente. El porcentaje de contenido de aire es similar al concreto convencional cuando se ocupan gravas de ¾" de T.M.A.

Las resistencias obtenidas a los 28 días para el CCR con cemento CPO fueron 159, 209, 269 y 337 kg/cm² correspondiente a las relaciones A/C de 1, 0.85, 0.7 y 0.58, mientras que, para el CCR realizado con CPP fueron de 142, 185 y 275 kg/ m³ correspondiente a las relaciones A/C de 1, 0.84 y 0.68. Las resistencias del CCR en estos estudios son superiores que las del concreto convencional para las mismas relaciones.

La resistencia del CCR con cemento CPO a los 7 días es de un 76% con respecto a los 28 días de edad, y luego, se incrementa 13% a los 90 días, mientras el CCR, con cemento CPP, su resistencia es de 72% de la resistencia a 28 días, y luego se incrementa un 15% a los 90 días.

Los valores de resistencia a tensión, obtenidas mediante pruebas a flexión en vigas y en cilindros por compresión diametral, dieron lo siguiente:

a) La resistencia a tensión por flexión y compresión diametral, respecto de la resistencia a compresión simple de 28 días, es del orden de 16% y 11%, respectivamente para el cemento CPO.

b) Para el CCR realizado con CPP, la resistencia a tensión por flexión y compresión diametral es del orden de 18% y 12%, respectivamente.

Los valores de módulo de elasticidad del CCR en estudio, pueden considerarse similares a los módulos de elasticidad que se obtienen en los concretos convencionales. Dando como resultado una relación de 17,457vf'c a los 28 días y 17,852vf'c a los 90 días (promedio).

La relación de Poisson a los 28 días de edad fue de 0.17 y 0.19 para el CCR realizado con los cementos CPO y CPP, respectivamente.

La deformación unitaria máxima promedio a los 28 días de edad correspondiente al CCR con CPO y CPP resultó de 0.0025y 0.0026, respectivamente. La deformación del CCR es similar a los concretos convencionales que anda en el orden de 0.003.

Los concretos realizados en la investigación experimental alcanzaron resistencia superiores que los proyectos publicados por USACE(1992) y ACI 207.5R, debido al contenido de puzolonas que se utilizaron en las presas.

Las pruebas experimentales de tensión indirecta del CCR fabricadas con cemento CPO y CPP alcanzaron valores de entre 11% y 12% de la resistencia a compresión simple. Estando dentro del intervalo que recomienda ACI 207.5R de 10% a 15% .

Las pruebas experimentales tensión por flexión del CCR fabricadas con cemento CPO y CPP alcanzaron valores de entre 16% y 18% de la resistencia a compresión simple. Estando dentro del intervalo que recomienda ACI 207.5R de 12 a 20%.

El CCR en estudio tiene un mayor módulo de elasticidad que los CCR realizados en proyectos de presas anteriores y similares al concreto convencional

Los resultados de la relación de Poisson obtenidos experimentalmente del CCR en estudio, están dentro del intervalo que especifica ACI 207.5R de 0.17 y 0.22.

5.5 BIBLIOGRAFÍA

ACI 207.5R (1999). Roller-Compacted Mass Concretes. ACI 207.5R-99. Reported by ACI Committee 207.

ACI 211.1 (1991). Standard Practice for Selecting Proportion for Normal, Heavyweight and Mass concrete. ACI 211.1-91 Reported by ACI Committee 211.

ACI 211.3R (1997). Guide for Selecting proportions for Non-Slump Concrete. ACI 211.3R-97. Reported by ACI committee 211.

ASTM. Book of Standard, Vol. 04.02. American Society for Testing and Materials.

CAPITULO 6

6 CONSTRUCCIÓN DE PRESAS DE CCR

La formulación y evaluación de proyecto, planeación, logística y la comunicación de los participantes en la realización de presas de CCR, es esencial para el progreso y conclusión de la obra. En esta sección de la investigación, se presentan las recomendaciones constructivas de presas, tales como:

- Producción de agregado y localización de planta
- Proporcionamiento y mezclado
- Transporte y colocación
- Compactación
- Juntas de capas
- Juntas de contracción
- Curados y protección contra el clima
- Galerías y drenaje

En la fig. 6.1 se muestra el proceso constructivo de la presa Picachus en Sinaloa, México.



Fig. 6.1 Construcción de la presa Picachus

6.1 PRODUCCIÓN DE AGREGADO Y LOCALIZACIÓN DE PLANTA

El almacenamiento del agregado en pilas y la localización de la planta de concreto en el CCR, es aún más importante que para el concreto convencional. Usualmente, grandes pilas de agregados están disponibles antes de comenzar con la colocación del CCR. Algunas razones para esto son:

- Control de temperatura. Producción de agregado durante el invierno para que puedan almacenarse fríos para su uso posterior.
- Velocidad de colocación rápida. La velocidad en el uso de agregado durante la colocación del CCR puede exceder la capacidad de producción de una planta de agregado. Las grandes pilas de agregados también tienen la ventaja de contenidos de humedad más estables, lo cual reduce las variaciones en la consistencia del CCR.

- La localización y configuración de las pilas, así como los medios de incorporar y retirar agregados de las pilas debe ser coordinado con la localización de la planta de CCR y el método de alimentarla para minimizar la segregación y la variabilidad.
- La distribución de los equipos y ubicación de la planta de CCR serán solucionados para minimizar los requerimientos de energía y ser apropiados para el terreno, donde el CCR es transportado con equipos o vehículos de transporte (según la necesidad del proyecto).

6.2 MEZCLADO

Las mezcladoras para CCR necesitan cumplir con dos funciones básicas: las mezcladoras mezclarán totalmente todos los ingredientes, y tendrán capacidad suficiente para las velocidades de colocaciones altas, típicas en los CCR. Velocidades de colocación típicas son de 76 m³/h (100 yd³/h) para proyectos pequeños, 190 a más de 380 m³/h (250 a más de 500 yd³/h) para proyectos medios, y 570 a más de 760 m³/h (750 a más de 1 000 yd³/h) para proyectos grandes. Se usarán varias mezcladoras individuales para proporcionar la velocidad de producciones más altas. La(s) mezcladora(s) deberán operar con pocos o sin tiempos muertos. El programa de mantenimiento no debe de soslayarse, y las reparaciones deben realizarse rápidamente.

Los métodos utilizados para la producción de CCR han sido:

- Método de mezclado intermitente con mezcladora de tambor.
- Métodos de mezclado continuo

6.2.1 MÉTODO DE MEZCLADO INTERMITENTE CON MEZCLADORA DE TAMBOR.

El CCR se ha producido satisfactoriamente con plantas convencionales del tipo intermitente y mezcladoras de tambor. Producción más baja por volumen, sensibilidad a la secuencia de carga, descarga lenta, y acumulación de mezcla en la mezcladora son problemas comunes en la producción del CCR cuando se compara con la producción de plantas convencionales y transferencia del concreto mezclado.

Una secuencia adecuada y una velocidad de alimentación de los agregados y materiales cementantes, al momento de colocarlos en la mezcladora, son factores importantes en la minimización de los tiempos de mezclado y fabricación, tanto para las operaciones de mezcladoras intermitentes del tipo de tambor, como para mezcladoras continuas. En la fig.6.2 se presenta un mezclador de tambor.



6.2 Mezclador de tambor

Los camiones mezcladores y las plantas intermitentes móviles deben evitarse, excepto para aplicaciones de volúmenes pequeños con mezclas con contenidos de material cementante relativamente altos, y TMNA limitado a aproximadamente 25 mm (1"). Aún con este tipo de mezclas se puede anticipar descargas lentas.

6.2.2 MÉTODO DE MEZCLADO CONTINUO.

Las mezcladoras continuas diseñadas adecuadamente han manejado mezclas con TMNA de 75 mm (3") y más grandes, pero la experiencia ha mostrado que la cantidad de material más grande que 50 mm (2") no excederá aproximadamente 8%, y el tamaño máximo no excederá 100 mm (4"). Las mezcladoras continuas de tambor se han usado con éxito con TMNA de 150 mm (6").

El control de la alimentación del cemento y la puzolana precisa y consistente es particularmente importante con las plantas de mezclado continuo. Esto es especialmente cierto en las velocidades de alimentación de materiales cementantes más bajas. Manteniendo suficiente carga en los silos usando aireadores, alimentadores de paleta, o bombas alimentadoras con desplazamientos positivos, ha proporcionado alimentación de materiales cementantes precisos. Bandas pesadoras pueden proporcionar mediciones precisas de cemento, puzolanas y agregados para plantas de mezclado continuo. La limpieza diaria de las acumulaciones es también necesaria para los recipientes de las mezcladoras del tipo continuo. En la fig. 6.3 se muestra un camión de mezclado continuo.



6.3 Mezclador continuo

6.3 TRANSPORTE Y COLOCACIÓN

Los procesos de mezclado, transporte, colocación, tendido, y compactación se deben completar tan rápido como sea posible y con un traspaleo tan pequeño como sea posible. El tiempo entre el inicio del mezclado y la terminación de la compactación debe ser considerablemente menor que el tiempo de fraguado inicial de la mezcla bajo las condiciones en las que será usada. Una regla general para las mezclas con poca o sin puzolana es que la colocación, extendido y compactación debe ser completado dentro de los 45 min desde el mezclado, y preferiblemente dentro los 30 min desde el mezclado. Este límite es aplicable a mezclas en condiciones ambientales de aproximadamente 21°C y mezclas que no tienen retardante. El tiempo puede aumentar para climas más fríos y puede reducirse para climas más calientes. La baja humedad, condiciones de viento, y un sobremanejo puede disminuir la trabajabilidad y reducir el tiempo disponible para completar la compactación en menos de 45 min.

6.3.1 GUÍA PARA SELECCIÓN DE EQUIPO

El volumen de material que se requiere colocar, el acceso al área de colocación, disponibilidad de equipo para rentar, costo de la inversión para equipo nuevo y parámetros de diseño, generalmente son factores que controlan la selección del equipo y

los procedimientos a ser usados para el transporte del CCR desde la localización de la mezcladora al área de colocación. El CCR usualmente se transporta por vehículos, equipos transportadores, o una combinación de ambos.

6.3.2 CONSIDERACIONES SOBRE LA SEGREGACIÓN

El tamaño máximo del agregado y la tendencia de la mezcla a segregarse son factores importantes en la selección del equipo usado para transportar el CCR desde la planta de mezclado al área de colocación. Un concreto con TMNA de 38 mm (1½") puede ser transportado y colocado en unidades transportadoras sin agitador diseñadas para la transportación de agregados y movimiento de tierra, sin segregación objetable. Los sistemas transportadores deben diseñarse para minimizar la segregación en puntos de transferencia. Mezclas de CCR con TMNA de 75 mm (3") tiene una tendencia mayor a la segregación cuando son descargados sobre una superficie dura, pero con cuidado y procedimientos adecuados estas mezclas han sido transportadas, descargadas y remezcladas satisfactoriamente. Se puede presentar una segregación severa durante el transporte y colocación de TMNA grandes y mezclas de consistencias más secas. El diseño de mezclas de consistencias más húmedas también reducen la tendencia de las mezclas a segregarse.

6.3.3 MÉTODOS DE TRANSPORTE.

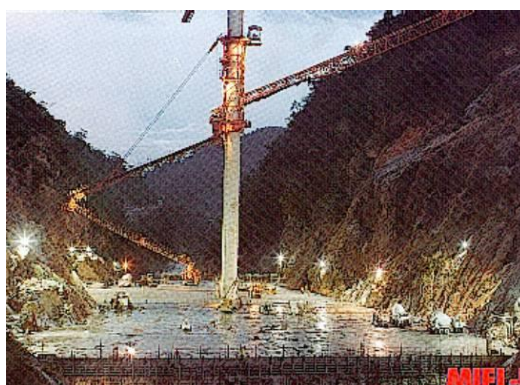
Los dos métodos principales de transporte de CCR son los equipos transportadores y los vehículos transportadores.

6.3.3.1 EQUIPOS TRANSPORTADORES

El transporte con equipos transportadores continuos de alta velocidad desde la planta de concreto directamente a la colocación masiva de CCR, en particular para presas, es lo ideal. La economía global, incluyendo los costos directos e indirectos de sistemas alternos de entrega, así como la confiabilidad, y el programa, será considerado en la decisión de usar o requerir un sistema de entrega con equipo transportador. En la fig. 6.4 se muestra el equipo transportador utilizado en una presa de CCR.

Los problemas potenciales comunes en el equipo de transporte para el CCR son:

- Transporte obstaculizado
- Segregación sobre los rodillos
- Bandas lentas, no capaces de arrancar o parar una banda cargada
- Secado
- Pérdida de pasta
- Contaminación de la capa superficial del CCR.



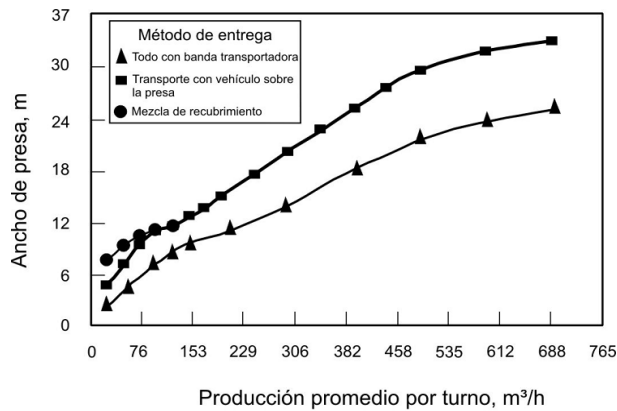
6.4 Equipo de banda transportadora

El tiempo de exposición sobre los equipos transportadores debe ser tan corto como sea posible, 5 min como tiempo deseable y 10 min como límite normal. Las velocidades de las bandas será aproximadamente de 3 a 9 m/seg. Se deberá considerar una cubierta para

la banda transportadora para proteger la mezcla del secado y de la lluvia, para todas las secciones largas y, preferiblemente, para el sistema completo.

En la fig 6.5 se compara la producción promedio típica para anchos de presas reducidas cuando se emplean vehículos de transporte en la presa. Sin una banda transportadora, la

productividad decrece a velocidades muy bajas en secciones angostas, como los de la parte superior de una presa. La fig 7.3.3.2 está basada en la recopilación de datos reales de varios proyectos y también de los tiempos registrados de los viajes redondos de las entregas en otros proyectos.



6.5 Efecto del método de entrega y ancho de la presa sobre la producción

Los sistemas de bandas transportadoras deben ser mantenidos satisfactoriamente y el contratista debe tener capacidad para repararlos fácilmente, tanto para el sistema mecánico como para el eléctrico. Si el sistema de banda transportadora se rompe, la construcción con CCR se detiene al menos que se haya planeado un sistema de transporte alternativo.

6.3.3.2 VEHÍCULOS TRANSPORTADORES

Si se tienen que usar vehículos para transportar el CCR, deberá hacerse un estudio preliminar completo del sistema de camino para el transporte. Los problemas que pueden preverse para la transportación por caminos incluyen terreno escarpado y rugoso, pérdida de material para la construcción del camino, localización de la planta, programación, y consideraciones ambientales.

Si la planta de concreto está localizada aguas arriba de la presa, el método de llevar el camino a través o sobre el sistema de la cara aguas arriba debe ser estudiado en detalle. Desde el punto de vista de la programación, la construcción de los caminos debe completarse antes de iniciar la colocación del CCR. La elevación de los caminos suficientemente rápido para mantenerlos a la par con la velocidad de elevación de la presa puede requerir de mucho tiempo que lo llevaría a ser un sistema ineficiente a elevaciones más altas. Para evitar que las operaciones de mezclado y colocación se vuelvan lentas, debe considerarse periodos de suspensión de 2 a 4 h/día para la elevación de los caminos para los vehículos durante los cuales se llevarán a cabo el mantenimiento y otros trabajos. Los caminos deben mantenerse con pendientes acordes con la capacidad de los equipos y los registros de seguridad. En la fig. 6.6 se presenta un camión volteo, que es el equipo común para transportar el CCR.



6.6 Vehículo común para transportar el CCR en presas

6.3.4 COLOCACIÓN Y DISTRIBUCIÓN

Una técnica de colocación de CCR preferida en una presa es avanzar cada capa de un empotramiento al otro. Se hace una excepción donde la distancia entre empotramientos es más corta que la distancia de la cara aguas arriba a la de aguas abajo, tales como en la parte inferior de las presas en cañones estrechos. En este caso, la colocación puede comenzar en la dirección aguas arriba-aguas abajo. Al menos que sea controlada cuidadosamente, la colocación en la dirección aguas arriba-aguas abajo se puede originar segregación a lo largo de las colocaciones laterales en los extremos que propician zonas porosas a través de la estructura. Esto puede ser particularmente crítico para mezclas de CCR con tendencia a la segregación.

Algunos proyectos han requerido la colocación de CCR con pavimentadoras, usualmente cuando van de un empotramiento al otro. Los problemas con la colocación del CCR con pavimentadoras son más serios en las mezclas con contenidos cementantes más bajos, consistencia seca, y agregados más grandes.

El tractor de orugas ha probado ser la mejor opción para esparcir el CCR, ver fig. 6.7. Los tractores de orugas son rápidos, suficientemente precisos y contribuyen a que el CCR sea compactado uniformemente. Mediante una distribución cuidadosa, un tractor puede remezclar el CCR y minimizar la segregación que se presenta durante la descarga.



6.7 Tendido de CCR por medio de tractor de oruga

Un tractor usualmente esparce el CCR en capas de material suelto de $300\text{mm} \pm 50\text{mm}$ ($12'' \pm 2''$) de espesor de manera que permita al tractor operar sobre el material sin compactar. Se prefieren tractores con banda de rodamiento de hule, o banda de rodamiento desgastada para minimizar la fractura del agregado o del CCR o de ambos. Usualmente, dos rodillos y un tractor Caterpillar Modelo D-6 (tamaño), con un tractor de

reserva, pueden esparcir y rodillar un CCR sin retardante a una velocidad aproximada de 230 a 380m³/h en capas de 300mm (12") de espesor.

Cuando se requiera que el tractor transite sobre el CCR ya compactado, el operador deberá limitar el movimiento a desplazamientos rectos hacia adelante y hacia atrás, o transitar sobre tapetes de hule, o ambos, tales como las bandas transportadoras viejas.

Los equipos esparcidores deberán dejar una superficie plana o llana de un espesor adecuado antes de que el rodillo compacte la capa. Dependiendo de la trabajabilidad de la mezcla, los lomos o escalones entre pasos adyacentes de la cuchilla del tractor puede dar como resultado un esfuerzo de compactación desigual y una calidad variable en el CCR. Como regla general, el tener una superficie plana lista para rodillar en el menor tiempo posible es más importante que tener una nivelación exacta con un rodillado diferido.

Los espesores de capas más comúnmente compactados han sido de 300 mm (12"). La tendencia es usar capas lo más gruesas posible compatibles con la mezcla de CCR y con los equipos de distribución y compactación para alcanzar la densidad mínima especificada. En Japón han sido compactadas capas más gruesas de aproximadamente 0.5 a 1.0m (1.6 a 3.2') en una capa después de haber sido distribuido con tractor en varias capas. Un espesor de 300 mm (12") es conveniente para trabajos de campo.

Otro factor que influye en el espesor de la capa es el tiempo de exposición máximo permitido antes de cubrir una capa con la siguiente. Cada proyecto debe ser estudiado para optimizar los beneficios de varios espesores de capa. Capas más gruesas implican tiempos de exposición más largos pero más pocas juntas entre capas y menores trayectorias de fugas potenciales. Capas más delgadas dan como resultado más juntas de capas pero permiten a las juntas ser cubiertas más pronto, dando como resultado una adherencia mejorada. Las proporciones de las mezclas también afectarán la trabajabilidad y consecuentemente la capacidad para alcanzar densidad uniforme para todo el espesor de la capa.

6.4 COMPACTACIÓN

6.4.1 SELECCIÓN DEL RODILLO.

En la selección de un rodillo se deben considerar los siguientes parámetros: maniobrabilidad, fuerza de compactación por unidad de ancho del tambor, tamaño del tambor, vibración, frecuencia, amplitud, velocidad de operación disponibilidad y mantenimiento requerido. La cantidad de compactación obtenida en volumen de concreto por hora, obviamente se incrementa con el tamaño físico y la velocidad del rodillo. Rodillos grandes no pueden operar cerca de cimbras u obstáculos, por lo que rodillos más pequeños o equipos de compactación manuales, se requieren usualmente para compactar el CCR en estas áreas.

La mayor parte de la experiencia ha mostrado que los rodillos con una frecuencia más alta y una amplitud más baja compacta el CCR mejor que los rodillos con una alta amplitud y una frecuencia más baja, aunque se han alcanzado resultados aceptables en algunos proyectos usando rodillos con ambas frecuencias y amplitudes altas. El compactador típico es un rodillo de 10T (10 160 kg) de tambor doble o sencillo con una fuerza dinámica de al menos 8 kg/mm de ancho de tambor ver fig. 6.8. Estos rodillos son frecuentemente usados para la compactación de asfalto y material granular. Rodillos más grandes de 15 y 20T (15 240 y 23 320 kg) con más masa y tamaño, usados típicamente en las construcciones de

enrocamiento, se han usado con CCR, pero usualmente tienen amplitudes más grandes, bajas frecuencias, son menos apropiados para la graduación de agregados usada en CCR. Alcanzar la densidad requerida y una buena interfaz en la unión de las capas es más difícil con estos rodillos más grandes.



6.8 Compactación del Rodillo vibratorio sobre la capa de CCR

En áreas estrechas, tales como las adyacentes a las cimbras y cercanas a las rocas de la superficie, los pisonos compactadores de gran potencia son más apropiados.

6.4.2 PASES MÍNIMOS Y ESPESORES DE CAPA

El número mínimo de pases para un rodillo vibrador dado para alcanzar la compactación especificada depende principalmente de la trabajabilidad de la mezcla de CCR y del espesor de la capa. La experiencia muestra que el espesor de capa máximo estará gobernado más por que tan fresca está la mezcla en el momento de la compactación, por la granulometría de los agregados, y por la efectividad del tractor que esparce la mezcla, que por el número de pases del rodillo. Como regla general, el espesor de cualquier capa compactada de CCR debe ser al menos tres veces el diámetro del TMNA.

Algunas especificaciones de compactación requiere que el primer pase sea en el modo estático para consolidar inicialmente el CCR y prevenir que el rodillo se hunda con las mezclas de consistencia húmeda. Mezclas más secas pueden comenzar con el modo de vibración. La frecuencia y amplitud fijadas pueden tener que ajustarse dependiendo de la trabajabilidad de la mezcla. La compactación más efectiva usualmente se presenta con una frecuencia alta del orden de 1 800 a 3 200 vibraciones por minuto y con una baja amplitud, aproximadamente del orden de 0.4 a 0.8 mm. Las cargas y vibraciones transmitidas dan como resultado la consolidación en mezclas de consistencia húmeda con un tiempo Vebe medible. Los mismos intervalos de frecuencias y amplitudes han sido también muy efectivos en la compactación de mezclas de consistencia más seca.

Usualmente, con cuatro a seis pases de rodillo vibratorio con tambor doble de 10T (9 072kg) se alcanzará la densidad deseada para las capas de CCR en el intervalo de 150 a 300 mm de espesor. Esto supone una compactación oportuna con equipo apropiado. Debe evitarse una sobrecompactación o un rodillado excesivo. Un rodillado excesivo puede reducir la densidad en la parte superior de la capa. La compactación en capas gruesas después de su esparcido en capas más delgadas puede ser efectiva con algunas mezclas de CCR. Este procedimiento requiere una mezcla de CCR con un tiempo Vebe en el intervalo de 10 a 30 seg; para alcanzar una compactación efectiva con el tractor durante el esparcido del concreto se puede requerir una mezcla de CCR con retardador de fraguado, y puede requerir de pases de rodillo en la parte superior de la capa.

6.4.3 OPORTUNIDAD Y PROCEDIMIENTO

La compactación debe ser terminada tan pronto como sea posible después de que el CCR es esparcido, especialmente en climas cálidos. Usualmente, la compactación se especifica que sea terminada dentro los 15 minutos después del esparcido y dentro los 45 min del inicio del mezclado. Se puede esperar una reducción importante en los valores de la resistencia si el CCR es compactado cuando han pasado más de 30 a 45 minutos de iniciado el mezclado y la temperatura de la mezcla es de aproximadamente 21°C o más alta. Estos tiempos pueden ser incrementados en mezclas de CCR con un tiempo de fraguado incrementado debido al uso de puzolanas, aditivos, o temperaturas más frías.

La superficie de la mezcla de CCR fresca debe ser esparcida lo más lisa posible para que al tambor del rodillo produzca una presión de compactación uniforme bajo el ancho completo del tambor. Si la superficie de la capa no compactada de un CCR menos trabajable no es lisa, el tambor puede sobrecompactar los montículos y subcompactar las oquedades.

Cada mezcla de CCR tendrá un desempeño característico propio para su compactación dependiendo de la temperatura, humedad, viento, trabajabilidad de la mezcla, contenido de agregados finos y plasticidad, granulometría general, y TMNA.

6.5 JUNTAS DE CAPAS

6.5.1 DESARROLLO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE CAPAS

Las juntas horizontales son inevitables en CCR masivo debido a su método de construcción en capas o alzadas. Cada capa es del espesor del material esparcido. Las alzadas pueden ser compactadas como alzadas individuales, o varias capas pueden ser esparcidas antes de compactarlas como una alzada antes del fraguado inicial del CCR. Para la estabilidad al deslizamiento, resistencia de las juntas al cortante o la impermeabilidad, los diseños usualmente requieren superficie de juntas relativamente frescas y limpias con buena adherencia. Esto se hace usualmente con el empleo de un camión aspirador grande o con chiflón de aire.

Cuando una capa de CCR no se cubre con CCR adicional antes de que se alcance el fraguado inicial, se forma una junta fría. Una junta fría puede ser caracterizada generalmente por la madurez de la junta, la cual es el resultado de la temperatura superficial promedio (TSP) y el tiempo de exposición (TE). La madurez de la junta es expresada en grados-hora y es calculada como:

Madurez de la junta en °C-hr = (TSP)x(TE)

Por ejemplo, para 14.5 h de exposición a una temperatura promedio de 21°C

Madurez de la junta = 21 x 14.5 = 304.5°C-h

Las juntas también son sensibles a la cantidad y características del material cementante y de la efectividad de los aditivos retardantes del fraguado. Cada situación es diferente, pero a una temperatura superficial aproximada de 21°C (70 F), una junta fría usualmente empieza a presentarse en un CCR sin retardante aproximadamente a las 4 h y la mayor

parte de las veces se desarrolla en 6 h. Una junta que ha sido expuesta menos de 6 h antes de ser cubierta por la siguiente capa tendrá una resistencia al cortante adecuada, pero puede no ser impermeable al menos que se limpie y se cubra con una mezcla de liga fluida o una mezcla de CCR con alto contenido de cementante a una madurez de 260 a 815°C-h (500 a 1 500 F-h). Después de aproximadamente 260°C-h (500 F-h) puede ser necesaria una mezcla de liga para alcanzar la resistencia a cortante o tensión requeridas. El límite de madurez exacto para cada proyecto depende de la mezcla y de los requisitos de diseño.

6.5.2 TRATAMIENTO DE LA JUNTA DE LAS CAPAS

Las juntas de las capas serán conservadas continuamente húmedas y protegidas del secado o congelación antes de colocar la siguiente capa y para curar la superficie final. La superficie estará limpia y en o cerca de, condición saturada y superficialmente seca (SSS) inmediatamente antes de la colocación de la siguiente capa de CCR.

La limpieza de la capa de CCR se realizara con el chiflon de aire, cuando este se encuentre por debajo de la condición SSS. Si la superficie tiene una edad mayor a 1 o 2 días y ha endurecido suficientemente, el lavado será con agua a alta presión. Cualquier otro tipo de contaminación en la capa debe ser evitada.

Las mezclas de CCR generalmente no tienen sangrado ni presentan segregación de finos en la superficie. Una excepción se tiene con las mezclas muy fluidas y algunos casos de mezclas secas después de días de curado húmedo. Si no hay capa débil por segregación de finos, recubrimientos o depósitos, u otra contaminación en la superficie, la limpieza en la junta de las capas, usualmente requerida en los concretos convencionales, no es necesaria..

Para permitir la continuidad de capas de CCR se requerirá el uso de mortero de liga, donde el concreto se compactara dentro de la capa de liga. Muchos proyectos de CCR han usado un concreto convencional con alto consumo de arena o mezcla de mortero como mortero de liga con buenos resultados. La mezcla debe tener al menos 150mm (6") de revenimiento y puede ser retardada en su fraguado usando aditivos. La capa de liga deberá ser suficientemente gruesa para llenar las irregularidades sin que llegue a ser demasiado gruesa. Donde se use concreto en la capa de liga, es deseable emplear agregado grueso de 9.5 a 20 mm (3/8 a 3/4") de tamaño máximo.

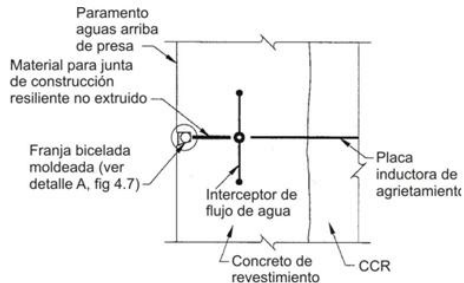
El espesor de la capa de concreto de liga tendrá en promedio la dimensión de la partícula de agregado más grande en la mezcla. Donde se use mortero para la mezcla de liga, el espesor es generalmente de aproximadamente 6mm (1/4"). La resistencia a compresión para las mezclas de liga será más grande que la del CCR. Espesores excesivos del mortero de liga puede propiciar bombeo y dificultar la compactación de la sobrecapa de CCR.

6.6 JUNTAS DE CONTRACCIÓN

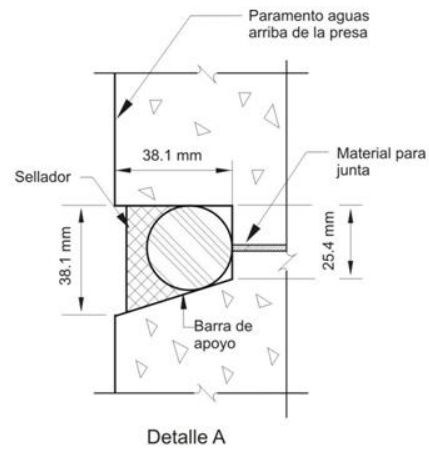
Las juntas de contracción son una parte importante del diseño de presas de CCR. El control de las filtraciones incluye muchos métodos tales como: a) construcción de una junta de contracción mediante la inducción de una discontinuidad en la presa; b) colocación de una membrana impermeable en la cara aguas arriba; c) construcción de una cara de concreto reforzado aguas arriba; y d) sin medidas específicas. La construcción de juntas de contracción puede tener desde un mínimo hasta un impacto significativo en la producción y calidad del CCR colocado. En las presas de CCR con una longitud de corona corta o volúmenes pequeños, la instalación de las juntas de contracción puede hacer lenta la producción en forma significativa lo cual puede reducir los beneficios de colocación rápida del CCR.

La construcción de las juntas de contracción puede ser:

- Grieta superficial y control de filtraciones,
- Juntas detalladas con sellos, drenes y tubos para inyección de lechada.



6.9 Detalle de junta de contracción

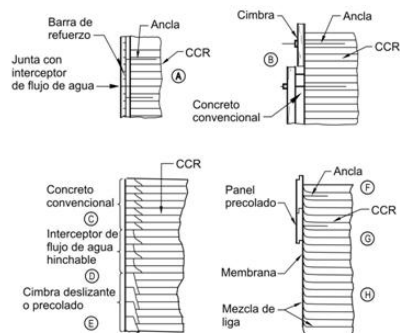


6.10 Sello de junta de contracción en la cara aguas arriba

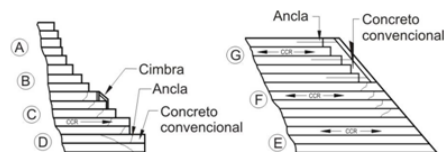
6.7 CIMBRAS Y PARAMENTOS

6.7.1 ASPECTOS GENERALES.

Las áreas superficiales grandes que no son horizontales, tales como los paramentos de las presas aguas arriba y aguas abajo, pueden ser formadas casi a cualquier pendiente o configuración deseada, pero debe darse una consideración especial al anclaje, a la apariencia y a la técnica. Algunos de los métodos más comúnmente utilizados a la fecha se discuten brevemente a continuación, después de los comentarios finales. Las figuras 6.11 y 6.12 presentan los paramentos de las presas de CCR.



6.11 Opciones para el revestimiento aguas arriba



6.12 Opciones para el revestimiento aguas abajo

La altura de las cimbras en voladizo con pendiente, tales como para la superficie de los vertedores o las cimbras para el paramento aguas abajo, restringen las áreas accesibles a los rodillos vibradores. Estas cimbras, por tanto, deben limitarse en altura o estar articuladas a mitad de altura para reducir el volumen del concreto que debe ser colocado debajo de la inclinación con métodos convencionales. Los anclajes convencionales para fijar el avance de la cimbra pueden no tener una profundidad de empotramiento adecuado para soportar la cimbra cuando se anclan en CCR de baja resistencia y, usualmente, se requieren anclajes especiales.

El manejo y avance convencional de la cimbra puede llegar a ser un factor limitante en la velocidad de colocación del CCR. Cerca de la parte superior de una presa, donde el volumen del CCR por capa es pequeño y el área de la cimbra para las caras aguas arriba y aguas abajo es relativamente grande, se puede requerir de más tiempo para colocar y retirar la cimbra que el que se necesita para colocar el CCR.

6.7.2 FORMACIÓN DE LOS PARAMENTOS.

Una manera de formar las caras aguas arriba y aguas abajo es usando máquinas motorizadas para la construcción de los paramentos con cimbra deslizante y concreto convencional o elementos de fachada contra los cuales la colocación del CCR se puede iniciar a las aproximadamente 8 horas posteriores. Este método es más aplicable en los valles amplios y proyectos grandes donde la velocidad del levantamiento del CCR no excede la velocidad de la cimbra deslizante. En la presa Upper Stillwater fue posible mantener una velocidad de producción promedio de levantamiento vertical de 0.6m por día, teniendo los paramentos suficiente tiempo para desarrollar la resistencia necesaria.

6.7.3 CIMBRAS DE CONCRETO PRECOLADO.

Paramentos verticales y con mucha pendiente también se pueden construir con paneles de concreto precolado o bloques. Los paneles de concreto precolado consisten en losas de concreto de alta calidad, relativamente delgadas con apoyos integrados o externos, o ambos, para su montaje. Estos paneles pueden incorporar aislantes para proteger al concreto interior en regiones extremadamente frías. También pueden incluir una membrana impermeable flexible para trabajo rudo unida a la parte posterior del panel para proporcionar restricción al paso de agua.

6.7.4 EXTREMOS INCLINADOS NO COMPACTADOS

Si no se compactan los extremos del CCR depositado, los lados tendrán un ángulo de reposo natural de aproximadamente 50° (0.8 H : 1.0 V) con agregado triturado y 48° (0.9 H : 1.0 V) con agregado redondeado. Esto supone un cuidado razonable en el esparcido y la compactación. Cualquier medio para contener el concreto suelto en el extremo (por ejemplo, moldeando la altura de la capa, soportando el molde del extremo con pernos fijados temporalmente dentro del CCR, o por otros medios mecánicos) puede ser usado para construir paramentos con mayor pendiente. En algunos proyectos, la cara expuesta del CCR ha sido devastada después de la compactación y antes de que el CCR haya desarrollado una resistencia significativa.

6.7.5 PARAMENTOS MOLDEADOS.

Se pueden usar moldes convencionales en las caras aguas arriba o aguas abajo con el CCR o con el concreto convencional colocado contra los moldes. Cuando el CCR es colocado directamente contra los moldes, la superficie del CCR resultante puede tener una calidad relativamente pobre (no agradable a la vista y porosa) al menos que se dé una atención particular a la colocación y al tipo de mezcla usada contra la cimbra. Se ha usado un concreto convencional con retardante de fraguado para proporcionar apariencia de concreto convencional y una protección de la estructura contra el efecto

de la congelación y el deshielo. También, se ha usado un concreto convencional con retardante de fraguado para los paramentos para reducir efectivamente el número de juntas horizontales en el paramento mediante la vibración subsecuente de las capas juntas en la cara aguas arriba. La secuencia de colocación: colocar primero el CCR, seguido por el concreto del paramento contra el concreto amontonado y luego el esparcido del CCR, se ha llevado a cabo en numerosos proyectos. Ambos métodos tienen beneficios y

problemas potenciales asociados con los procedimientos. La colocación del CCR primero tiene el beneficio de una construcción más rápida lo cual puede mejorar otros aspectos de la construcción del CCR. Sin embargo, el extremo lateral del CCR y la calidad de la interfaz CCR/concreto convencional son cuestionables. El amontonamiento del concreto contra la cimbra seguido por el CCR puede ser algo más lento y se requiere propiedades especiales de trabajabilidad para el concreto del paramento. La compactación del CCR sobre el concreto del paramento puede originar deformación del CCR y del concreto del paramento de consistencia más húmeda. Se están realizando experimentos para mejorar la interfaz CCR/concreto convencional.

6.8 CURADOS Y PROTECCIÓN CONTRA EL CLIMA

Después de que el CCR ha sido colocado y compactado, la superficie de la capa debe ser curada y protegida, como se hace con el concreto colocado con los métodos convencionales. La superficie debe ser mantenida en condición húmeda, o al menos que la humedad no escape. También deberá protegerse de temperaturas extremas hasta que alcance resistencia suficiente. La construcción de CCR debe ser suspendida cuando la lluvia exceda de aproximadamente 2 a 3 mm/h (0.1 in/hr).

Cuando se usan vehículos sobre la superficie de la capa durante la lluvia, las llantas pueden transformar la superficie en un material suave dañado. Esta situación puede requerir esperar a que el CCR endurezca para efectuar una limpieza extensa y remover la superficie completa de la capa.

Cuando se usan equipos transportadores para las entregas, y se requiere poco o ningún tráfico vehicular sobre el CCR, la construcción puede continuar con una lluvia ligera. Esto puede requerir una reducción en la cantidad de agua de mezclado usada debido a la humedad más alta y la pérdida del secado superficial.

Inmediatamente después de que una capa de CCR ha sido compactada, el CCR no resultará dañado por una lluvia ligera a moderada, si no hay arrastre o tráfico sobre la superficie. Después de una lluvia, el arrastre sobre la superficie puede reiniciarse solamente después de que la superficie ha empezado a regresar naturalmente a una condición saturada-superficialmente seca. Una ligera pendiente de la superficie de la capa, generalmente pendiente descendente hacia la cara aguas arribas de la presa ayudará en el drenaje del agua libre y en la rapidez de reanudación de las operaciones de colocación.

El curado durante la construcción se ha llevado a cabo con pipas de agua modificadas para los proyectos más grandes, y con mangueras manuales para todos los tamaños de proyectos. Las pipas pueden estar equipadas con boquillas atomizadoras que aplica una fina niebla que no lava o erosiona la superficie. Se debe tener cuidado para que el camión haga una mínima cantidad de viajes, para evitar el maltrato a la superficie. Mantener el acceso de entrada y salida en cada capa durante la construcción puede ser un problema que haga impráctico el empleo de camiones. En numerosos proyectos se

han usado exitosamente tanque de agua y tuberías para transportar agua a la presa para su distribución con rociadores y mangueras manuales en lugar de pipas.

La capa final de CCR será curada generalmente por un tiempo aproximado, superior a 14 días. Los compuestos de membrana de curado no son recomendados.

El calor de hidratación generado por la masa de CCR y la secuencia de colocación continuada se pueden combinar para permitir la colocación en clima frío, aun cuando las

condiciones ambiente ocasionalmente caigan por debajo de la temperatura de congelación, cuidando que la superficie permanezca al menos 1°C arriba de la temperatura de congelación hasta que sea cubierta por la capa subsecuente.

6.9 GALERIAS Y DRENAJE

Hay varios enfoques diferentes para la construcción de galerías en la masa de la presa. Un método es mediante el encofrado convencional, y otro es mediante la colocación de grava o agregado fino en esa parte de la capa de CCR donde se localiza la galería requerida, y posteriormente retirar este material para abrir la galería. La superficie interior que resulta de esto último permite la inspección del CCR después de que todo el material suelto es removido, pero la rugosidad del material de relleno permanece y algo de él se adherirá al CCR. Un método para subsanar esto es mediante el uso de separadores de madera entre el CCR y el relleno a medida que se coloca cada capa. Un aspecto crítico de cualquier sistema de cimbrado es que se requiere suficiente rigidez para que el CCR pueda compactarse totalmente contra la cimbra. Segregación, bolsas de grava, y CCR menos denso son típicos de las caras de la galería cuando la cimbra y el contraventeo es insuficiente o se usan mezclas de consistencia más secas. Otro método que ha sido efectivo es colocar el CCR en la parte superior de la galería y luego removerlo con un excavador antes de que alcance mucha resistencia. Usualmente se emplean losas de concreto precoladas para el techo de las galerías. También se han usado secciones de concreto precolado instaladas como recubrimiento permanente de la galería. Frecuentemente se prefiere el CCR expuesto en las galerías para que los escurrimientos puedan drenar libremente en la galería y permitir la inspección de las condiciones interiores de la presa.

En la construcción de las galerías se deben considerar tanto los aspectos de los costos directos como de los costos indirectos debido a una construcción más lenta. El empleo del método de construcción de relleno no cimbrado agrega aproximadamente de 10 a 15% al tiempo de colocación de la capa ejecutada, mientras que un cimbrado más complejo y los métodos de precolados pueden agregar 20 a 30% al tiempo de colocación.

Se han usado los drenes de grava, concreto poroso, y tubos de drenaje porosos para coleccionar los escurrimientos y aliviar la presión. En algunos casos, estas técnicas pueden ser usadas en lugar de una galería. También se han barrenado agujeros de drenaje desde las juntas de construcción planeadas del CCR a las galerías y desde las galerías hasta adentro del CCR. Este barrenado puede comenzarse pronto, después de que el CCR es compactado y usualmente se hace con equipo para taladrar de percusión rotatorio.

6.10 CONCLUSIÓN

- El proyecto, planeación y logística para la construcción con CCR es diferente que para construcciones de concreto masivo convencional. En lugar de construcciones verticales con bloques monolíticos independientes, las construcciones de CCR involucran colocaciones de capas relativamente delgadas sobre una superficie grande. Las colocaciones de concreto masivo convencional usualmente requieren de una alta relación de horas-hombre a volumen colocado debido a las actividades de mano de obra intensiva, tales como superficies moldeadas, preparación de las juntas, y la compactación del concreto con vibradores de inmersión. Usualmente, el CCR tiene una relación más baja de horas-hombre a volumen colocado debido al uso de equipo mecánico para esparcir y compactar la mezcla, menos superficies moldeadas, y reducidas interrupciones para limpieza de juntas. Se requiere más trabajo y atención para proporcionar un curado húmedo para el CCR debido a que los compuestos de curado que forman membrana están prohibidos por sus efectos adversos en la unión de las capas.
- Son esenciales la planeación y preparación de materiales, accesos, partes embebidas, y limpieza de la cimentación y de las capas, antes de comenzar con la colocación del CCR. También es esencial que las líneas de comunicación entre el ingeniero y el contratista estén bien establecidas de manera que puedan resolver rápidamente los problemas y el cumplimiento con las especificaciones que puedan afectar el progreso de la obra. Interrupciones y retardos en el avance de la obra generalmente originan juntas y CCR de calidad reducida, así como un incremento en el costo.
- Equipos, abastecimiento de combustible, cimbra, y conjunto de objetos embebidos deben ser totalmente programados y planeados de tal manera que la mayor parte de este trabajo se lleve a cabo fuera de la superficie del CCR y durante el cambio de capa o programado en tiempos muertos. Todos los vehículos y personal no necesario debe mantenerse fuera del área de colocación y de la trayectoria de los equipos.

6.11 BIBLIOGRAFÍA

Future Trend in Roller Compacted Concrete Dam Construction
By M.R.H Dunstan

Roller Compacted Mass Concrete
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-89

Roller Compacted Mass Concrete
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-11

Roller Compacted Concrete for Dams
State of the Art
By Ernest K. Shrader

CAPITULO 7

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- El CCR se define como un concreto compactado con rodillos de compactación; que en su estado fresco, soportara un rodillo (vibratorio) mientras está siendo compactado.
- El intervalo de contenido de material cementante en el CCR ha variado de 60 hasta 300 kg/m³.
- El CCR puede ser fabricado con cualquiera de los tipos básicos de cemento Portland recomendados por el ASTM C-150 y ASTM C-595.
- Las puzolanas que se han utilizado en el CCR han sido las de clase C, F y N, que cumplan con la norma ASTM C-618, con los siguientes objetivos:
 1. Como remplazo parcial del cemento para reducir la generación de calor;
 2. Como remplazo parcial de cemento para reducir su costo; y
 3. Como un aditivo para proporcionar finos complementarios para trabajabilidad y volumen de pasta de la mezcla.
- Los agregados en el CCR pueden no cumplir con los estándares o requerimientos para el concreto convencional. Sin embargo, se recomienda ajustarse a la norma ASTM C-33/NMX C-111 para la granulometría de los agregados.
- Los finos que pasan la malla No.200 pueden ser utilizados para mejorar la compactación (Agregados finos, cemento y puzolanas). Su proporción en las mezclas de CCR varía aproximadamente de 8 a 12% de los sólidos totales por volumen o de 12 a 16% por peso.
- El Agua en el CCR se recomienda que esté libre de cantidades excesivas de álcalis, ácidos, o materia orgánica.
- Los aditivos químicos más comúnmente utilizados son los tipos A (reductor de agua) y D (reductor de agua y retardante), que cumplan con la norma ASTM C 494.
- Los métodos de diseño generalmente utilizados en el CCR son:
 1. Método del cuerpo de ingenieros
 2. Método de alto contenido de pasta
 3. Método Presa compactada con rodillo
 4. Método de máxima densidad
- Las edades de los especímenes para ensayos de resistencia, usualmente son, de 7, 28, 90, 180 días y 1 año para indicar la característica de incremento de resistencia de cada mezcla.

- Ajustes en el porcentaje de agregado con base en la granulometría combinada requerida; corrección del peso de las dosificaciones por el contenido de humedad de los agregados; y ajustes en el contenido de agua para la consistencia deseada o grado de trabajabilidad con base en la compactabilidad de la mezcla.

- La trabajabilidad en el CCR se mide con la mesa vibratoria Vebe, generalmente en un rango de 10 a 45 seg.

- Es importante seleccionar bien la graduación de los agregados para evitar la segregación, y obtener mezclas de CCR con mayores pesos volumétricos.

- La resistencia a compresión del CCR es función de la relación agua-material cementante (a/mc) solamente para mezclas con tiempos Vebe inferiores a 45 seg, pero usualmente en el intervalo de 15 a 20 seg.

- La resistencia a compresión de mezclas de CCR no consolidadas totalmente, se diseñan por la relación Humedad-Densidad. Hay un contenido óptimo de humedad que produce una densidad seca máxima para un cierto esfuerzo comparable.

- Los aspectos a destacar del CCR acerca del material cementante y el desarrollo de los ensayos y resultados experimentales del agregado fino y grueso, son:
 1. En la investigación se emplearon los cementos CPO 30R y CPP 30R RS.
 2. Se especificaron los usos de los cementos
 3. Los agregados pétreos empleados en el estudio son arena andesítica y grava caliza.
 4. El porcentaje de finos de la arena andesítica excedía el 5%, con 18.49% en promedio de las muestras empleadas para las mezclas.
 5. La granulometría de los agregados pétreos no se encontraba dentro de los límites que establece la norma ASTM C33.
 6. El agua utilizada fue de la red hidráulica universitaria.
 7. No se usó aditivo en la fabricación de CCR

- Los dos tipos de cemento se utilizaron para tener una comparación entre las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, ambos ocuparon agregados calizos y andesíticos con una relación G/A=1.2 equivalente a 55% de grava y 45% de arena. En las tablas 4.13 y 4.14 se presentan las proporciones de mezclas que se realizaron.

Tabla 4.13 Proporciones de CCR con cemento CPO 30R

Mezclas	Materiales por m ³				Relación A/C
	Cemento (kg)	Arena andesítica (kg)	Grava caliza (kg)	Agua (lt)	
M1	130.9	843.2	1030.6	130.9	1.00
M2	142.5	843.2	1030.6	121.2	0.85
M3	164.1	843.2	1030.6	114.8	0.70
M4	192.9	843.2	1030.6	110.0	0.57

Tabla 4.14 Proporciones de CCR con cemento CPP 30R RS

Mezclas	Materiales por m ³				Relación A/C
	Cemento (kg)	Arena andesítica (kg)	Grava caliza (kg)	Agua (lt)	
M5	130.9	843.2	1030.6	130.9	1.00
M6	144.2	843.2	1030.6	121.2	0.84
M7	168.9	843.2	1030.6	114.8	0.68

A continuación se presenta la evaluación y análisis de los resultados de las pruebas del concreto compactado con rodillo en su estado fresco y endurecido, dando como resultado lo siguiente:

- Las temperaturas promedio obtenidas fueron de 20.75°C y 18 °C para el CCR realizado con cemento CPO y CPP, respectivamente. Las Temperaturas del CCR son menores que el concreto convencional (del orden de 24°C promedio) debido a su bajo consumo de cemento y contenido de puzolanas.
- El peso volumétrico promedio alcanzado fue de 2367 y 2371 kg/m³ para las mezclas elaboradas con cemento CPO y CPP, respectivamente. El peso volumétrico del CCR es mucho mayor que el concreto convencional (del orden de 2250 kg/m³ promedio) debido a su relación grava- arena óptima, y a su método de compactación.
- El porcentaje de contenido de aire que se obtuvo fue de 2% y 1.7% para el CCR con cemento CPO y CPP, respectivamente. El porcentaje de contenido de aire es similar al concreto convencional cuando se ocupan gravas de ¾" de T.M.A.
- Las resistencias obtenidas a los 28 días para el CCR con cemento CPO fueron 159, 209, 269 y 337 kg/cm² correspondiente a las relaciones A/C de 1, 0.85, 0.7 y 0.58, mientras que, para el CCR realizado con CPP fueron de 142, 185 y 275 kg/ m³ correspondiente a las relaciones A/C de 1, 0.84 y 0.68. Las resistencias del CCR en estos estudios son superiores que las del concreto convencional para las mismas relaciones.
- La resistencia del CCR con cemento CPO a los 7 días es de un 76% con respecto a los 28 días de edad, y luego, se incrementa 13% a los 90 días, mientras el CCR, con cemento CPP, su resistencia es de 72% de la resistencia a 28 días, y luego se incrementa un 15% a los 90 días.
- Los valores de resistencia a tensión, obtenidas mediante pruebas a flexión en vigas y en cilindros por compresión diametral, dieron lo siguiente:
- La resistencia a tensión por flexión y compresión diametral, respecto de la resistencia a compresión simple de 28 días, es del orden de 16% y 11%, respectivamente para el cemento CPO.
- Para el CCR realizado con CPP, la resistencia a tensión por flexión y compresión diametral es del orden de 18% y 12%, respectivamente.

- Los valores de módulo de elasticidad del CCR en estudio, pueden considerarse similares a los módulos de elasticidad que se obtienen en los concretos convencionales. Dando como resultado una relación de $17,457\sqrt{f'c}$ a los 28 días y $17,852\sqrt{f'c}$ a los 90 días (promedio).
- La relación de Poisson a los 28 días de edad fue de 0.17 y 0.19 para el CCR realizado con los cementos CPO y CPP, respectivamente.
- La deformación unitaria máxima promedio a los 28 días de edad correspondiente al CCR con CPO y CPP resultó de 0.0025 y 0.0026, respectivamente. La deformación del CCR es similar a los concretos convencionales que anda en el orden de 0.003.
- Los concretos realizados en la investigación experimental alcanzaron resistencia superiores que los proyectos publicados por USACE(1992) y ACI 207.5R, debido al contenido de puzolonas que se utilizaron en las presas.
- Las pruebas experimentales de tensión indirecta del CCR fabricadas con cemento CPO y CPP alcanzaron valores de entre 11% y 12% de la resistencia a compresión simple. Estando dentro del intervalo que recomienda ACI 207.5R de 10% a 15% .
- Las pruebas experimentales tensión por flexión del CCR fabricadas con cemento CPO y CPP alcanzaron valores de entre 16% y 18% de la resistencia a compresión simple. Estando dentro del intervalo que recomienda ACI 207.5R de 12 a 20%.
- El CCR en estudio tiene un mayor módulo de elasticidad que los CCR realizados en proyectos de presas anteriores y similares al concreto convencional
- Los resultados de la relación de Poisson obtenidos experimentalmente del CCR en estudio, están dentro del intervalo que especifica ACI 207.5R de 0.17 y 0.22.

7.2 RECOMENDACIONES

En la normalización de la República Mexicana no se contempla este tipo de concreto, a pesar de que ha tenido y tendrá demanda en los proyectos de presas y pavimentos. La información aquí presentada será de gran ayuda para regularizar, reglamentar y mejorar la calidad del Concreto Compactado con Rodillo en Presas.

Es indispensable ampliar la investigación, tales como:

- Realizar mezclas de CCR con otros tipos de agregados utilizados a nivel nacional
- Aplicar la combinación de cemento y puzolana, para hacer más económica las mezclas y reducir las temperaturas de calor del concreto.
- Utilizar aditivos aplicables al CCR
- Aplicar otro método de diseño de mezclas de CCR, de los mencionados en la investigación.
- Hacer pruebas de compactación con el procedimiento neumático, para la elaboración de especímenes de CCR, y compararlas con el procedimiento del martillo vibratorio.
- Realizar capas de CCR, similares a las presas ó pavimentos, para obtener información de los equipos que se utilizaran, el personal humano que se requiere y obtener muestras campo para compararlas con las realizadas en el laboratorio.

El CCR elaborado con cemento CPO en la investigación experimental, es aplicable a las capas de pavimentos, debido a su resistencia obtenida en las pruebas experimentales al concreto endurecido (ver capítulo 5), además que utiliza menor cantidad de cemento que el concreto convencional.

Conviene realizar la difusión exhaustiva del estudio aquí presentado entre los desarrolladores de proyectos de presas y carreteras, desde el proyectista o diseñador hasta el constructor, a fin de obtener mejor desempeño de los concretos empleados en estas obras.

CAPITULO 8

8 BIBLOGRAFIA GENERAL

www.cement.org/pavement

Portland Cement Association

Future Trend in Roller Compacted Concrete Dam Construction
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-89

Presas Construidas en México
Secretaría de Recursos Hidráulicos

Future Trend in Roller Compacted Concrete Dam Construction
By M.R.H Dunstan

Roller Compacted Mass Concrete
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-89

Roller Compacted Mass Concrete
Reporter by ACI committee 207, ACI 207.5R-11

Roller Compacted Concrete for Dams
State of the Art
By Ernest K. Shrader

Fracture and Material Properties of Roller Compacted Concrete
By Ernest K. Shrader

Comisión Federal de Electricidad, Manual de tecnología del concreto sección 1

Comisión Federal de Electricidad, Manual de tecnología del concreto sección 2

Comisión Federal de Electricidad, Manual de tecnología del concreto sección 3

Comisión Federal de Electricidad, Manual de tecnología del concreto sección 4

Tecnología del concreto, IMCYC.

ACI 207.5R (1999). Roller-Compacted Mass Concretes. ACI 207.5R-99. Reported by ACI Committee 207.

ACI 211.1 (1991). Standard Practice for Selecting Proportion for Normal, Heavyweight and Mass concrete. ACI 211.1-91 Reported by ACI Committee 211.

ACI 211.3R (1997). Guide for Selecting proportions for Non-Slump Concrete. ACI 211.3R-97. Reported by ACI committee 211.

ASTM. Book of Standard, Vol. 04.02. American Society for Testing and Materials.