

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



TESIS

**“MITIGACIÓN DE REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE, MEDIANTE
ADICIÓN DE PUZOLANAS NATURALES EN CONCRETO
COMPACTADO CON RODILLO DE $F'C=120 \text{ Kg/cm}^2$ ”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

EMILIO ANDRÉ SIFUENTES JIMÉNEZ

ASESOR

M.Sc. ANA VICTORIA TORRE CARRILLO

Lima- Perú

2019

© 2019, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados
“El autor autoriza a la UNI a reproducir la presente tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”
esifuentesj@gmail.com
989 314 258

Dedicatoria

A Dios que orchestra todo para bien.

A mi padre, Juan Manuel y la memoria de mi madre, Rosario.

A Ketty por su apoyo, a mis hermanos: Daniela, Valeria, Armando y Joan.

AGRADECIMIENTOS

A Dios que puso personas en mi camino para guiarme en mi vida.

A mi padre por su confianza y apoyo en todo tiempo. A Ketty por sus cuidados y preocupación como madre.

A mis hermanos, por su ayuda en el cumplimiento de la tesis y su compañía.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería y a cada profesor que compartió sus conocimientos de manera dispuesta.

Al Laboratorio de Ensayo de Materiales (LEM), por las facilidades en la realización de la tesis y a cada técnico por su apoyo en los ensayos.

A la M.Sc. Ana Torre, por sus continuo asesoramiento y revisión para realizar una correcta investigación, así como su apoyo en la realización de los ensayos.

A mis amigos Antony Moreno y Melissa Sairitupac, que me acompañaron en toda la investigación.

A Maybeth, por ayudarme a dar el último esfuerzo.

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	6
PRÓLOGO	8
LISTA DE CUADROS	9
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS	18
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	19
1.1. ANTECEDENTES	19
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.3. OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo General.....	22
1.3.2 Objetivos Específicos	22
1.4. HIPÓTESIS	22
1.5. ALCANCES	23
1.6. LIMITACIONES	23
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	25
2.1. REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE (RAS)	25
2.1.1 Mecanismo de Reacción.....	25
2.1.2 Factores que Influyen.....	26
2.1.3 Consecuencias en el Concreto	27
2.1.4 Métodos de Medición	30
2.1.5 Medidas de Prevención.....	37
2.2. CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO	43
2.2.1 Materiales	44
2.2.2 Diferencias con concreto convencional	48
2.2.3 Propiedades de CCR en estado fresco	49
2.2.4 Propiedades de CCR en estado endurecido	52
2.2.5 Producción.....	54
2.3. PUZOLANA	59
2.3.1 Historia	59
2.3.2 Composición Química y Mineralógica	59
2.3.3 Clasificación	61
2.3.4 Efectos de Puzolana Natural en Concreto	62
2.3.5 Índice de Actividad Puzolánica	63
2.4. PRESAS DE CCR	65

2.4.1 Historia	65
2.4.2 Proyectos Realizados	67
2.4.3 Beneficios	70
2.4.4 Casos de Presas con Reacción Álcali Sílice	73
2.5. DISEÑO DE MEZCLA	76
2.5.1 Filosofía de diseño de mezcla	76
2.5.2 Ajuste de Campo durante Construcción	79
CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPONENTES DEL CCR	80
3.1. AGREGADOS	80
3.1.1 Cantera C1	80
3.1.2 Cantera C2	84
3.2. CEMENTO.....	87
3.3.1 Cemento Yura Tipo II	87
3.3.2 Cemento Andino Tipo I	88
3.3. PUZOLANA	89
1. Procedencia	90
2. Propiedades	90
3.4. AGUA	91
3.5. ADITIVOS.....	91
CAPÍTULO IV: PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL.....	93
4.1. METODOLOGÍA.....	93
4.1.1 Programa Experimental	94
4.1.2 Ensayos Previos.....	96
4.1.3 Tamaño de la Muestra	98
4.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y PREPARACIÓN DE MATERIALES.....	101
4.2.1 Propiedades Físicas.....	101
4.2.2. Preparación de Materiales	104
4.3. DISEÑO PRELIMINAR DE CCR	106
4.3.1. Pasos para Diseño de Mezcla de CCR	106
4.3.2. Proceso de Mezclado de CCR.....	113
4.3.3. Ensayos de CCR en Estado Fresco	115
4.3.4. Ensayos de CCR en Estado Fresco	118
4.4. ÓPTIMO CONTENIDO DE PUZOLANA	119
4.4.1. Ensayos de Reactividad Álcali Sílice	119
4.5. DISEÑO CCR FINAL CON ADICIÓN DE PUZOLANA	124
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS	125
5.1. ADICIÓN DE PUZOLANA.....	125

5.1.1 Resistencia a la Compresión de Cubos de Mortero.....	125
5.1.2 Índice de Actividad Puzolánica	129
5.1.3 Reactividad Álcali Sílice en Barras de Mortero	130
5.2. DETERMINACIÓN DE ÓPTIMO CONTENIDO DE PUZOLANA.....	142
5.2.1 Resistencia a la Compresión vs Mitigación RAS	142
5.2.2 Óptimo Contenido de Puzolana	147
5.3. DISEÑO EXPERIMENTAL DE CCR	147
5.3.1 Cantera C1	147
5.3.2 Cantera C2	152
5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO CON Y SIN PUZOLANA.....	155
5.4.1 Diseño con óptimo contenido de puzolana.....	155
5.4.2 Propiedades del CCR con adición de puzolana.....	157
5.4.3 Comparación con y sin puzolana.....	158
5.5. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	158
CONCLUSIONES.....	159
RECOMENDACIONES	160
BIBLIOGRAFÍA.....	161
ANEXOS.....	167

RESUMEN

En concretos compactados con rodillo utilizados en presas es fundamental evitar la expansión ocasionada por la reactividad álcali sílice, pues puede generar daños graves en la estructura de la presa con una reducción notable de la vida útil de la estructura.

La presente investigación consiste en determinar un óptimo contenido de puzolana adicionado a un concreto compactado con rodillo, que mitigue la reactividad álcali sílice hasta un nivel inocuo. Para lograr esto se realiza un análisis comparativo entre un CCR convencional y uno con adición de puzolana.

Los materiales que se utilizaron corresponden a dos tipos de cantera: C1 y C2; además, puzolana natural y cemento tipo I y II.

En la primera parte, se determina el óptimo contenido de puzolana para mitigar la reactividad álcali sílice y a la vez que no reduzca considerablemente la resistencia a la compresión, para esto se realizaron pruebas en mortero.

La determinación del potencial de reactividad álcali sílice se obtiene mediante la norma ASTM C 1260 (sin uso de adiciones) y la norma ASTM C 1567 (con el uso de adiciones). Se emplearon 6 dosificaciones de puzolana para determinar el mínimo porcentaje de adición que generaba un comportamiento no perjudicial. Este porcentaje variaba según la cantera usada y el tipo de cemento empleado.

Además, al adicionar puzolana, se reducía la resistencia a la compresión, por lo tanto, se buscó determinar el porcentaje de reducción de resistencia a la compresión para cada dosificación usada. Esto se realizó mediante el ensayo de resistencia a la compresión en cubos de mortero de acuerdo con ASTM C 109.

En la segunda parte, se realizó el diseño del CCR adicionado con puzolana, a partir de los resultados previos en especímenes de mortero.

Para el diseño se empleó la guía del ACI y sus recomendaciones en cuanto a granulometría de los agregados. El tiempo Vebe aceptable para los diseños era entre 20s a 30s, para lo cual se trabajaron con 4 diseños de mezcla de CCR variando la relación a/c.

Finalmente, con una adición de 30% de puzolana natural en mezclas de CCR con potencial álcali sílice reactivo y relación a/c 0.72 se logra mitigar el potencial reactivo.

ABSTRACT

In rolled compacted concrete used in dams, it is essential to avoid the expansion product of the alkali silica reactivity as it can cause serious damage to the dam structure with a significant reduction in the useful life of the structure.

The present investigation consists in determining an optimum content of pozzolana as an addition in a rolled compacted concrete that mitigates the alkali silica reactivity to an innocuous level. To achieve this, a comparative analysis is made between a conventional CCR and one with the addition of pozzolan.

In the first part, the optimum content of pozzolan is determined to mitigate alkali silica reactivity and at the same time not reducing significantly the compressive strength, for this purpose mortar tests were performed.

The determination of alkali silica reactivity potential is obtained by ASTM C 1260 (without the use of additions) and ASTM C 1567 (with the use of additions). 6 dosages of pozzolan were used to determine the minimum percentage of addition that generated a non-detrimental behavior. This percentage varied according to the quarry used and the type of cement used.

In addition, by adding pozzolan, the compressive strength was reduced, therefore, it was sought to determine the percentage of compressive strength reduction for each dosage used. This was done by the compression strength test in mortar cubes in accordance with ASTM C 109.

In the second part, the design of the CCR added with pozzolana was carried out, based on the previous results in mortar specimens.

For the design, the ACI guide and its recommendations regarding granulometry of the aggregates were used. The acceptable Vebe time for the designs was between 20s and 30s, for which they worked with 4 CCR mix designs varying the a/c ratio.

Finally, with a 30% addition of natural pozzolan in CCR mixtures with alkali potential reactive silica and a / c ratio 0.72 it is possible to mitigate the reactive potential.

PRÓLOGO

En años recientes, el uso del Concreto Compactado con Rodillo en presas de gravedad se ha incrementado, como los casos de la presa de Cerro del Águila o la presa de Vizcachas.

Por otro lado, hay canteras con potencial reactivo álcali sílice, como en las zonas sur del país, cuyo efecto sobre este tipo de concreto es perjudicial.

Ante esta situación, la tesis asesorada, plantea la adición de puzolana natural en CCR para mitigar los efectos de la reactividad álcali sílice.

Para el desarrollo de la investigación, se contó con el apoyo del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la UNI, que acompañó en la realización de los ensayos conforme a estándares certificados.

Finalmente, invito a leer esta investigación, que seguramente será un aporte al estado del arte en la ingeniería civil en la rama de construcción.

M.Sc. Ana V. Torre Carrillo
ASESOR

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1 Ensayos evaluación reactividad de agregado (Pasquel, 2009)	33
Cuadro N° 2 Ensayos evaluación medidas de prevención (Pasquel, 2009)	36
Cuadro N° 3 Límites de álcalis especificados en (U.S. Department of Transportation, 2013)	41
Cuadro N° 4 Nivel Requerido de MCS (Thomas & Folliar, 2007)	42
Cuadro N° 5 CCR versus concreto convencional (Fuente propia, 2018)	49
Cuadro N° 6 Comparación de consistencia para slump y el aparato Vebe (ACI, 2009)	51
Cuadro N° 7 Requerimientos químicos según clase de puzolana (ASTM, 2003)	61
Cuadro N° 8 Requerimientos químicos de puzolanas (ASTM, 2003)	62
Cuadro N° 9, Análisis granulométrico cantera C1- Agregado Fino (Fuente propia, 2018)	81
Cuadro N° 10 Análisis granulométrico cantera C1-Agregado Grueso (Fuente propia, 2018)	82
Cuadro N° 11 Propiedades físicas cantera C1-Agregado Fino	83
Cuadro N° 12 Propiedades físicas cantera C1-Agregado Grueso	83
Cuadro N° 13 Análisis granulométrico, cantera C2, Agregado fino (Fuente propia, 2018)	84
Cuadro N° 14 Análisis granulométrico, cantera C2, Agregado fino (Fuente propia, 2018)	85
Cuadro N° 15 Propiedades físicas cantera C2-Agregado Fino (Elaboración propia, 2018)	86
Cuadro N° 16 Propiedades físicas cantera C2-Agregado Grueso (Elaboración propia, 2018)	86
Cuadro N° 17 Propiedades físicas y químicas, Cemento tipo I (Unacem, 2018)	89
Cuadro N° 18 Cantidad de especímenes sin adición de puzolana (Elaboración propia, 2018)	98
Cuadro N° 19 Cantidad de especímenes con adición de puzolana para la cantera C1 (Elaboración propia, 2018)	99
Cuadro N° 20 Cantidad de especímenes con adición de puzolana para la cantera C2 (Elaboración propia, 2018)	100

Cuadro N° 21 Cantidad de especímenes sin adición de puzolana para mezcla de CCR-cantera C1 y C2 (Elaboración propia, 2018).....	101
Cuadro N° 22 Cantidad de especímenes con adición de puzolana para mezcla de CCR-cantera C1 (Elaboración propia, 2018)	101
Cuadro N° 23 Tabla Resumen para Diseño de CCR (Usace, 2006)	107
Cuadro N° 24 Granulometría de Agregado Grueso Ideal (Usace, 2006).....	108
Cuadro N° 25 Granulometría Agregado Fino Ideal (Usace, 2006).....	108
Cuadro N° 26 Cantidad de agregado grueso por m3 según cantera (Elaboración Propia, 2018).....	109
Cuadro N° 27 Cantidad de materiales por m3 según cantera (Elaboración Propia, 2018)	110
Cuadro N° 28 Verificación de coeficientes (Elaboración Propia, 2018)	110
Cuadro N° 29 Peso de materiales según cantera (Elaboración Propia, 2018).....	113
Cuadro N° 30 Consistencia y tiempo Vebe (ASTM, 1998).....	116
Cuadro N° 31 Tolerancia según edad de ensayo (ASTM, 2001)	119
Cuadro N° 32 Requisitos de gradación (ASTM, 2007)	120
Cuadro N° 33 Requisitos de agregado usado según cantera (Elaboración Propia, 2018)	120
Cuadro N° 34 Cantidad de Material a usar (ASTM, 2013)	122
Cuadro N° 35 Óptimo contenido de puzolana (Elaboración Propia, 2018).....	147
Cuadro N° 36 Cantidad por m3 de mezcla. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	148
Cuadro N° 37 Coeficientes importantes de mezcla de CCR. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	148
Cuadro N° 38 Cantidades por m3 de mezcla de CCR según diseño. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	149
Cuadro N° 39 Propiedades en estado fresco de CCR según diseño. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	149
Cuadro N° 40 Resistencia a la compresión según diseño. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	150
Cuadro N° 41 Cantidad por m3 de mezcla. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	152

Cuadro N° 42 Cantidades por m ³ de mezcla de CCR según diseño. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	152
Cuadro N° 43 Propiedades en estado fresco de CCR según diseño. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	153
Cuadro N° 44 Resistencia a la compresión según diseño. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	153
Cuadro N° 45 Óptimo contenido de puzolana (Elaboración Propia, 2018).....	155
Cuadro N° 46 Cantidades por m ³ de mezcla de CCR según diseño con 30% de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	157
Cuadro N° 47 Resistencia a la compresión mezcla de CCR con 30% de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018).....	157
Cuadro N° 48 Resistencia a la compresión mezcla de CCR con 30% de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018).....	157
Cuadro N° 49 Comparación de mezcla de CCR con y sin adición de. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	158

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1 Mapa de canteras reactivas en el Perú (Fuente Propia).....	25
Figura N° 2 Condiciones para reacción álcali sílice (Elaboración Propia)	26
Figura N° 3 Patrón de fisuración RAS en un pavimento de carretera (U.S. Department of Transportation,2013)	28
Figura N° 4 Patrón de fisuración en una barrera (U.S. Department of Transportation,2013)	28
Figura N° 5 Movimiento relativo en una estructura de puente afectada por RAS (Stark, 1991)	29
Figura N° 6 Expansión causando desprendimiento de juntas asociadas con la RAS (U.S. Department of Transportation,2013)	29
Figura N° 7 Protuberancia inducida por la RAS en pavimento (U.S. Department of Transportation,2013)	30
Figura N° 8 Eflorescencia y exudación de gel álcali-sílice en la superficie del concreto de una cimentación de puente afectada por RAS (U.S. Department of Transportation,2013)	30
Figura N° 9 Prevención de la RAS (Elaboración Propia, 2018)	38
Figura N° 10 Efecto del contenido de álcalis del concreto en la expansión (U.S. Department of Transportation, 2013).....	40
Figura N° 11 Efecto del contenido de álcalis en la expansión de los prismas de (Thomas et al. 1996).....	40
Figura N° 12 Etapa de prueba de CCR (Fuente Propia, 2017)	44
Figura N° 13 Texturas de CCR vs concreto convencional (U.S. Department of Transportarion, 2016).....	49
Figura N° 14 Rango de tiempo Vebe adecuado para buena compactación con rodillo vibratorio (U.S. Department of the Interior, 2017).....	50
Figura N° 15 Resistencia a la compresión de CCR vs relación $a/(c + p)$ (U.S. Department of the Interior, 2017)	53
Figura N° 16 Producción de Agregado (Nam Ngiep1 Power Company, 2016).....	55
Figura N° 17 Vaciado de CCR (Nam Ngiep1 Power Company, 2016)	56
Figura N° 18 Extendido del CCR (Rotec, 2017)	57
Figura N° 19 Compactado del CCR (Fuente Propia, 2017)	58
Figura N° 20 Producción del CCR (Elaboración propia, 2017)	59

Figura N° 21 Índice de actividad puzolánica (Husein A., Ehab S. & Husein D., 2017).....	64
Figura N° 22 Presa Willow Creek (Wikipedia, 2009)	66
Figura N° 23 Presa Shimajigawa (Fujii K., 2012).....	66
Figura N° 24 Situación actual de la construcción de presas de CCR (Cemex, 2015)	67
Figura N° 25 Volumen de CCR colocado, en millones m3 hasta 2015 (Cemex, 2015)	68
Figura N° 26 Situación actual de la construcción de presas de CCR hasta 2015 (Cemex, 2015).....	68
Figura N° 27 Presas CCR en el Perú (Elaboración Propia, 2018)	69
Figura N° 28 Presa Chaglla de CCR (Rumbo Minero, 2016)	69
Figura N° 29 Presa de Cerro del Águila (Graña y Montero, 2016).....	70
Figura N° 30 Costo de CCR vs el volumen de CCR, basado en proyectos de Estados Unidos (Us Army Corps of Engineers, 1998)	71
Figura N° 31 Óptimo de humedad mediante Proctor Modificado (Escalaya, 2006).....	78
Figura N° 32 Cantera C1 (Fuente Propia, 2018)	81
Figura N° 33 Curva granulométrica Cantera C1- agregado fino (Fuente Propia,2018)	82
Figura N° 34 Curva granulométrica Cantera C1-agregado grueso (Fuente Propia,2018)	82
Figura N° 35 Cantera C2 (Fuente Propia, 2018)	84
Figura N° 36 Curva granulométrica cantera C2- agregado fino (Fuente propia, 2018).....	85
Figura N° 37 Curva granulométrica cantera C2- agregado grueso (Fuente propia, 2018).....	85
Figura N° 38 Cemento Yura portland tipo II (Fuente propia, 2018).....	87
Figura N° 39 Cemento Andino portland tipo I (Unacem, 2018).....	88
Figura N° 40 Puzolana (Fuente propia, 2018)	90
Figura N° 41 Índice de Actividad Puzolánica (Fuente propia, 2018).....	91
Figura N° 42 Flujograma General de Diseño CCR (Elaboración propia, 2018).....	95

Figura N° 43 Etapas del programa experimental (Elaboración propia, 2018).....	96
Figura N° 44 Ensayos previos de CCR (Fuente propia, 2018).....	97
Figura N° 45 Ensayos previos álcali sílice (Fuente propia, 2018).....	98
Figura N° 46 Descargar de material para los ensayos (Fuente propia, 2018).....	101
Figura N° 47 Material separado según tamices para vaciado de CCR (Fuente propia, 2018).....	104
Figura N° 48 Triturado manual y mecánico (Fuente propia, 2018).....	105
Figura N° 49 Tamizado, lavado y secado (Fuente propia, 2018).....	105
Figura N° 50 Tamizado cemento y puzolana por la malla N°20 (Fuente propia, 2018).....	105
Figura N° 51 Contenido de cemento vs resistencia a la compresión de CCR (Usace, 2006).....	106
Figura N° 52 Granulometría usada y husos para CCR de (ACI, 2009).....	108
Figura N° 53 Flujograma General de Diseño de CCR (Elaboración propia, 2018).....	112
Figura N° 54 Proceso de mezclado de agregados CCR (Fuente propia, 2018).....	114
Figura N° 55 Proceso de mezclado y mezcla final de CCR (Fuente propia, 2018).....	115
Figura N° 56 Ensayo Vebe (Fuente propia, 2018).....	116
Figura N° 57 Ensayo contenido de aire (Fuente propia, 2018).....	117
Figura N° 58 Moldeo de probetas de CCR (Fuente propia, 2018).....	118
Figura N° 59 Etapas para óptimo contenido de puzolana (Elaboración propia, 2018).....	119
Figura N° 60 Etapas ensayos reactividad álcali-sílice (Elaboración propia, 2018).....	121
Figura N° 61 Barras de mortero para ensayo reactividad álcali sílice (Elaboración propia, 2018).....	121
Figura N° 62 Ensayos cubos de mortero (Elaboración propia, 2018).....	122
Figura N° 63 Orden de Compactado en el moldeo de cubos (ASTM, 2011).....	123

Figura N° 64 Óptimo contenido de puzolana en función de la reactividad y resistencia a la compresión	124
Figura N° 65 Flujo obtención diseño final de CCR (Elaboración propia, 2018).....	124
Figura N° 66 Resistencia a la compresión cubos de mortero en diferentes porcentajes de adición de puzolana. Cantera C1-Tipo I (Elaboración propia, 2018).....	125
Figura N° 67 Resistencia a la compresión cubos de mortero en diferentes porcentajes de adición de puzolana. Cantera C1-Tipo II (Elaboración propia, 2018).....	126
Figura N° 68 Resistencia a la compresión cubos de mortero en diferentes porcentajes de adición de puzolana. Cantera C2-Tipo I (Elaboración propia, 2018).....	127
Figura N° 69 Resistencia a la compresión cubos de mortero en diferentes porcentajes de adición de puzolana. Cantera C2-Tipo II (Elaboración propia, 2018).....	128
Figura N° 70 Índice de actividad puzolánica usando las canteras C1 y C2, cemento tipo I y II (Elaboración propia, 2018)	129
Figura N° 71 Expansión del ensayo reactividad álcali sílice según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	130
Figura N° 72 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	131
Figura N° 73 Comparación visual de barras luego del ensayo de reactividad. Adiciones de 0%, 20% y 40%. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	132
Figura N° 74 Expansión del ensayo reactividad álcali sílice según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)	133
Figura N° 75 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)	134

Figura N° 76 Expansión del ensayo reactividad álcali sílice según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	135
Figura N° 77 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	136
Figura N° 78 Comparación visual de barras luego del ensayo de reactividad. Adiciones de 0% y 40%. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	137
Figura N° 79 Expansión del ensayo reactividad álcali sílice según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)	137
Figura N° 80 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)	138
Figura N° 81 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y C2 (Elaboración propia, 2018).....	139
Figura N° 82 Reactividad álcali sílice a los 16 y 28 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 (Elaboración propia, 2018).....	140
Figura N° 83 Reactividad álcali sílice a los 16 y 28 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C2 (Elaboración propia, 2018).....	141
Figura N° 84 Determinación de óptimo contenido de puzolana en función de ensayo de resistencia a la compresión y reactividad álcali sílice (Elaboración propia, 2018).....	142
Figura N° 85 Óptimo contenido de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)	143
Figura N° 86 Óptimo contenido de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	144
Figura N° 87 Óptimo contenido de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)	145

Figura N° 88 Óptimo contenido de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	146
Figura N° 89 Tiempo Vebe versus relación a/c. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	150
Figura N° 90 Resistencia a la compresión versus relación a/c. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	151
Figura N° 91 Resistencia a la compresión versus contenido de cemento. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	151
Figura N° 92 Tiempo Vebe versus relación a/c. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	153
Figura N° 93 Resistencia a la compresión versus relación a/c. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	154
Figura N° 94 Resistencia a la compresión versus contenido de cemento. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	154
Figura N° 95 Resistencia a la compresión versus relación a/c. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	156
Figura N° 96 Resistencia a la compresión versus contenido de cemento. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)	156

LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS

CCR: Concreto compactado con rodillo
MCS: Material cementante suplementario
RAS: Reacción álcali sílice
RCD: presas compactadas con rodillo
a/c: relación agua cemento
LOI: pérdida por ignición
ASTM: American society of testing materials

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

Autores como Foroughi, Tabatabaei y Shamsadeini (2012) afirman que la puzolana natural tiene un efecto positivo en la reducción del daño debido a la reacción álcali-sílice y hace más que simplemente diluir los álcalis en el cemento. Las especificaciones para usar puzolana como una alternativa de mitigación de la reactividad álcali sílice deben tener en cuenta que los agregados altamente reactivos requieren mayores cantidades de puzolana en la mezcla. A medida que aumenta el contenido de calcio de la puzolana, también deben aumentarse las cantidades de puzolana utilizadas en el concreto.

Como lo mencionan Del Carmen, Ramos y Ulo (2011) determinaron que la puzolana natural utilizada en su estudio mostró un comportamiento efectivo para reducir la expansión lineal debida a la reacción álcali-sílice; por lo tanto, esa puzolana podría ser utilizada en mezclas de hormigón que contengan agregados reactivos.

Observaron una relación directa entre los porcentajes de adición de la puzolana y su eficiencia para reducir la expansión.

En su tesis de grado, Sydney (2015) determinó que la expansión del ensayo de reactividad fue menor al 0.1 %, recomendó una tasa mínima de reemplazo de cemento del 20% de puzolana clase C de Newark, Sikeston o White Bluff para mitigar la reacción álcali-sílice. Mientras que para las puzolanas clase C de Muskogee una tasa de reemplazo mínima del 30%” para controlar la expansión.

Investigadores como Husein, Ehab y Husein(2017) demostraron que el rendimiento de la puzolana natural en comparación con el de las cenizas volantes (puzolana clase C) y otros materiales puzolánicos es muy satisfactorio y puede utilizarse de manera efectiva en la construcción del CCR.

La puzolana natural mostró claramente su efectividad en el control de la reacción álcali-sílice.

En el Perú, Huamán (2017) concluyó que los métodos presentados en su investigación eran adecuados para determinar la potencial reactividad de un agregado a la RAS, el método ASTM C 1260 resultó útil para la obtención de expansiones a corto plazo y que los métodos ASTM C227 Y ASTM C289 son buenos métodos para complementar este ensayo.

En lo referente a CCR en el Perú, del Águila (2014) explicó que el CCR es una tecnología de poca difusión en nuestro medio. Sin embargo, que posee características que lo hacen muy provechosos para proyectos como presas, como su bajo costo debido a su rápido modo de construcción y su bajo contenido de cemento. Además, el método de CCR es comúnmente empleado en presas de gravedad.

En lo referente a los estudios de puzolana en el Perú, Villegas (2012) estudió la utilización de puzolanas naturales en remplazo del 10% al 20% del cemento en la elaboración de elementos prefabricados de concreto y morteros.

De la revisión bibliográfica realizada, se observa que en diferentes partes del mundo se ha estudiado acerca de la adición de puzolana para la mitigación de las reacciones álcali-sílice en concretos convencionales y en menor cantidad en los concretos compactados con rodillo (CCR).

En el Perú, hay estudios acerca de la reactividad álcali sílice, así como el uso del CCR y la puzolana, por separado. Sin embargo, no hay estudios acerca de la incorporación de puzolana en mezclas de CCR para mitigar el efecto de la reacción álcali-sílice.

Esta investigación considera el efecto de la puzolana adicionada en el CCR para la mitigación de la reacción álcali sílice.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como lo menciona, Tabra (2017) se prevé que en el 2030 el Perú empezará a sentir seriamente los estragos de la falta de agua.

De acuerdo Álvarez (2015) es recomendable invertir en sistemas que permitan almacenar el agua en las zonas altas, como represas, afianzamiento de lagos entre otros.

Autoridades del Perú ya han tomado en cuenta la necesidad de construir presas como: La Gerencia Regional de Agricultura de Arequipa(2017) informó el desarrollo del perfil de 8 presas con el objetivo de hacer frente a la escasez hídrica y ampliar la frontera agrícola.

Así como el Gobierno Regional de Cajamarca (2017) anunció la formulación del estudio de preinversión a nivel de perfil en una primera etapa de cinco proyectos de embalses en zonas alto andinas de Cajamarca.

Como lo explican Reeza, Abdul, Fadhil y Ahmad (2015) el CCR se ha desarrollado rápidamente en los últimos 40 años y es ahora comúnmente usado para presas de gravedad. Su rápida y económica construcción son algunas de muchas ventajas de las presas de CCR comparadas con las presas convencionales.

El Perú no es ajeno a la construcción de presas de CCR, como los casos:

-Presa de Chaglla: 14 971m³ 2016, Odebrecht

-Presa de Cerro del Águila: 446 000m³ 2017, Graña y Montero

-Presa de Vizcachas: 400 000m³ proyectado-2018 en construcción, Mota Engil

En lo referente a los agregados, en diferentes regiones del Perú se han encontrado canteras con potencial reactivo, por ejemplo:

- Díaz (2017) determinó potencial reactivo en canteras de Cajamarca

-Córdova (2018) dentro de sus investigaciones encontró una cantera con potencial reactivo en la ciudad de Chiclayo.

-Laboratorio de ensayo de materiales (2018) dentro de los ensayos realizados se encontró canteras con potencial reactivo en las ciudades de Iquitos y Moquegua.

Como lo menciona Melo (2014) el efecto negativo en términos económicos debido a la presencia de grietas ocasionadas por la reactividad álcali sílice trae como principal consecuencia dejar fuera de servicio la obra construida con efectos como: el aumento en costos por reparaciones no previstas que pueden ser de tipo parcial o incluso total(reconstrucción).

De manera que, debido a la necesidad de construcción de presas en el país, de las cuales las presas de CCR son una buena solución constructiva como se ha visto en los últimos años de grandes presas construidas en el Perú y considerando que existen varias regiones del país con canteras potencialmente reactivas con los álcalis del cemento. Se plantea el uso de la puzolana como una opción para mitigar la posible aparición de la reacción álcali sílice en las presas de CCR.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Mitigar la reacción álcali - sílice mediante la adición de puzolana en los CCR de resistencia $f'c=120 \text{ Kg/cm}^2$.

1.3.2 Objetivos Específicos

-Caracterizar los materiales componentes del CCR

-Diseñar dos mezclas de CCR sin adición y con adición de puzolana.

-Analizar el efecto inhibitorio de seis dosificaciones de puzolana adicionadas en especímenes de mortero.

1.4. HIPÓTESIS

Con la adición de puzolana se puede controlar la expansión de la reacción álcali-sílice para los CCR de resistencia $f'c=120 \text{ Kg/cm}^2$.

1.5. ALCANCES

Esta investigación busca llegar hasta determinar el óptimo contenido de puzolana como adición para un CCR que cumpla con los requerimientos de diseño y considere las propiedades de los componentes.

Primeramente, se caracteriza todos los materiales componentes del CCR a ser usados en los diferentes diseños, es decir, conocer las propiedades físicas y químicas de cemento, agregados, adición y aditivos.

Luego, realizar varios diseños previos de CCR, para determinar un diseño preliminar el cual sea el valor de inicio para un diseño de CCR adicionado de puzolana.

Al mismo tiempo, determinar el óptimo contenido de puzolana para especímenes de mortero. Este será un porcentaje que mitigue la reacción álcali-sílice, pero a la vez que disminuya la menor cantidad posible de resistencia.

Finalmente, adicionar este porcentaje de óptimo contenido de puzolana en el diseño preliminar de CCR, así comparar las propiedades en estado fresco y endurecido.

Cabe señalar que los resultados obtenidos no se podrán generalizar para cualquier tipo de puzolana, ya que depende de la composición interna de la puzolana; sin embargo, es una referencia para diseños futuros.

1.6. LIMITACIONES

En nuestro país se conoce poco acerca del diseño de concretos compactados con rodillo y del estudio de sus propiedades en estado fresco y endurecido. También hay pocos estudios acerca de puzolana como adición en CCR.

Además, hay una falta de estudios de reactividad álcali sílice en el Perú con el empleo de canteras locales, las cuales servirían para hacer un análisis comparativo.

El tiempo también fue un factor limitante para esta investigación, ya que empleo de un método más exacto para determinar la reactividad álcali sílice conlleva 1 año de ensayo según ASTM C 1293.

El CCR emplea gran cantidad de material fino, esto fue un limitante en los meses iniciales, ya que se tenía que realizar una trituración manual la cual era muy lenta. En el último mes, se usó una máquina trituradora.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE (RAS)

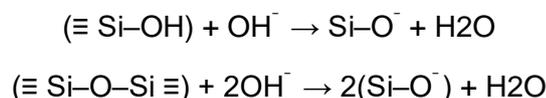
La reacción álcali sílice es un fenómeno que ataca al concreto endurecido fabricado con ciertos agregados sensibles, donde luego de varios años de exposición al medio ambiente y ante la presencia de óxidos de Sodio y Potasio (llamados comúnmente álcalis) provenientes principalmente del cemento, más humedad y temperatura, se origina un gel alrededor de las partículas gruesas, que va hinchándose cada vez más, rompiendo la estructura interna del concreto y ocasionando fisuración y desintegración de la estructura (Pasquel, 2009).



Figura N° 1 Mapa de canteras reactivas en el Perú (Fuente Propia)

2.1.1 Mecanismo de Reacción

La sílice reactiva está compuesta principalmente del grupo siloxano ($\equiv \text{Si-O-Si} \equiv$) y el grupo silanol ($\equiv \text{Si-OH}$) en la superficie del agregado. El símbolo “ \equiv ” indica que cada átomo de Si está conectado a otros tres átomos de oxígeno. Como resultado del ambiente altamente alcalino, los iones hidroxilo (OH^-), neutralizan el grupo silanol ($\equiv \text{Si-OH}$) y también reaccionan con el grupo siloxano ($\equiv \text{Si-O-Si} \equiv$) mostrado en las ecuaciones:



Para mantener el equilibrio de carga, la negatividad Si-O^- atrae cationes cargados positivamente presentes en la solución de poro (Na^+ y K^+), y da como resultado la formación de RAS gel. Debido a la gran área de superficie y la estructura porosa del gel RAS, tiene la tendencia a absorber agua.

Este mecanismo da como resultado la hinchazón del gel, que induce tensiones de tracción locales en el hormigón. (Trejo D., Mazarei V., Ideker J. & Burkan I., 2017)

2.1.2 Factores que Influyen

Deben existir tres condiciones básicas para que la reacción álcali sílice ocurra en el concreto. Estas condiciones incluyen alto pH, humedad y sílice reactiva. La tasa de reacción está influenciada por la temperatura.

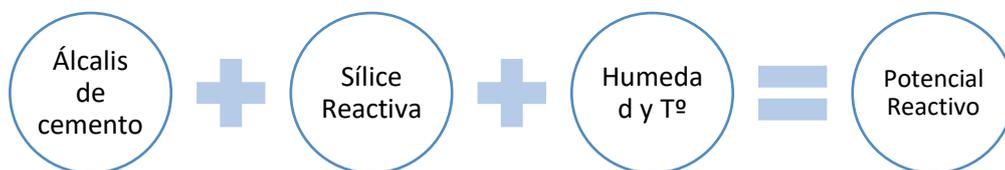


Figura N° 2 Condiciones para reacción álcali sílice (Elaboración Propia)

-Niveles de álcali de cemento: Los primeros investigadores reconocieron que el contenido de álcali del cemento portland tenía una influencia directa en la potencial expansión (Stanton, 1942). Los 2 constituyentes de álcali fueron reportados de análisis químicos como óxido de sodio y óxido de potasio. El álcali equivalente total es calculado como $\% \text{Na}_2$ más $0.658 \times \% \text{K}_2\text{O}$, y porcentaje resultado es descrito como equivalente $\text{Na}_2\text{O}(\text{Na}_2\text{Oe})$. Este concepto ha demostrado ser útil en el estudio de la RAS. Diamond (1989) mostró la relación entre el contenido de cemento-álcali y la concentración del ión OH^- (pH) del fluido del poro de concreto. Este último es el factor dominante en el proceso químico del RAS.

-Sílice reactiva: investigadores primero creyeron que había un grupo limitado de constituyentes del agregado susceptibles como ópalo, esquistos conteniendo calcedonia y algunas rocas volcánicas vítreas. Ahora es reconocido que la RAS puede ocurrir con un amplio rango de constituyentes silíceos de agregado. Varias otras formas meta estables de sílice están involucradas. La reactividad no

depende solo de la mineralogía, sino también de la mecánica de formación del material de agregado, el grado de deformación de cuarzo.

-Humedad: La humedad debe estar disponible para que la RAS proceda, y por debajo de 80% de humedad relativa interna, la reacción cesará. Para concretos ordinarios, algunas porciones de agua de la mezcla son usualmente disponibles por un periodo largo y aún en condiciones secas de servicio. Sin embargo; para bajas relaciones agua-cemento el agua podría acabarse en la hidratación del cemento. En servicio (tal como losas en gradadas) donde el concreto tiene una fuente externa de agua, la reacción continuará hasta que uno de los componentes reactivos se acabe.

-Temperatura: A medida que incrementa la temperatura, la tasa de RAS se incrementará. Con materiales y proporciones de concretos dados, la reacción ocurrirá más rápidamente bajo condiciones más cálidas. Aunque este factor no ha sido cuantificado, debe ser tomado en cuenta cuando se toman consideraciones para prevenir RAS. (ACI, 1998)

2.1.3 Consecuencias en el Concreto

Síntomas visuales comunes de la RAS consisten en:

- Fisuración
- Expansión causando deformación, movimiento relativo y desplazamiento
- Ruptura localizada de concreto
- Extrusión de la junta (material sellante)
- Protuberancia en la superficie
- Decoloración de la superficie y exudación de gel

a) Fisuración

El patrón de fisuración a través de la RAS es influenciado por factores como la forma o geometría del elemento de concreto, las condiciones ambientales, la presencia y arreglo del refuerzo, y los esfuerzos o cargas en el campo (restricciones) aplicadas al concreto.

El clásico síntoma de RAS es un mapa de fisuración (también llamado patrón de fisuración), el cual toma la forma de fisuras aleatoria-orientadas en la superficie

del elemento del concreto que es relativamente libre (sin restricciones) de mover en todas las direcciones.



Figura N° 3 Patrón de fisuración RAS en un pavimento de carretera (U.S. Department of Transportation,2013)



Figura N° 4 Patrón de fisuración en una barrera (U.S. Department of Transportation,2013)

b) Expansión causando movimientos y deformaciones

La extensión de la RAS generalmente varía entre varias partes de una estructura afectada de concreto, causando así fatigas como:

-Movimiento relativo de miembros de concreto adyacentes o unidades estructurales.

-Deflexión, cierre de juntas con extrusión asociado a los materiales de sellado y, en última instancia, desprendimiento de hormigón de las juntas.



Figura N° 5 Movimiento relativo en una estructura de puente afectada por RAS (Stark, 1991)



Figura N° 6 Expansión causando desprendimiento de juntas asociadas con la RAS (U.S. Department of Transportation, 2013)

c) Protuberancias (Pop-outs)

Las protuberancias pueden ser causadas por una pobre unión entre la pasta y las partículas de agregado polvorientas.

Los agregados reactivos de la RAS que experimentan expansión cerca de la superficie de concreto también pueden inducir el desprendimiento de una porción del concreto, dejando el agregado reactivo en la parte inferior.

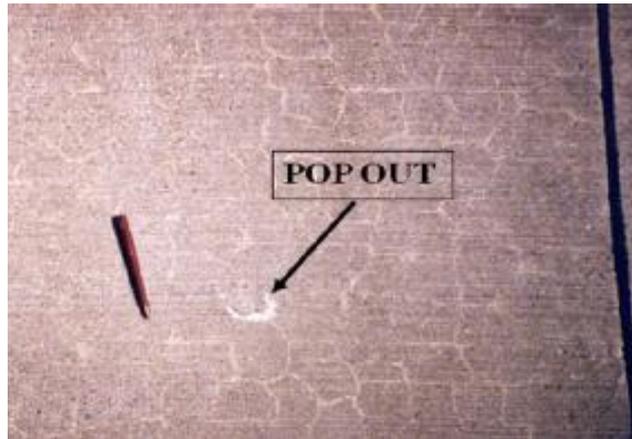


Figura N° 7 Protuberancia inducida por la RAS en pavimento (U.S. Department of Transportation,2013)

d) Depósitos de superficie (exudación de gel y eflorescencia)

Aunque la exudación de gel superficial es común y característica de la RAS, la presencia de depósitos en la superficie no es necesariamente indicativo de la RAS como otros mecanismos (como acción de hielo o movimiento de agua a través de los miembros del concreto fisurados) que también pueden causar depósitos en la superficie llamados eflorescencia (sin presencia de gel de RAS).



Figura N° 8 Eflorescencia y exudación de gel álcali-sílice en la superficie del concreto de una cimentación de puente afectada por RAS (U.S. Department of Transportation,2013)

2.1.4 Métodos de Medición

Existen varios ensayos para determinar la reactividad, cada cual presenta ventajas y desventajas.

a) Métodos de Ensayo para Evaluar la Reactividad del Agregado

- C 289: Método de ensayo estándar para potencial reactividad álcali-sílice de agregados

Es frecuentemente referido como “Ensayo químico rápido”, es un ensayo que involucra un agregado triturado (pasando el tamiz 300 μm y retenido en el tamiz 150 μm), sumergido en 1N NaOH por 24 horas a 80°C y midiendo la cantidad de sílice que entra en la solución y la alcalinidad al completar el ensayo. Los resultados de los ensayos, específicamente la cantidad de sílice que entro en la solución y la reducción en la alcalinidad de la solución sumergida, son graficados. Basados en cómo los datos (cantidad de sílice disuelta y la reducción de alcalinidad) son graficados, el agregado es clasificado como inocuo, potencialmente perjudicial o perjudicial.

- C 227

Es esencialmente el método Stanton(1940) almacenando barras de mortero(25 mm x 25mm x 285 mm) sobre agua a 38°C para proveer una alta temperatura, atmósfera de alta humedad dentro de un contenedor sellado. Debido a la pequeña sección transversal de las barras de mortero usadas en el ensayo, el agregado grueso debe ser procesado por trituración, tamizado y lavado con el objetivo de producir partículas suficientemente pequeñas a ser usadas en las barras de mortero. La especificación ASTM clasifica al agregado como reactivo cuando el agregado dado se expande a más de 0.05% a los 3 meses o 0.1% a los 6 meses.

- C 1260

Está basado en el método de Oberholster & David (1986). El ensayo, generalmente referido como un ensayo acelerado de barra de mortero. El ensayo implica vaciar barras de mortero conteniendo el agregado de estudio (grueso o fino), el cual es procesado a una gradación estándar. Las barras de mortero son removidas de sus moldes después de 24 horas y son puestas en agua a temperatura ambiente. La temperatura del agua es luego elevada a 80°C, y las barras de mortero son almacenadas en esta condición por las siguientes 24 horas. Al retirar las barras del agua, se mide la longitud inicial y sumergidas a una solución de 1N NaOH a 80°C, donde son almacenadas por 14 días. Los cambios

de longitud son medidas en este periodo. El criterio de expansión de ASTM indica que para expansiones menores a 0.1% es considerado inocuo, entre 0.1 a 0.2% es considerado potencialmente reactivo y para mayores a 0.2% es considerado reactivo.

- C 1293

Comúnmente referido como ensayo de prisma de concreto, es considerado el ensayo más preciso y efectivo en predecir el desempeño de agregados en el campo. En este ensayo, el concreto es vaciado con un contenido de cemento de 420 Kg/m³. El cemento es requerido a tener un contenido de álcali equivalente entre 0.8% a 1.0 %, y álcalis adicionales (NaOH) luego son añadidos a la mezcla de agua para obtener un contenido total de álcalis de 1.25% (por masa de cemento), que equivale a un contenido de álcalis en la mezcla de concreto de 5.25 Kg/m³. Las medidas de expansiones son medidas a intervalos regulares, y cuando se prueba un concreto simple (sin MCS o aditivos), el ensayo típicamente dura un año (2 años cuando se evalúa algún MCS o aditivo a base de litio). (U.S. Department of Transportation, 2013).

Cuadro N° 1 Ensayos evaluación reactividad de agregado (Pasquel, 2009)

Ensayo ASTM	Parámetros que Evalúa	Tipo de Espécimen	Condiciones de Ensayo	Duración Usual	Pros	Contras
C 289	Sílice disuelta y reducción en alcalinidad en agregados	Agregado pulverizado	Inmersión en NaOH a 80°C	24 horas	Rápido, detecta agregados con elevada reactividad	Falla con agregados de reacción lenta, no usa gradación real.
C 227	Expansión en combinaciones de cemento y agregado	Prismas de mortero de 25mmx25mmx285mm	Inmersión en H ₂ O a 38°C	90 y 180 días	Detecta agregados con reactividad rápida, permite comparar cementos	Demora mucho, falla con agregados de reacción lenta, no usa gradación real.
C 1260	Expansión en combinaciones de cemento y agregado.	Prismas de mortero de 25mmx25mmx285mm	Inmersión en NaOH a 80°C	16 días	Relativamente rápido, detecta agregados con reactividad lenta, permite comparar cementos	Muy severo, puede mostrar como reactivos agregados inocuos, no usa gradación real.
C 1293	Expansión en combinaciones de cemento y agregado.	Prismas de mortero de 25mmx25mmx285mm	Inmersión en H ₂ O a 38°C	1 año a 2 años	Más realista, se acerca a la condición de obra	Demora mucho, el resultado se afecta mucho por las condiciones de almacenaje.

b) Métodos de Ensayo para Evaluar las Medidas de Prevención

- C 441

Fue desarrollado por el U.S. Bureau of Reclamation en los años 1940 para evaluar los MCS de la construcción de la presa David y otros grandes proyectos. El ensayo es esencialmente el mismo que el C 227, donde pequeños especímenes (25x25mm en sección transversal) son almacenados por encima del agua a 38°C con una gran diferencia – vidrio Pyrex es usado como un “modelo” de agregado reactivo.

El objetivo de este ensayo es tener algo así como un estándar interno, el vidrio de Pyrex puede ser usado para evaluar la eficacia relativa de adicionar MCS en la reducción de la expansión. Específicamente, la expansión de barras de mortero conteniendo un cemento de alto contenido de álcalis (0.95 a 1.05%Na₂O₂), después de 14 días de almacenado sobre agua a 38°C y 25% de ceniza volante y 50% de escoria es comparado a la expansión de barras de control (solo cemento portland).

- C 1567

Es esencialmente idéntico a C 1260, con la única excepción que está dirigido a evaluar el uso de MCS. El ensayo utiliza los mismos especímenes y condiciones de almacenaje. En primer lugar, si el agregado a evaluar no produce resultados precisos cuando se prueba con C 1260, debido a falsos positivos o falsos negativos, debe ser evidente que el ensayo acelerado de barras de mortero no es un ensayo confiable para el agregado especificado en combinación con MCS para determinar la dosis necesaria para controlar la expansión.

- C 1293

El ensayo de primas de concreto fue inicialmente desarrollado para evaluar la reactividad del agregado, pero la versión más reciente, ASTM C 1293, ha sido modificada para permitir ensayar MCS como medidas de prevención o reducción de expansión dañina. Los procedimientos y ensayos son idénticos a los descritos para evaluar la reactividad del agregado, excepto por 2 modificaciones:

-La duración del test es de 2 años.

-MCS pueden ser usados como reemplazo de cemento portland en masa. (U.S. Department of Transportation, 2013).

Cuadro N° 2 Ensayos evaluación medidas de prevención (Pasquel, 2009)

Ensayo ASTM	Parámetros que Evalúa	Tipo de Espécimen	Condiciones de Ensayo	Duración Usual	Pros	Contras
C 441	Efectividad de adiciones usando cemento con alto contenido de álcalis y pyrex	Prismas de mortero de 25mmx25mmx285mm	Inmersión en H ₂ O a 38°C	14 y 56 días	Permite determinar la efectividad de adiciones minerales vs la dosis empleada	No es muy rápido, solo estima resultados comparativos, pero no absolutos
C 1567	Efectividad de adiciones	Prismas de mortero de 25mmx25mmx285mm	Inmersión en NaOH a 80°C	16 días	Relativamente rápido, detecta agregados con reactividad lenta, permite comparar cementos	Muy severo, puede mostrar como reactivos agregados inocuos, no usa gradación real
C 1293	Efectividad de adiciones	Prismas de mortero de 25mmx25mmx285mm	Inmersión en H ₂ O a 38°C	1 año a 2 años	Más realista, se acerca a la condición de obra	Demora mucho, el resultado se afecta mucho por las condiciones de almacenaje

2.1.5 Medidas de Prevención

Se ha mostrado que son 3 requerimientos básicos para que la reacción álcali sílice ocurra en el concreto, estas son:

- Cantidad suficiente de sílice reactiva
- Concentración suficiente de álcalis
- Suficiente humedad

Eliminando cualquiera de estos requerimientos prevendrá la ocurrencia de daño generado por la reacción álcali sílice. La exclusión de agua de las estructuras de ingeniería no es práctica en muchos casos, entonces las opciones más obvias para prevenir la expansión por la reacción álcali sílice son:

- a) Evitar el uso de agregados reactivos
- b) Minimizar la cantidad de álcalis proveniente del cemento portland.

Otras dos opciones son las siguientes:

- c) Usar materiales cementantes suplementarios
- d) Usar compuestos a base de litio.

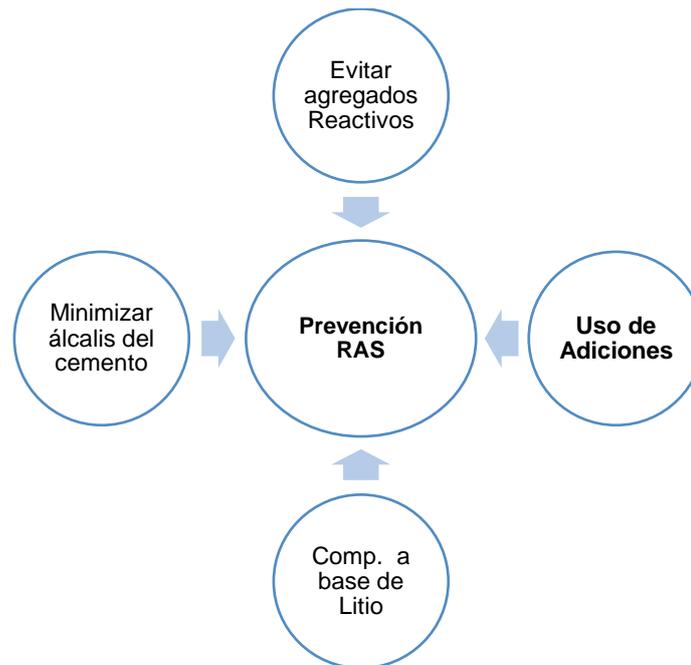


Figura N° 9 Prevención de la RAS (Elaboración Propia, 2018)

En realidad, el uso de materiales cementantes suplementarios es una forma de opción b, debido a que estos materiales consumen una porción de los álcalis contribuidos por el cemento portland y reducen su disponibilidad para reaccionar con el agregado.

Los componentes de Litio trabajan en una manera diferente cambiando la naturaleza de la reacción (U.S. Department of Transportation, 2013).

a) Usar agregados no reactivos

Usar agregados no reactivos es ciertamente un método viable de prevenir la reacción álcali sílice. Ensayos competentes y completos son requeridos para asegurarse que las fuentes de agregados son no reactivos. Esto puede ser logrado a través de una combinación de pruebas petrográficas, ensayos de expansión de mortero (ASTM C 1260) o de concreto (ASTM C 1293), y comportamiento en el campo.

Hay varias razones de por qué el uso de agregados no reactivos es no siempre una opción factible:

-Agregados no reactivos no están disponibles localmente y el costo de envío de materiales no reactivos de otros lugares es prohibitivo.

-Agregados reactivos que son adecuados para concreto, están disponibles y abundantemente disponibles a bajo costo y reducido impacto ambiental comparado con los agregados no reactivos.

-Falta de confianza en los resultados de ensayos o los resultados de ensayos son ambiguos.

-Todos los materiales localmente disponibles fallan el ensayo agresivo acelerado.

En estos casos es necesario adoptar una de las otras opciones para prevenir la reacción álcali sílice es necesaria (U.S. Department of Transportation, 2013).

b) Limitar el contenido de álcalis en el concreto

Stanton's (1940) en sus trabajos iniciales de la RAS indicó que la reacción expansiva es poco probable de ocurrir cuando el contenido de álcalis de cemento está por debajo del 0.6% Na_2O_2 . Sin embargo; investigaciones después indicaron que la RAS puede ocurrir con cementos de bajo contenido de álcalis. A pesar de esto, el valor de 0.60% se ha convertido en el límite máximo aceptado para cemento a ser usado con agregados reactivos en los Estados Unidos, y aparece en la norma ASTM C 150.

Limitar el nivel de álcalis del cemento no toma en cuenta el contenido de cemento que, junto al contenido de álcalis del cemento, gobierna el contenido total de álcalis del concreto y es considerado a ser un índice más adecuado del riesgo de expansión cuando un agregado reactivo es usado en el concreto. La figura siguiente muestra la relación entre contenido de álcalis y expansión para concretos producidos con un rango de contenidos de cemento y cementos de varios contenidos de álcalis (U.S. Department of Transportation, 2013).

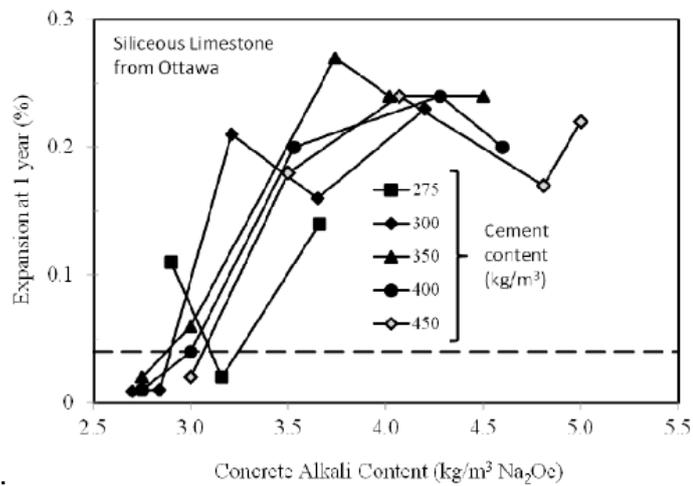


Figura N° 10 Efecto del contenido de álcalis del concreto en la expansión (U.S. Department of Transportation, 2013)

La Figura N°10 muestra la expansión de prismas de concreto vs el contenido de álcalis del concreto para 3 diferentes agregados reactivos.

Puede ser visto que el umbral de álcalis para iniciar la expansión que genera daño en los ensayos de prisma de concreto varía entre agregados, con valores variando de 3.0 Kg/m³ Na₂O₂ a más de 5.0 Kg/m³ Na₂O₂.

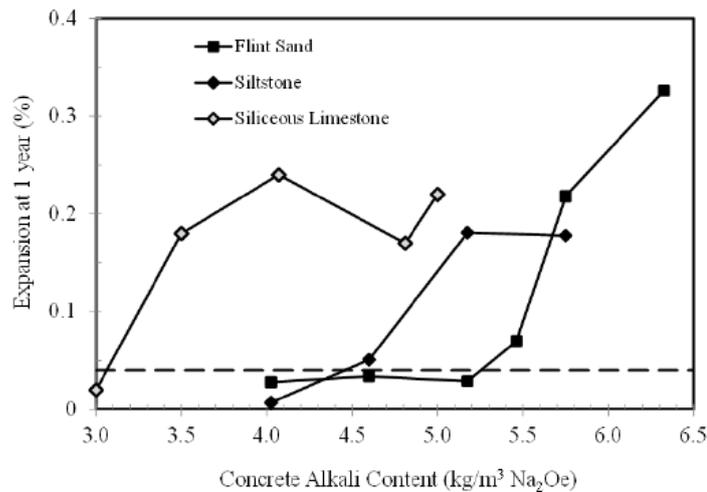


Figura N° 11 Efecto del contenido de álcalis en la expansión de los prismas de (Thomas et al. 1996)

En el 2000, se introdujo una “escala móvil” para el límite de álcalis usados como una medida, variando el valor de 1.8 a 3.0 Kg/m³ Na₂O₂ como sigue (U.S. Department of Transportation, 2013):

Cuadro Nº 3 Límites de álcalis especificados en (U.S. Department of Transportation, 2013)

Nivel de prevención requerido	Límite de álcalis (Na_2O_2) (Kg / m^3)
Leve	3.0
Moderado	2.4
Fuerte	1.8
Excepcional	1.8 + MCS

c) Usar materiales cementantes suplementarios(MCS)

Uno de los medios más efectivos de controlar la RAS en concreto que contiene agregados reactivos es el uso apropiado de materiales cementicios. Tales materiales incluyen puzolanas y escoria granulada. El potencial uso de puzolanas para controlar la RAS data desde el descubrimiento de la RAS, habiendo sido reportado (Stanton 1940). En este artículo, Stanton no solo demuestra que el daño por la reacción solo ocurrirá si hay suficiente cantidad de álcalis en el cemento portland y suficiente sílice reactiva en el agregado, sino que la expansión era reducida cuando un cemento puzolánico era usado. Diez años después, Stanton (1950) demuestra que un reemplazo parcial de cemento portland con suficiente cantidad de puzolana (pumicita o pizarra calcinada) elimina la expansión perjudicial.

En los 1950's, varios estudios (Cox H., Coleman R. and White L., 1950) mostraron que otros materiales cementicios suplementarios (MCS), llamados ceniza volante y escoria, eran también efectivos en reducir la expansión.

Thomas (2011) mostró que casi cualquier MCS puede ser usado para controlar la RAS previsto su uso a un suficiente nivel de reemplazo. La cantidad requerida varía ampliamente dependiendo de las siguientes cosas:

- La naturaleza del MCS (especialmente mineralógica y composición química), la se requiere más MCS a medida que disminuye su contenido de sílice o aumenta su contenido de calcio y álcalis.
- La naturaleza del agregado reactivo, mientras más reactivo el agregado, un nivel más alto de MCS es requerido.

- La disponibilidad de álcalis en el concreto; la cantidad de MCS requerido se incremente con la cantidad de álcalis disponibles.
- Las condiciones de exposición del concreto; el concreto expuesto a fuentes externas de álcalis podrían requerir altos niveles de MCS. (U.S. Department of Transportation, 2013)

La cantidad de MCS requerido para prevenir el daño por la expansión de la RAS generalmente cae en el rango (modificado por Thomas & Folliar, 2007):

Cuadro Nº 4 Nivel Requerido de MCS (Thomas & Folliar, 2007)

Tipo de MCS	Porcentaje Requerido (%)
Ceniza volante baja en calcio (<8% CaO)	20 a 30
Ceniza volante moderada en calcio (8 – 20 % CaO)	25 a 35
Ceniza volante alta en calcio (> 20% CaO)	40 a 60
Humo de sílice	8 a 15
Escoria	35 a 65
Metacaolín (arcilla calcinada de caolín)	10 a 20

d) Uso de Litio

La habilidad del litio para controlar expansiones perjudiciales debido a la RAS en morteros y concretos fue demostrado por McCoy & Caldwell (1951). Estas mostraron que, de más de 100 compuestos químicos probados, varias sales de litio (LiCl, LiCO₃, LiF, Li₂SiO₃, LiNO₃ y Li₂SO₄) fueron las más prometedoras y prácticamente pudieron eliminar la expansión de mortero que contenía vidrio Pyrex siempre que se utilizaran a niveles suficientes de reemplazo. Desde entonces, ha habido varios estudios que corroboran este descubrimiento temprano (Feng X., Thomas M., Bremner T., Balcom B. and Folliard K.,2005).

Es algo paradójico que los componentes de litio sean eficientes suprimiendo la RAS, debido a que el litio es un metal alcalino como el sodio y potasio. El preciso mecanismo por el cual el litio controlar la RAS es no conocido, aunque varias teorías han sido propuestas (Feng et al. 2005). La simple y más común explicación usada es que las sales de litio reaccionarán con la sílice reactiva

en una forma similar a las sales de sodio y potasio, pero el producto de la reacción es un silicato de sodio insoluble con poca propensión a absorber agua y a hincharse. El silicato de litio forma alrededor de los agregados reactivos partículas y protege la subyacente sílice reactiva de “ataques” por los hidróxidos de álcalis.

El trabajo inicial de McCoy & Caldwell (1951) mostró que la cantidad de litio requerido para controlar la expansión fue una función de la disponibilidad de otros álcalis (Na + K) en el sistema, y concluyeron que la expansión de las barras de mortero conteniendo vidrio Pyrex reactivo pueden ser efectivamente suprimida siempre que la relación molar de litio a sodio más potasio sea mayor que 0.74; $[Li]/[Na+K] > 0.74$. Desde entonces numerosos trabajos han demostrado una relación similar entre la cantidad de litio requerido y la cantidad de álcalis disponible, pero el menor valor de $[Li]/[Na+K] > 0.74$ se ha demostrado que varía dependiendo en el número de cuestiones como la forma de litio, naturaleza reactiva del agregado y tal vez, el método de ensayo usado (Feng et al., 2005)

Aunque la mayoría de compuestos de litio tienen un efecto beneficioso, el nitrato de litio ($LiNO_3$) es considerada la forma más eficiente para suprimir la RAS (Stokes D., Wang H. and Diamond S., 1997).

Como la efectividad del litio parece ser extremadamente dependiente del agregado, no es posible de prescribir una única dosificación para controlar la RAS, y la mínima dosificación debe ser determinada por ensayos de litio con el agregado reactivo específico a ser usado. En este momento no hay un consenso con respecto a la idoneidad de ensayos acelerados para determinar la correcta dosificación de litio, y es recomendado usar el ensayo de prismas de concreto. (U.S. Department of Transportation, 2013)

2.2. CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

Es definido como concreto compactado por compactación con rodillo, concreto que, en estado no endurecido, soportará un rodillo vibratorio mientras es compactado. CCR es usualmente mezclado usando equipos de alta capacidad de dosificación o mezcla, llevado con camiones y esparcidos con uno o más

bulldozers en capas previo a su compactación. CCR pueden usar un rango más grande de materiales que concreto convencional. (American Concrete Institute, 1998).



Figura N° 12 Etapa de prueba de CCR (Fuente Propia, 2017)

2.2.1 Materiales

El material usado para CCR es casi lo mismo de eso usado en concreto masivo convencional e incluye agregado fino y grueso, agua, material cementante (cemento y puzolana) y aditivos.

Todos los materiales del CCR deben cumplir los requerimientos de las especificaciones de calidad mínimas antes de iniciar la construcción. Para proyectos pequeños, los materiales deben ser aceptados basados en los certificados del proveedor. Grandes proyectos podrían requerir pilas de acopio de agregados y ensayos previos antes de usarse, para mantener la alta tasa de producción necesaria para el CCR (U.S. Department of the Interior, 2017).

a) Agua

La mezcla de agua para CCR debe ser libre de cantidades objetables de materia orgánica, sales y otras impurezas. Las especificaciones comúnmente limitan el contenido de sulfato soluble a 3 000 partes por millón. El agua de lavado no es aceptable para su uso en CCR. Agua congelada usada para

reducir la temperatura de la mezcla de CCR debe cumplir los requerimientos (U.S. Department of the Interior, 2017).

b) Material cementante

Los materiales cementantes incluyen cemento y puzolana que sean conformes a ASTM u otros estándares de requerimientos de calidad.

-Cemento

Requerimientos específicos que podrían afectar la selección del apropiado cemento para CCR incluyen el tipo de concreto, límites de calor de hidratación, contenido de álcalis y la edad de diseño del concreto.

El cemento usado deberá cumplir los requerimientos de ASTM C 150.

Para aplicaciones de CCR masivos, cementos con calor modificado deben de ser usados para minimizar la generación de calor. En casos donde la resistencia a los sulfatos es requerida, cementos adicionados con una moderada resistencia a los sulfatos o alta resistencia a los sulfatos puede también ser especificada.

Dependiendo de los requerimientos específicos del proyecto, un cemento adicionado cumpliendo los requisitos de ASTM C 95, puede ser usado en lugar de mezclar cemento y puzolana por separado en el sitio (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2017).

-Puzolana

La puzolana debe cumplir los requerimientos de ASTM C 618.

Requerimientos físicos y químicos que afectan la calidad de la puzolana incluyen fineza (porcentaje retenido en la malla N° 325) y pérdida por ignición (LOI), contenido de álcalis y el indicador de resistencia relativa a los sulfatos.

La puzolana es considerada un material cementante, en lugar de un aditivo mineral porque la calidad de la puzolana puede afectar significativamente la calidad endurecida del concreto (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2017).

c) Aditivos

Las mezclas de CCR han usado aditivos reductores de agua y aditivos incorporadores de aire. Los aditivos deben estar conforme a las especificaciones ASTM, incluyendo la ASTM C 494, especificaciones para aditivos de concreto y ASTM C 260, especificaciones para aditivos incorporadores de aire.

Los aditivos son normalmente aceptados basados en las certificaciones del proveedor. La tasa de dosificación de aditivos reductores de agua y aditivos incorporadores de aire no son sustancialmente diferente que mezclas usando concreto convencional con agregados de calidad.

-Aditivo químico reductor de agua

El ASTM clasifica estos aditivos en 5 tipos, dependiendo de su uso para reducción de agua (tipo A), como acelerador (tipo C y E) o retardante (tipo B y D). Se han usado a tasas altas con éxito variable para mezclas usando altos porcentajes de limo o arcilla en agregados.

Los tipos A y D han sido usados en mezclas de CCR masivo. Estas incrementan su trabajabilidad. Los tipos B y D tienen características retardantes de fragua.

-Aditivo incorporador de aire

Se han usado para incrementar la resistencia al congelamiento y deshielo del CCR. Se usaron en la presa Santa Cruz e incrementaron la resistencia al congelamiento y deshielo cerca de 4 veces.

Para ser efectivo el aditivo incorporador de aire debe usarse en mezclas con consistencia Vebe de cerca de 20 segundos o menos usados con una arena limpia bien gradada (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2017).

d) Agregados

La gradación y calidad de los agregados afecta significativamente las propiedades en estado fresco y endurecido del CCR. La gradación afecta el contenido de vacíos, la trabajabilidad de la mezcla y la habilidad y efectividad para compactar el CCR.

El agregado fino generalmente debe consistir en arena natural durable o arena natural complementada con arena triturada para compensar las deficiencias en la gradación de arena natural. Las partículas de arena manufacturadas deben ser predominantemente cúbicas y estar libres de partículas planas y alargadas.

El agregado grueso generalmente debe consistir en grava natural o roca triturada, o una mezcla de grava natural y roca triturada con un mínimo de roca triturada al 50 por ciento, y debe mezclarse uniformemente.

Los ensayos físicos de propiedades físicas de agregados deben de estar aprobadas antes de iniciar el diseño del CCR. Para proyectos pequeños, la disponibilidad de fuentes locales debe ser inspeccionada para verificar que cumpla los requerimientos de calidad y gradación de ASTM C 33, agregados de concreto.

Si se contempla el uso de agregados de baja calidad, se deben desarrollar investigaciones tempranas para evaluar su desempeño frente los requerimientos del proyecto en estabilidad a largo plazo mecánica y química, y algunos requerimientos adicionales que se pudieran presentar (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2017).

-Gradación del agregado

Agregado fino debería cumplir los requerimientos de ASTM C 33, así como sustancias perjudiciales.

El agregado grueso debe cumplir los requerimientos de ASTM C 33, así como los límites para sustancias perjudiciales y requerimientos de propiedades físicas.

La mayoría de mezclas de CCR masivo tendrán un tamaño máximo nominal de 1 1/2" a 2". La recomendada gradación de ASTM C 33 es normalmente alcanzada con 2 pilas de acopio de agregado separadas. Si solo una pila de acopio de agregado es necesaria, un tamaño máximo nominal de 1" a 1 1/2" es sugerido (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2017).

-Calidad del agregado

Requerimientos de calidad para agregados finos y gruesos son dados en ASTM C 33. Son de particular interés la durabilidad a los sulfatos de los agregados finos y la resistencia a la abrasión del agregado grueso. En mezclas de CCR, agregados de baja calidad pueden fracturarse bajo la condición más severa de mezcla, transporte, vaciado y compactación. La fractura de agregados requerirá incrementar la limpieza de la capa y su preparación, esto podría disminuir su resistencia (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2017).

2.2.2 Diferencias con concreto convencional

El CCR es un tipo especial de concreto que tiene esencialmente los mismos ingredientes, pero en diferentes ratios con sustituciones parciales de puzolana en lugar de cemento.

El CCR es una mezcla de cemento, puzolana, agua, arena, agregados y aditivos, pero contiene mucha menor agua. La mezcla producida es esencialmente seca y tiene slump cero.

El CCR es vaciado en manera similar a pavimentar, el material es entregado en volquetes, extendido por bulldozer o máquinas pavimentadoras de asfalto modificadas y luego compactada por rodillos vibratorios

Esta técnica es usada en construcción de presas para reducir el tiempo de construcción en más de la mitad. Esta es también, una vía económica de construir una presa, dado que el costo es reducido en cerca a 5-30%, comparado a presas de concreto convencional, dependiendo del tamaño de la presa (HCC, 2015).

Cuadro N° 5 CCR versus concreto convencional (Fuente propia, 2018)

Descripción	CCR $f'c=120$ Kg/cm ²	Convencional $f'c=210$ Kg/cm ²
Cemento	140 Kg / m ³	345
Cantidad de agua	110 Kg / m ³	193
Slump	0 "	3"-4"
Entrega	Volquete	Mixer
Extendido	Pavimentadora	Buggie o directo de pluma



Figura N° 13 Texturas de CCR vs concreto convencional (U.S. Department of Transportation, 2016)

2.2.3 Propiedades de CCR en estado fresco

Las mezclas de CCR deben ser proporcionadas para alcanzar los requerimientos de diseño para propiedades en estado fresco y endurecido.

Las propiedades en estado fresco afectan primariamente la habilidad de compactar efectivamente la capa entera y, por lo tanto, alcanzar las propiedades en estado endurecido requerido (U.S. Department of the Interior, 2017).

a) Consistencia

La trabajabilidad es la propiedad del concreto que determinar la facilidad con que puede ser mezclado, vaciado, consolidado y acabado. No hay un ensayo disponible que mida esta propiedad en términos cuantitativos. Esto es usualmente una razón para usar algún tipo de medida de consistencia como índice para medir la trabajabilidad.

La consistencia puede ser definida como la propiedad relativa de la mezcla de concreto fresco a fluir. El ensayo de Slump es el ensayo más familiar para medir la consistencia y es la base para la medición de la consistencia en ACI 211.1.

Un concreto con no-slump tiene pobre trabajabilidad si se consolida manualmente. Sin embargo, si se usa vibración, tal concreto puede ser considerado con adecuada trabajabilidad.

El rango de mezclas trabajables puede ser, por lo tanto, ampliada por técnicas de consolidación que imparten alta energía en la masa a ser consolidada. El aparato Vebe, es frecuentemente usado hoy en día en el CCR para determinar la consistencia. (ACI,2009)

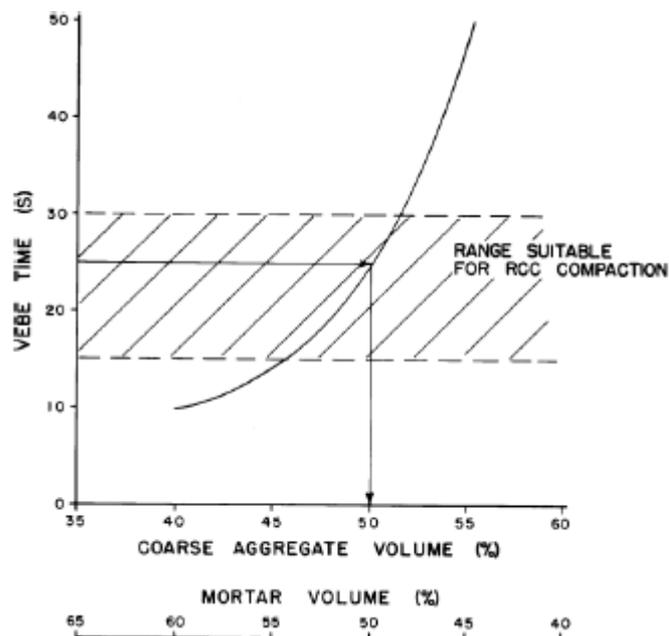


Figura N° 14 Rango de tiempo Vebe adecuado para buena compactación con rodillo vibratorio (U.S. Department of the Interior, 2017)

Una comparación de resultados del ensayo Vebe con el ensayo convencional de slump se muestra en la Cuadro siguiente. El ensayo VeBe puede proveer una medida de consistencia en mezcla denominadas como “extremadamente secas”. El tiempo Vebe de compactación está influenciado por otros factores como las condiciones de humedad de los agregados, el tiempo de intervalo después de mezclado y las condiciones climáticas (ACI,2009).

Cuadro N° 6 Comparación de consistencia para slump y el aparato Vebe (ACI, 2009)

Descripción de la Consistencia	Slump (mm)	Slump (pulg.)	Vebe (s)
Extremadamente seca	-	-	32 a 18
Muy seca	-	-	18 a 10
Seca	0 a 25	0 a 1	10 a 5
Seca plástica	25 a 75	1 a 3	5 a 3
Plástica	75 a 125	3 a 5	3 a 0
Muy plástica	125 a 190	5 a 7 1/2	-

b) Segregación potencial

La propiedad más importante de CCR en estado fresco es una mezcla con mínima segregación. La segregación de agregados grueso y largos lleva a una pobre unión entre capas subsecuentes de CCR, incrementa el volumen de vacíos entre agregados y podría resultar en una excesiva filtración entre capas. La segregación es generalmente causada por mezclas que son muy secas combinadas con técnicas pobres de transporte y vaciado.

Mezclas con consistencia Vebe menor a 20 segundos, generalmente tienen menos segregación que las mezclas con mayor tiempo de consistencia.

Las mezclas compactadas cerca del óptimo contenido de humedad están ahora siendo especificadas cerca de 0.5 a 1 % más húmedas del óptimo contenido de humedad para reducir la segregación (U.S. Department of the Interior, 2017).

c) Temperatura

La temperatura de vaciado de CCR en estado fresco influenciará en la trabajabilidad de la mezcla, el tiempo de fragua del CCR y la rigidez de la capa de la superficie, y puede también influenciar en la unión entre capas.

Temperaturas bajas de vaciado, combinadas con un retardante y altos contenidos de puzolana, pueden retrasar el tiempo de fragua por encima de 36 horas (U.S. Department of the Interior, 2017).

d) Densidad

La densidad y volumen de vacíos en CCR en estado fresco influenciará su desempeño en estado endurecido. La densidad de los materiales y el grado de consolidación gobiernan la densidad del CCR.

La densidad de un CCR es normalmente asumida en alrededor de 2400 Kg/m³ sin aire atrapado y con un volumen de vacíos entre 0.5 a 1.5 %. Si una capa de CCR no está completamente compactada, el porcentaje de vacíos a lo largo de la junta entre capas podría alcanzar 5 a 10%, resultando en filtración y pobre adherencia.

Proyectos recientes que el Bureau of Reclamation ha construido, han mostrado que es posible incorporar aire en el CCR. Esto reduce ligeramente la densidad a 2300 Kg/m³, pero incrementa significativamente la resistencia al congelamiento y deshielo (U.S. Department of the Interior, 2017).

2.2.4 Propiedades de CCR en estado endurecido

Las mezclas de CCR deben ser proporcionadas para alcanzar propiedades elásticas y de resistencia para las condiciones de esfuerzo de diseño, minimizar esfuerzos inducidos por temperatura causando fisuración y para alcanzar requerimientos de durabilidad relacionado a las condiciones del sitio.

Es de primordial importancia en el proporcionamiento de mezclas de CCR encontrar el balance entre la cantidad de cemento para alcanzar la resistencia y durabilidad, a la vez que minimizar el contenido de cemento para reducir la temperatura pico la cual está asociada a fisuras potenciales por temperatura.

a) Resistencia a la compresión y propiedades elásticas

El diseño basado en la resistencia a la compresión es normalmente especificado para la mayoría de estructuras de CCR. Aunque podría no ser el criterio de diseño gobernante, la resistencia a la compresión es un buen indicador de composición de mezcla y variabilidad, y es mucho más fácil de ensayar que la resistencia de la unión entre capas o propiedades térmicas.

La resistencia a la compresión y propiedades elásticas son gobernadas por la relación agua-cemento (a/c) y el grado de compactación.

La resistencia a la compresión de concreto será reducida cerca de 5% por cada 1% de aire que podría ser removido, pero no es removido (U.S. Department of the Interior, 2017).

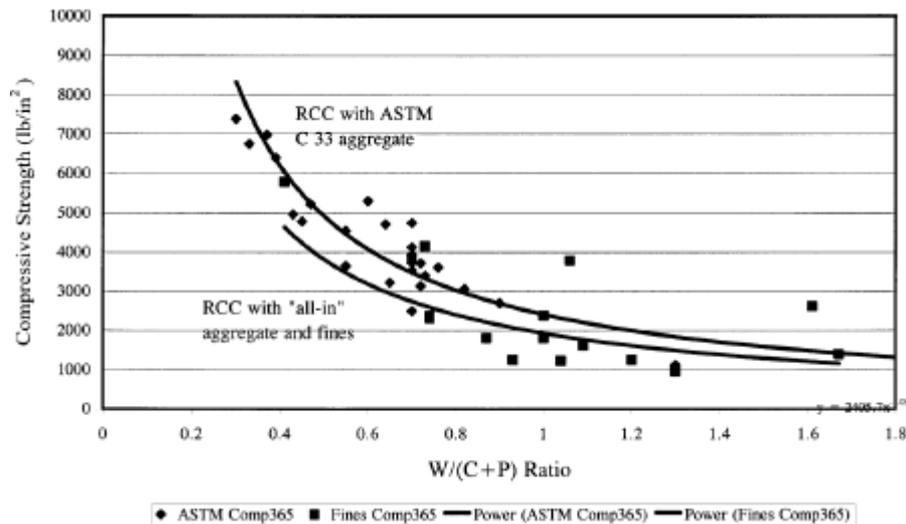


Figura N° 15 Resistencia a la compresión de CCR vs relación $w/(c + p)$ (U.S. Department of the Interior, 2017)

Algunas mezclas de CCR no pueden ser efectivamente compactadas en todo el espesor de la capa, dejando poros y capas sin adherir. Esto es debido a insuficiente trabajabilidad en la compactación y, particularmente, segregación del agregado grueso durante el vaciado. La habilidad para detectar una compactación incompleta está limitada a la disponibilidad del equipo del ensayo. Sin embargo, si la trabajabilidad es adecuada, la compactación de toda la capa se logrará con 6 pasadas del rodillo vibratorio.

Un error común es reducir el contenido de humedad para disminuir el bombeo y un intento de aumentar la densidad de la superficie; sin embargo, conlleva a la no compactación completa de toda la capa (U.S. Department of the Interior, 2017).

b) Durabilidad

La durabilidad del CCR es gobernada por el mismo principio tal y como el concreto convencional. El CCR tendrá solo una mínima resistencia a la acción de congelamiento y deshielo a menos que este esté protegido de congelamiento y saturación crítica o el uso de un aditivo. Un CCR incorporado

de aire incrementa la resistencia al congelamiento y deshielo, así como la trabajabilidad en estado fresco.

La baja resistencia de algunas mezclas reducirá la durabilidad del CCR, particularmente en edades tempranas.

Apropiada selección del tipo de cemento y uso apropiado de puzolana gobernará la durabilidad contra reacciones químicas, como reacción álcali agregado o ataques de sulfatos (U.S. Department of the Interior, 2017).

2.2.5 Producción

La calidad de la producción y vaciado del CCR está directamente relacionado al equipo y experiencia del personal del contratista y el control de calidad del proyecto y medidas de aseguramiento de calidad.

a) Producción de Agregado

Desde la etapa de diseño se deben identificar fuentes locales de agregados para estimar el costo del proyecto. Además, se deben realizar una serie de ensayos del agregado de las fuentes locales que garanticen que se cumplan con los requisitos de calidad y las especificaciones para agregado grueso y fino.

Es deseable que se identifiquen un mínimo de dos potenciales fuentes de agregado que cumplan con los requerimientos.

Las especificaciones generalmente requieren que un mínimo volumen de arena y agregado grueso esté disponible para su uso en la zona de trabajo antes de iniciar el vaciado de CCR. Incluso algunos proyectos, requieren la cantidad total de agregados en pilas en la zona de trabajo antes de vaciar cualquier CCR.

En climas cálidos es probable que se ocasione un exceso de la temperatura máxima de CCR durante el vaciado, entonces un enfriamiento previo de agregados es necesario. Se puede enfriar con fajas de enfriamiento para agregado o incluso incorporación de agua fría (U.S. Department of the Interior, 2017).



Figura N° 16 Producción de Agregado (Nam Ngiep1 Power Company, 2016)

b) Mezclado

Las plantas de mezclas de CCR incluyen plantas convencionales y plantas de alimentación continua.

Las plantas convencionales proveen adecuada precisión y control de entrega con registro de pesos. Estas plantas proveen cierta flexibilidad en la producción de otros concretos necesarios para la obra.

Las plantas de alimentación continua pueden ser de fajas o volumétricas. Las de faja proveen en cierta forma la capacidad de ver la proporción de mezcla durante la entrega.

Las plantas de mezclado deben colocarse en la zona de trabajo. Generalmente, la capacidad promedio de la planta debe cumplir con el volumen necesario para vaciar al menos dos capas de CCR por día. Esta ratio generalmente provee una buena unión en la superficie de la junta con un mínimo tratamiento.

Uno de los más importantes requerimientos para una operación exitosa de mezclado de CCR es mantener una alimentación continua de agregados con un contenido de humedad constante. Cambios en el contenido de humedad de agregados dificultan una buena proporción de mezcla y es un error frecuente en las plantas de mezclado (U.S. Department of the Interior, 2017).

c) Transporte y Entrega

El sistema de entrega debe transportar y vaciar el CCR rápidamente sin un acarreo perjudicial. El sistema de entrega debe proveer eficiente acceso a todas las partes del sitio.

El CCR es usualmente transportado en camiones, sistemas de fajas o una combinación de ambos. Los métodos de transporte deben minimizar la segregación del CCR, no reducir la trabajabilidad y evitar la contaminación de la superficie de la junta entre capas. Además, debe ser capaz de transportar el CCR al lugar de vaciado entre los 15 minutos posterior al mezclado. Si se usan camiones para el transporte, se deben lavar las llantas para evitar la contaminación (U.S. Department of the Interior, 2017).



Figura N° 17 Vaciado de CCR (Nam Ngiep1 Power Company, 2016)

d) Extendido

El método común para extendido es usar bulldozer. El CCR debe ser extendido por la superficie hasta producir un espesor de capa de 30 cm luego de la compactación.

Es importante que el CCR sea transportado, vaciado, extendido y compactado cerca de los 45 minutos posteriores a que el agua se mezcla con el cemento en la mezcla (U.S. Department of the Interior, 2017).



Figura N° 18 Extendido del CCR (Rotec, 2017)

e) Compactado

La compactación y consolidación del CCR es importante para obtener la resistencia y densidad requerida. La adecuada compactación puede ser obtenida generalmente con seis a ocho pasadas con un rodillo vibratorio de 10 toneladas. Capas con espesores mayores a 30cm podrían no obtener adecuada compactación en la parte más baja de la capa y esto debe ser evitado.

Cuando se usan equipos vibratorios de menor tamaño, se deben usar capas de 15cm para obtener una adecuada compactación.

Una buena inspección y control de calidad son necesarios para asegurar la densidad especificada. La medida en campo de la densidad es generalmente obtenida con un densímetro nuclear (U.S. Department of the Interior, 2017).



Figura Nº 19 Compactado del CCR (Fuente Propia, 2017)

f) Preparación de superficie de juntas

En general, la superficie de la junta de CCR debe mantenerse continuamente húmeda y libre.

El tratamiento de la superficie de la capa y los requerimientos de limpieza dependen del tiempo y son afectados por la mezcla de CCR, agua, temperatura ambiente, métodos de vaciados y la programación del vaciado. En una forma sencilla, el tiempo de tratamiento de junta requerido puede ser definido por fijar un tiempo antes del siguiente vaciado.

g) Curado y Protección

Es importante que el CCR sea continuamente curado para mantener la humedad por 14 días o hasta vaciar la siguiente capa. El curado del CCR es generalmente logrado con agua. La aplicación de un componente para el curado no es un método aceptable porque se aplica en las juntas. (U.S. Department of the Interior, 2017).



Figura N° 20 Producción del CCR (Elaboración propia, 2017)

2.3. PUZOLANA

Materiales silíceos o aluminio -silíceos los cuales por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio, a temperatura ambiente, para formar compuestos con propiedades cementantes (ASTM, 2001).

2.3.1 Historia

Puzolanas naturales han sido usadas por siglos. El término “puzolana” viene de una ceniza volcánica extraída de Pozzuoli, una villa cerca a Nápoles, Italia, después de la erupción del Monte Vesubio en el año 79 D.C. Sin embargo; el uso de ceniza volcánica y arcilla calcinada se remonta a 2000 A.C. y anterior en otras culturas. Muchas de las estructuras de concreto con puzolana de Roma, Grecia, La India y Egipto pueden todavía verse, que acredita la durabilidad de estos materiales.

La experiencia norteamericana con puzolanas naturales se remonta a proyectos de obras públicas de inicios del siglo 20, tales como presas, donde se usaron para controlar el aumento de la temperatura en el concreto masivo y proveer material cementicio. Además del control del aumento de temperatura, las puzolanas naturales se usaron para mejorar la resistencia a ataques de sulfato y estuvieron entre los principales materiales para mitigar la reacción álcali – sílice (Portland Cement Association, 2015).

2.3.2 Composición Química y Mineralógica

Las propiedades de puzolanas naturales varían considerablemente, dependiendo de su origen, debido a las proporciones variables de los constituyentes y la variable mineralógica y características físicas de los materiales activos. La mayoría de las puzolanas naturales contienen cantidades sustanciales de constituyentes además de sílice, tal como alúmina

y óxido de hierro, que reaccionarán con el hidróxido de calcio y los álcalis (sodio y potasio) para formar complejos componentes.

La actividad puzolánica no puede ser determinada solo cuantificando la presencia de sílice, alúmina y hierro. La cantidad de material amorfo usualmente determina la reactividad de la puzolana natural. Los constituyentes de la puzolana natural pueden existir en varias formas, variando de materiales amorfos reactivos a productos cristalinos que reaccionarán lentamente o no reaccionarán. Debido a que la cantidad de material amorfo no puede ser determinada por técnicas estandarizadas, es importante evaluar cada puzolana natural para confirmar el grado de actividad puzolánica. No hay una clara distinción entre material silíceo que son considerados puzolánicos y los que no lo son.

Generalmente, la sílice amorfa reacciona con hidróxido de calcio y álcalis más rápidamente que la sílice en forma de cristales (cuarzo). Como es el caso con todas las reacciones químicas, las partículas más largas (menor área superficial por unidad de volumen) tienen menor rapidez de la tasa de reacción. Por la tanto, la composición química de una puzolana no determinada claramente la capacidad para combinarse con hidróxido de calcio y álcalis.

Los vidrios volcánicos y tobas zeolíticas, combinados con limo, producen silicato de calcio hidratado (CSH) así como también aluminatos de calcio hidratados y aluminosilicatos de calcio. Estos materiales probaron ser buenas puzolanas hace mucho tiempo.

Arcillas naturales y pizarras no son puzolanas o solo débilmente, debido a que los minerales de la arcilla no reaccionan rápidamente con el limo a no ser que la estructura cristalina es parcialmente o completamente destruida por calcinación a temperatura por debajo de 1093 °C.

Caolín altamente puro debe ser procesado para formar una puzolana de alta calidad llamado metacaolín de alta reactividad.

Investigadores italianos que han estudiado vidrios volcánicos y su relación con la actividad puzolánica creen que “vidrio reactivo originado de la explosión de erupciones volcánicas” como el que viene de los volcanes de Thera y el Monte Vesubio, que produjeron las puzolanas naturales con aluminosilicato de vidrio inalterado como su mayor componente. Ambas son pumicitas, un tercio de los cuales está en el estado amorfo (vidrio), y son altamente reactivos con limo y álcalis a temperaturas normales (ACI, 2000).

2.3.3 Clasificación

Clase N: Puzolanas naturales cruda o calcinadas que cumplen con los requerimientos aplicables para tal clase como dado en el Cuadro N^o, tal como algunas tierras diatomeas, opalina y pizarras, tufo y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinadas o sin calcinar, y varios materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tal como algunas arcillas y pizarras.

Clase F: Ceniza volante que cumple con los requerimientos aplicables para esta clase dado en el siguiente Cuadro. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.

Clase C: Ceniza volante que cumple con los requerimientos aplicables para esta clase dado en el siguiente Cuadro. Esta clase de ceniza volante, además de tener propiedades puzolánicas, tiene algunas propiedades cementantes (ASTM, 2003).

Cuadro N^o 7 Requerimientos químicos según clase de puzolana (ASTM, 2003)

	Requerimientos Químicos		
	Clase		
	N	F	C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% mínimo)	70.00	70.00	50.00
SO ₃ (% máximo)	4.00	5.00	5.00
Contenido de Humedad (% máximo)	3.00	3.00	3.00
Pérdida por ignición (% máximo)	10.00	6.00	6.00

*El uso de puzolana clase F conteniendo más de 12% de pérdida de ignición puede ser aprobados por el usuario si se tienen disponibles registros de desempeño aceptables o resultados de ensayos de laboratorio.

Cuadro N° 8 Requerimientos químicos de puzolanas (ASTM, 2003)

	Requerimientos Químicos		
	Clase		
	N	F	C
Finura: Cantidad retenida tamizada en húmedo en 45µm (tamiz No.325) (% máximo)	34.0	34.0	34.0
Índice de actividad de Resistencia:			
-Con cemento portland, a 7 días (% mínimo)	75.0	75.0	75.0
-Con cemento portland, a 28 días (% mínimo)	75.0	75.0	75.0
Requerimiento de agua (% máximo)	115.0	105.0	105.0
Estabilidad a la disgregación: Expansión en el autoclave o contracción (% máximo)	0.8	0.8	0.8
Requerimientos de Uniformidad: La densidad y finura de muestras individuales no debe variar del promedio establecido por 10 ensayos precedentes, o por todos los ensayos precedentes si el número es menos de 10, en más de:			
-Densidad (máx. variación del promedio %)	5.0	5.0	5.0
-Porcentaje retenido en 45µm (tamiz No.325) (máx. variación del promedio %)	5.0	5.0	5.0

2.3.4 Efectos de Puzolana Natural en Concreto

El principal efecto que tiene la puzolana natural es el de inhibir la reacción álcali-sílice.

Formas de inhibir la reacción álcali-sílice:

1-Cuando el cemento es parcialmente reemplazado por una puzolana, la contribución total de álcalis del cemento se reduce.

2-El producto de reacción de cemento puzolana tiene una relación de $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ (C / S) más baja que el producto de reacción de los silicatos de calcio del cemento Portland solo.

Este gel de hidrato de silicato de calcio (C-S-H) tiene una mayor capacidad para atrapar álcalis y reducir el pH del fluido de poro del concreto.

3-Las reacciones puzolánicas consumen hidróxido de calcio, un abundante producto de hidratación en concreto, y el gel de RAS esto forma que en una pasta con reducida cantidad de hidróxido de calcio pueda tener menor características de hinchamiento.

4-La reacción puzolánica o la hidratación de la escoria produce una pasta más densa al reducir la cantidad de hidróxido de calcio y producir gel C-S-H adicional. Esto es particularmente significativo ya que ocurre en la interfaz pasta-agregado. Este efecto reduce la movilidad de iones y posiblemente ralentiza la velocidad de reacción. También hace que el concreto sea menos permeable a la humedad y los álcalis externos. (ACI, 1998)

5-Calor de Hidratación:

Las puzolanas naturales poseen un menor calor de hidratación que el cemento portland, consecuentemente estas reducirán la cantidad de calor en una estructura de concreto construida. Algunas puzolanas tienen un calor de hidratación de solo el 40% del cemento portland tipo I. Esta reducción en la temperatura pico es especialmente beneficiosa en concretos usados en estructuras masivas. (PCA, 2008).

2.3.5 Índice de Actividad Puzolánica

El ensayo de actividad puzolánica es usado para determinar si la puzolana natural resulta en un nivel aceptable de desempeño de resistencia cuando es usada con cemento hidráulico en concreto.

Se determina la resistencia a la compresión, de acuerdo al ensayo de compresión de cubos de mortero, de tres especímenes para la mezcla de control a edades de 7 o 28 días, o ambas.

En lo que se refiere a valores, de acuerdo con ASTM(2003), se establece como valor mínimo de índice de actividad puzolánica 75%, para poder ser usada.

-Mezcla de control:

500g de cemento Portlánd

1375g de arena grada

242ml de agua

-Mezcla de ensayo:

400g de cemento Portlánd

100g de puzolana

1375g de arena grada

Agua necesaria para obtener $\pm 5\%$ del flujo de la mezcla de control

El índice de actividad puzolánica se calcula como sigue:

Índice de Actividad Puzolánica= $(A / B) \times 100$

A=Promedio de resistencia a la compresión de la mezcla ensayo

B=Promedio de resistencia a la compresión de la mezcla de control (ASTM, 2002).

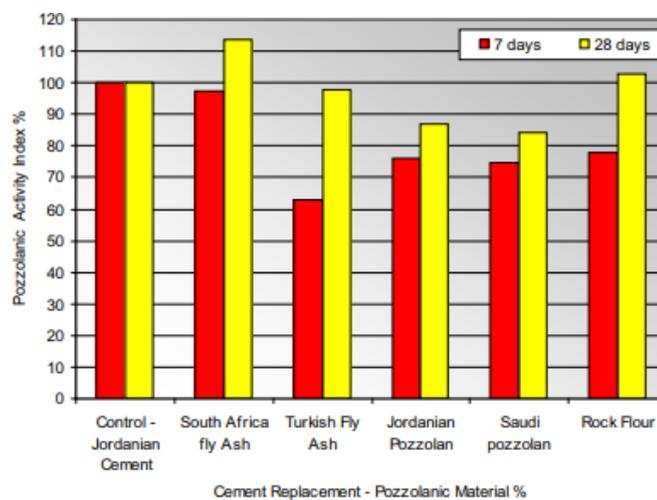


Figura N° 21 Índice de actividad puzolánica (Husein A., Ehab S. & Husein D., 2017)

2.4. PRESAS DE CCR

2.4.1 Historia

La rápida aceptación mundial del CCR es un resultado de su resultado económico y exitoso desempeño. Durante 1960 a 1970, se usaron materiales que pueden ser considerados como CCR. Estas aplicaciones guiaron al desarrollo del CCR en estructuras de concreto. En 1960, una alta producción de mezclas no-slump que podrían ser esparcidas con bulldozers fue usada en la presa Alpe Gere en Italia y en Canadá. Estas mezclas fueron consolidadas con un grupo largo de vibradores internos montados en bulldozers.

La rápida construcción de presas de gravedad usando equipo de movimiento de tierras, incluyendo largos rodillos para compactación, fueron sugeridos en 1965 como una opción más económica de construcción.

El Cuerpo de Armada de Ingenieros de Estados Unidos condujeron estudios de construcción de CCR en la estación experimental de Waterways en 1973 y la presa Lost Creek en 1974. Mucho de estos conceptos fueron llevados a cabo durante la presa Willo Creek, la cual se convirtió en la primera presa de CCR en Estados Unidos.

Empezando finales de los años 1970 en Japón, la filosofía de diseño y construcción referido como presas de compactadas con rodillos (RCD) fue desarrollada para la construcción de la presa Shimajigawa. En el contexto de este reporte, el CCR y el RCD fueron considerados lo mismo. La presa Shimajigawa fue completada en 1981, con aproximadamente la mitad de este concreto siendo CCR del total del concreto.

La presa Willow Creek y Shimajigawa en Japón, son las principales estructuras que iniciaron la rápida aceptación del CCR para presas. Ellas son similares desde el punto de vista que ambas usan CCR, pero son diferentes respecto al diseño, propósito, detalles constructivos, tamaño y costo (ACI, 1999).



Figura Nº 22 Presa Willow Creek (Wikipedia, 2009)



Figura Nº 23 Presa Shimajigawa (Fujii K., 2012)

Muchas de las presas de inicios de 1980 demostraron exitosamente altas tasas de producción con la construcción de CCR. Cerca de 1.1 millones de m³ de CCR fueron vaciados en la presa Upper Stillwater en 11 meses. En la presa Elk Creek, las ratios de CCR excedieron 9200 m³ / día.

El uso de CCR para presas pequeñas y medianas continuó a en Estados Unidos durante 1980 hasta inicios de 1990 y se expandió a proyectos más grandes por todo el mundo.

Los rápidos avances en la construcción de CCR ocurrieron en países en desarrollo para satisfacer las crecientes necesidades de agua y energía (Usace, 2006).

En Brasil se construyó la presa Saco de Nova Olinda. Cerca de 138 000 m³ de CCR colocado en 110 días.

En Argentina, presa de Urugua-i. Volumen de 600 000 m³ de CCR colocado en 270 días. (Cemex, 2015)

2.4.2 Proyectos Realizados

a) En el mundo

En el siguiente gráfico se muestra la cantidad de presas de CCR por país hasta el año 2015:

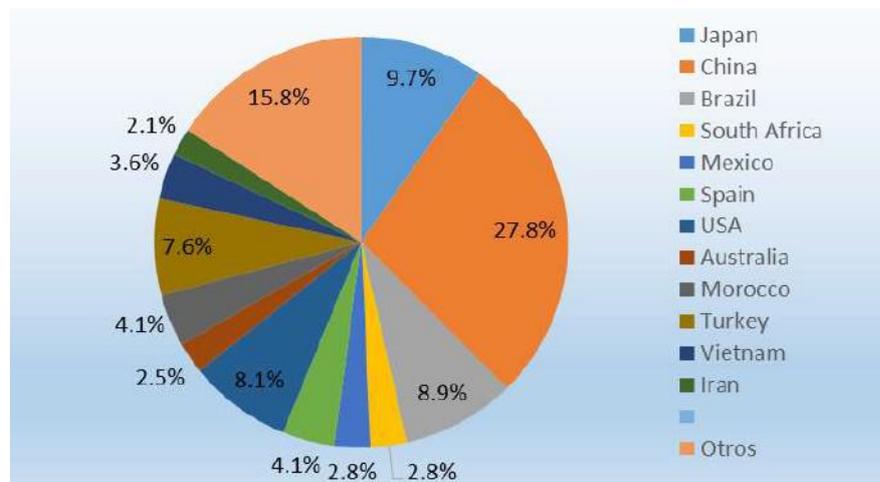


Figura N° 24 Situación actual de la construcción de presas de CCR (Cemex, 2015)

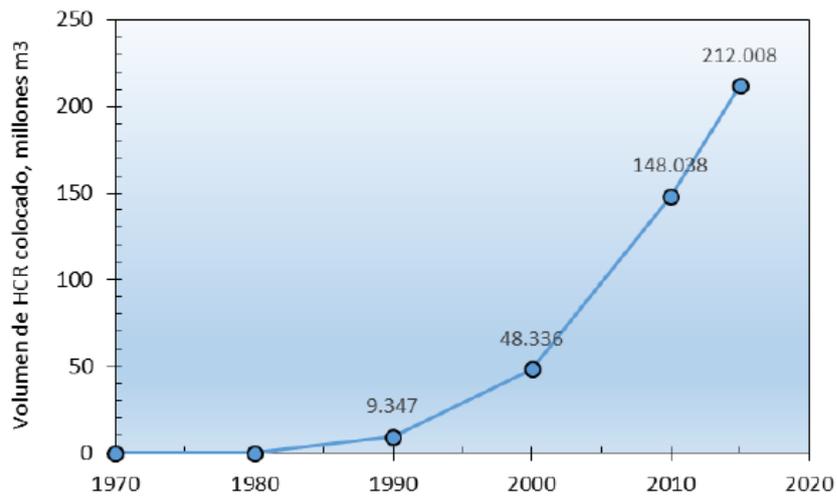


Figura N° 25 Volumen de CCR colocado, en millones m³ hasta 2015 (Cemex, 2015)

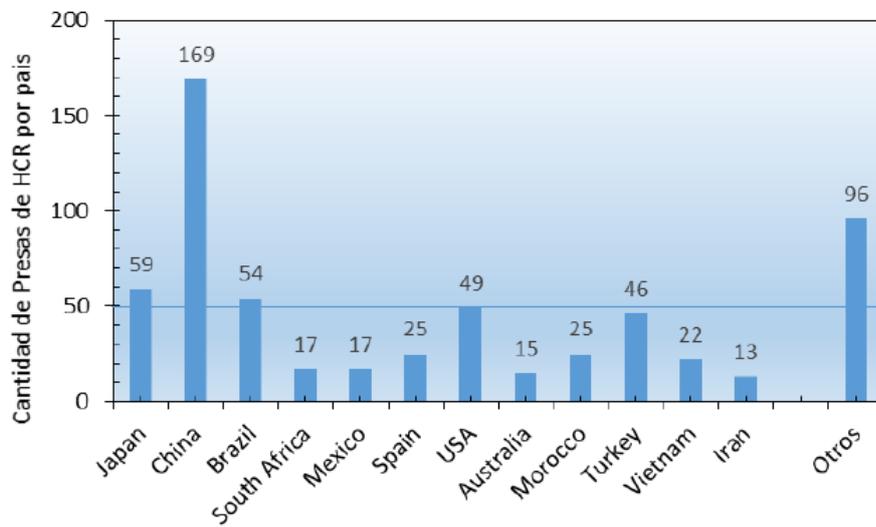


Figura N° 26 Situación actual de la construcción de presas de CCR hasta 2015 (Cemex, 2015)

b) En el Perú



Figura Nº 27 Presas CCR en el Perú (Elaboración Propia, 2018)

-Presas Chaglla

La Central Hidroeléctrica de Chaglla se ubica en la región Huánuco y cubre una extensión de 35 Km desde el puente Chinchavito ingresado por los túneles carreteros, construidos exclusivamente para el acceso a la zona de obras (Rumbo Minero,2016).



Figura Nº 28 Presa Chaglla de CCR (Rumbo Minero, 2016)

-Presa Cerro del Águila

Se ubica en la región Huancavelica, tiene un volumen de 480 000m³ de CCR y 80m de altura. Forma parte de la segunda central hidroeléctrica más grande del Perú (Graña y Montero, 2016)



Figura N° 29 Presa de Cerro del Águila (Graña y Montero, 2016)

-Presa Vizcachas

Anglo American construye actualmente la presa Vizcachas (ubicada en la zona alto andina de Moquegua), para almacenar hasta 60 MMC, con capacidad de entrega de agua de hasta 28 MMC por año. De esta cantidad, Quellaveco solo usará para sus operaciones 4 MMC anuales en promedio, que serán bombeados hasta la mina a 95 km de distancia.

Parte del agua represada será para uso de la región Moquegua. El valle de Tambo también se beneficiará con agua de mejor calidad, ya que se le entregará agua limpia en los meses de estiaje (Angloamerican, 2018)

2.4.3 Beneficios

Las técnicas de construcción de CCR han hecho a las presas de CCR una alternativa económica competitiva al concreto convencional por los siguientes factores:

a) Costo: Registros de costos de construcción de presas de CCR y concreto convencional ha mostrado que el costo unitario por yarda de CCR es considerablemente menos que el vaciado convencional de concreto. Aproximadamente los costos de CCR varían en un rango de 25% a 50% menos que el concreto convencional. La diferencia en el porcentaje de ahorro usualmente depende de los costos de agregado y materiales cementantes, la complejidad del vaciado y la cantidad total de concreto vaciado.

Ahorros asociados con CCR son primariamente a través de la reducción de costos de encofrados, vaciado y compactación y reducción de tiempos de construcción.

La siguiente figura, muestra la relación de costo de CCR vs el volumen de CCR, basado en proyectos de CCR en Estados Unidos (Usace, 2006).

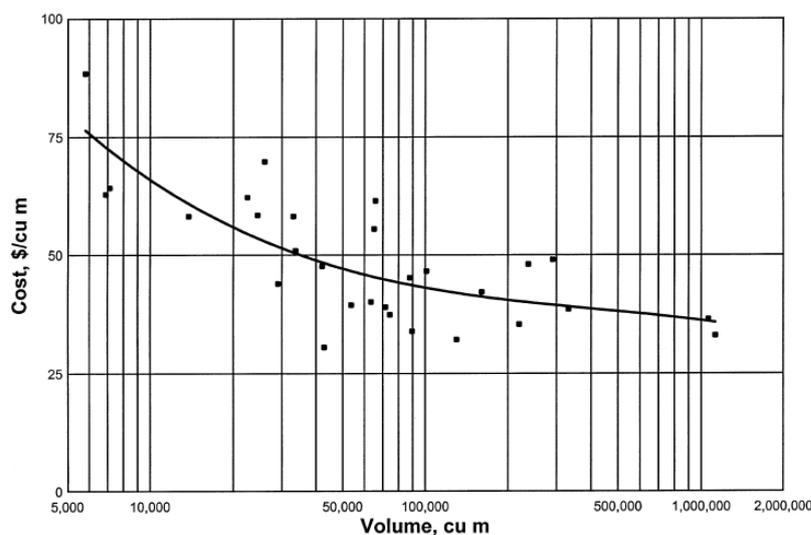


Figura N° 30 Costo de CCR vs el volumen de CCR, basado en proyectos de Estados Unidos (Us Army Corps of Engineers, 1998)

b) Construcción rápida: Técnicas de construcción rápida (en comparación con los de presas de concreto y terraplenes) y menores cantidades de material (en comparación con las de terraplenes de presa) representan importantes ahorros de costos en las presas de CCR. El proceso constructivo promueve un vaciado continuo cercano, haciendo posibles tasas de producción muy altas.

Estas tasas de producción acortan significativamente el periodo de construcción de la presa. Cuando comparamos con terraplenes o concreto convencional, el tiempo de construcción para proyectos largos, pueden ser reducidos en varios meses a varios años.

Otros beneficios de la rápida construcción incluyen reducir los costos administrativos, beneficios adelantados del proyecto, posible reducción o eliminación de instalaciones de desviación y posible uso de los sitios de la presa con temporadas de construcción limitadas. Básicamente, la construcción de CCR ofrece ventajas económicas en todos los aspectos de la construcción de la presa que son relacionados con el tiempo.

c) Aliviaderos integrales y estructuras adjuntas: Así como con las presas convencionales de hormigón, los aliviaderos para presas de CCR pueden ser directamente incorporados en la estructura. Un diseño típico permite la descarga del flujo sobre la cresta de la presa y debajo de la cara aguas abajo. En contraste, los aliviaderos para una presa de terraplén son normalmente construidos en un estribo a un extremo de la presa.

Un terraplén de presa con un aliviadero separado y obras de salida es generalmente más costoso que los comparables con presas de CCR con un aliviadero integral y obras de salida. Para proyectos que requieren un ingreso de niveles múltiples para el control de la calidad de agua o para reservorios de sedimentación, la estructura de ingreso puede ser fácilmente anclada a la cara aguas arriba de la presa de CCR.

Para una presa de terraplén, el mismo tipo de estructura de ingreso será una torre independiente en el reservorio o una estructura construida dentro o encima del reservorio al lado del estribo.

El costo de una estructura de ingreso para una presa de CCR es considerablemente más bajo que el costo de una estructura de ingreso para una presa de terraplén, especialmente en zonas sísmicas. La dimensión más corta de la base de una presa de CCR, comparada con una presa de terraplén, reduce el tamaño y longitud requerido del conducto y tubería reforzada para las

obras de salida e hidroeléctricas, y también reduce los costos de preparación de la cimentación.

d) Desviación minimizada y ataguía: las presas de CCR proveen ventajas de costo en desviación del río durante la construcción y reduce daños y riesgos asociados con el desbordamiento de ataguía. El conducto de derivación para presa de CCR será más corto que para presas de terraplén. Con un periodo de construcción menor, la probabilidad de aguas altas es menor, por lo tanto el tamaño del conducto de derivación y ataguía, puede ser reducido del requerido tanto como para presas de terraplén y presas de concreto convencional. Estas estructuras podrían necesitar ser diseñadas solo para un caudal estacional pico, en lugar de caudales picos anuales. Con la alta resistencia a la erosión del CCR, el potencial para una mayor falla será mínimo, y el resultante daño será menor, aún si el desborde de la ataguía ocurriera. Ventajas significativas pueden ser realizadas usando CCR para la construcción de estructuras de ataguía. Esto ofrece los beneficios de rápida construcción, poca huella ambiental y operatividad continua después de un desborde.

e) Otras ventajas: Cuando comparamos con terraplenes de presa, el menor volumen de presas de gravedad de CCR hace que la fuente de material de construcción sea menos que un factor determinante en la selección del sitio. Además, la fuente de préstamo será considerablemente menor y podría ser más ambientalmente aceptable. Las presas de CCR son también inherentemente más resistentes a erosión interna y rebalse (Usace, 2006).

2.4.4 Casos de Presas con Reacción Álcali Sílice

Presa Warsak: es una presa de gravedad de concreto construida en el río Kabul en 1960

En 1962, aparecieron fisuras en la casa de máquinas de concreto y fueron atribuidas a un asentamiento diferencial.

En 1974, se llevó a cabo la instrumentación de la presa, evaluando y monitoreando datos desde 1974 a 1982, que reveló que la causa era la RAS.

En el ensayo petrográfico se halló que casi el 38% del total de agregados eran reactivos y responsables de la RAS.

Presa Tarbela: comprende un terraplén principal y un par de presas auxiliares de concreto. El proyecto fue construido en el río Indo en 1976.

Para la construcción, material procesado de la cama del río fue usado como agregado de concreto para reducir el costo de proyecto. Algunos años después de la construcción, se observaron fisuras en los aliviaderos.

3 años después de la evaluación, se observó que las fisuras eran causadas por la RAS (Munir M., Qazi A., Kazmi S., Khitab A., Ashiq S. and Ahmed I., 2016).

Presa Hirakud: está compuesta de una estructura de tierra, concreto y albañilería a través del río Mahanadi, Odisha, La India.

El tipo de daño observado fue desprendimiento y fisuración después de 30 años de operación. Se observaron grietas horizontales, deflexiones, corte y chasquido de pernos que fijan los carriles guía de compuertas.

Un examen petrográfico y microscopio electrónico de barrido reveló que partículas de cuarcita usadas en el concreto mostraron la ocurrencia de RAS.

También, la examinación en concreto endurecido reveló que el concreto tenía un adecuado contenido de cemento y no fue atacado por el sulfato, aguas ácidas, etc. Muestras de núcleos de concreto del aliviadero del lado derecho se encontraron que habían experimentado la reacción álcali-sílice.

Presa Rihand, Uttard Pradesh, La India: es una presa de gravedad de concreto, localizada en el río Rihand. La construcción fue completada en el año 1962.

Los tipos de agregado usados fueron granito, gneiss (muscovita, biotita).

Se observaron los siguientes daños: fisuras longitudinales, grietas en las 24 columnas de la galería de la compuerta, patrón de fisuración en los muelles del aliviadero, fisuras en los apoyos del generador, entre otros.

Investigaciones llevadas a cabo en núcleos de concreto por microscopio electrónico de barrido revelaron la presencia de la RAS. La presencia de tal reacción perjudicial se manifestó por la ocurrencia de productos de gel dentro del concreto.

Presa Santa Lucía, Portugal: es una presa de arco cilíndrico completado en 1943.

La expansión debido a la RAS fue detectada a partir de los continuos movimientos ascendentes y descendentes de la cresta.

Desde el primer relleno del reservorio, se tomaron medidas geodésicas y de alineamiento del reservorio. El máximo desplazamiento de la presa acumulado sobre un periodo de 40 años se reportó en cerca de 50 mm.

Los análisis mineralógicos y petrográficos realizados sobre la presa mostraron que la RAS ocurrió de la reacción entre sílice reactiva proveniente de cuarzo y los álcalis suministrados por los feldespatos (“auto reacción”).

Aparte de proveer el ambiente alcalino, el cemento tuvo poco valor en la reacción.

Presa Stewart, Arizona, Estados Unidos: presa de arco de concreto, fue construida de 1928 a 1930. Los informes de campo de 1937 reportaron excesivo movimiento y fisuración en la cara aguas abajo, en los bloques de empuje y en otras partes.

Las deflexiones fueron suficientes para requerir reforzamiento entre la presa y la casa de máquinas localizadas en el pie aguas abajo.

Los ensayos conducidos en 1943 en núcleos extraídos de la presa confirmaron que el concreto estaba experimentando un fenómeno descrito como reacción álcali agregado.

La presa es está actualmente en un proceso de rehabilitación para restaurar la integridad estructural de la presa.

Presa Mactaquac, Nuevo Brunswick, Canadá: este proyecto de energía de 600-MW incluye una presa de rockfill y una central de concreto. Las estructuras de concreto fueron construidas durante 1964 a 1968.

El agregado y los álcalis en el cemento reaccionaron causando expansiones destructivas y generando altos esfuerzos. Aberturas en algunas juntas de construcción horizontal y vertical ocasionadas por la expansión de la RAS fueron descubiertas a mediados de 1970. En 1982, las grietas fueron notorias en la parte este del aliviadero. (New Central Soil and Materials Research Station New Delhi, 2008)

2.5. DISEÑO DE MEZCLA

2.5.1 Filosofía de diseño de mezcla

Los procedimientos de diseño de mezclas caen en dos categorías:

-La “aproximación a concreto” donde las mezclas son proporcionadas como una masa de concreto ajustada a soportar equipo de vaciado y compactación.

-La “aproximación a suelo” donde las mezclas son proporcionadas como suelo estabilizado o material de relleno compactado a la máxima densidad (Usace, 2017).

a) Aproximación a concreto

Las mezclas con “aproximación a concreto” tienden a usar materiales cercanos a especificaciones de concretos masivos. Las mezclas son proporcionadas para acercarse a las propiedades en estado fresco como trabajabilidad y segregación potencial y para alcanzar las propiedades en estado endurecido como resistencia de la junta(corte y tensión), resistencia a la compresión y durabilidad (Usace, 2017).

Este método usa el ensayo Vebe modificado, como la base para determinar la óptima trabajabilidad y proporciones de agregado. El tiempo para una consolidación completa es medido y comparado con ensayos de compactación en campo con rodillos vibratorios. El tiempo deseado es determinado basado en los resultados de ensayos de densidad y evaluación de los núcleos.

El tiempo de vibración es influenciado por un número de parámetros de la mezcla, incluyendo contenido de agua, gradación del agregado combinado, tamaño máximo nominal del agregado, contenido de agregado fino y contenido de material más fino que el tamiz 75 μm (Nº 200).

Mezclas que contienen arenas de hormigón relativamente limpias y gradación del agregado fija en 1 1/2" de tamaño máximo nominal, generalmente requieren entre 15 a 30 s para consolidación completa.

Las mezclas que contienen arena limpia, gradación fija del agregado y tamaño máximo nominal de 3/4" a ser usado en construcciones horizontales requieren aproximadamente 35 a 50 s para consolidación completa (ACI, 2009)

b) Aproximación a suelo estabilizado

Las mezclas proporcionadas como suelo estabilizado o relleno usan gradación sola o combinada de finos, arena y agregados gruesos mezclado con materiales cementantes y agua adecuada para alcanzar la máxima densidad. Durante el vaciado, la mezcla de "suelo estabilizado" aparece seca o menos trabajable que mezclas con "aproximación a concreto", que tienen una notable plasticidad o onda de presión en frente del rodillo vibratorio (Usace, 2017).

Este método de proporcionamiento involucra establecer una relación entre la densidad seca y la humedad del CCR por compactación de los especímenes a un esfuerzo de compactación dado sobre un rango de contenidos de humedad. Esto es similar a el método usado para determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca y mezclas suelo-agregado. El equipo de compactación usado incluye un martillo de compactación de acuerdo a ASTM D 1557.

Este método es adecuado para aquellas mezclas que tienen un TMN de 3/4 “o menos y mayor contenido de cemento que mezclas típicas de CCR usadas en secciones masivas. Debe ser generalmente considerado para proporcionar mezclas de secciones delgadas como pavimentos o losas. El esfuerzo de compactación a ser aplicado a los especímenes de humedad-densidad corresponde al descrito en ASTM D 1557.

El contenido de material cementante es determinado por resistencia a la compresión o a la flexión al óptimo contenido de agua para diferentes mezclas.

Después de completar los ensayos de compactación que conllevan a incrementos del contenido de humedad, los datos de humedad-densidad son graficados y una curva es dibujada a través de ellos. El pico de la curva parabólica establece el óptimo contenido de humedad (ACI, 2009)

Referirse a una mezcla como “húmeda” o “seca” podría no ser apropiado cuando comparamos mezclas. En realidad, la mezcla menos trabajable-seca de suelo podría algunas veces tener un contenido total de agua mayor que la mezcla más trabajable tipo concreto (Usace, 2017).

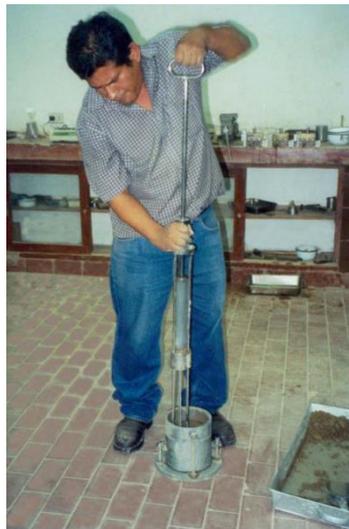


Figura Nº 31 Óptimo de humedad mediante Proctor Modificado (Escalaya, 2006)

2.5.2 Ajuste de Campo durante Construcción

La proporción de mezcla de CCR realizada en laboratorio podría requerir un ajuste en el campo debido a cambios de materiales, condiciones ambientales y la selección del constructor de condiciones de dosificación, mezclado, transporte, vaciado y compactación.

Las propiedades de la junta entre capas dependerán del control durante el vaciado y de la tasa de vaciado o intervalo de tiempo entre capas (Usace, 2017).

CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPONENTES DEL CCR

3.1. AGREGADOS

El agregado fino puede ser arena natural, arena manufacturada o una combinación de ambas. Deberá pasar el tamiz 3/8" y cumplir con los límites de las normas NTP 339.047.

Se permitirá el uso de agregados que no cumplan con las gradaciones, cuando existan estudios que aseguren que el material producirá concreto con las especificaciones requeridas por el proyecto.

Se usaron dos tipos de agregados para esta investigación, los cuales se denominaron: cantera C1 y cantera C2. Estos agregados fueron utilizados de manera independiente para elaborar los especímenes a ensayar.

El agregado grueso y el agregado fino fueron obtenidos por cada cantera, de manera que así, se pudieron elaborar especímenes con agregado grueso y agregado fino de una sola cantera, sin necesidad de mezclar agregados de diferentes canteras.

Los agregados fueron sometidos a ensayos para determinar sus propiedades físicas.

3.1.1 Cantera C1

a) Procedencia

El agregado con la denominación C1 procede de la ciudad de Moquegua.

Se obtuvo mediante la realización de voladuras, posteriormente su extracción y transporte a la ciudad de Lima mediante bolsas big bag de una tonelada.



Figura N° 32 Cantera C1 (Fuente Propia, 2018)

b) Análisis granulométrico

El agregado triturado procedente de la Cantera C1 fue sometido a un análisis granulométrico de acuerdo con la norma ASTM C 136, y en el siguiente gráfico se muestran los resultados:

Cuadro N° 9, Análisis granulométrico cantera C1- Agregado Fino (Fuente propia,2018)

TAMIZ		%RET.	% RET. ACUM.	% PASA	% PASA
(Pulg)	(mm)				HUSO
¾"	19	0.0	0.0	100.0	98 - 100
½"	12.5	5.8	5.8	94.2	-
3/8"	9.5	4.9	10.7	89.3	64 - 83
Nº4	4.75	17.7	28.4	71.6	49 - 66
Nº8	2.38	25.2	53.6	46.4	39 - 53
Nº16	1.19	23.8	77.4	22.7	29 - 41
Nº30	0.6	12.6	90.0	10.0	21 - 32
Nº50	0.3	5.8	95.8	4.2	14 - 23
Nº100	0.15	2.4	98.1	1.9	8 - 16
Nº200	0.075	0.0	98.1	1.9	4 - 10
FONDO		1.9	100	0	-

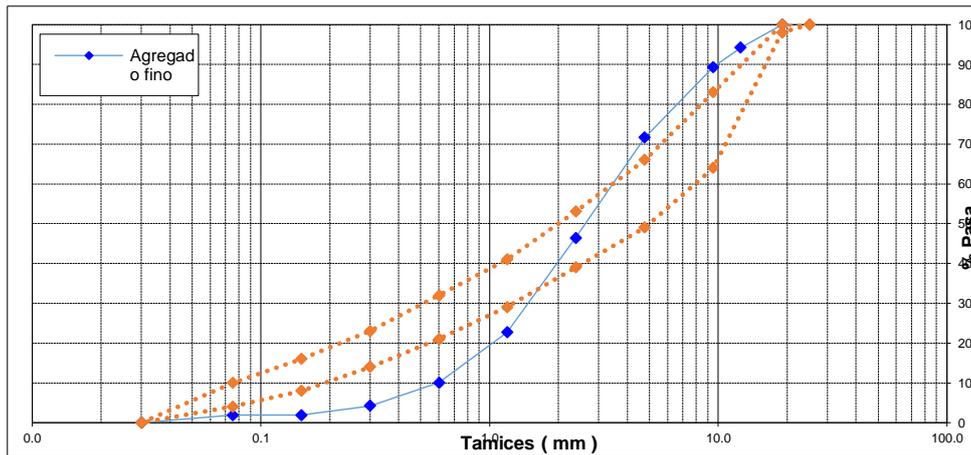


Figura N° 33 Curva granulométrica Cantera C1- agregado fino (Fuente Propia,2018)

Cuadro N° 10 Análisis granulométrico cantera C1-Agregado Grueso (Fuente propia,2018)

TAMIZ		%RET.	% RET. ACUM.	% PASA	% PASA HUSO
(Pulg)	(mm)				
2 1/2"	63	0.0	0.0	100.0	100.0
2"	50	7.6	7.6	92.4	88 - 100
1 1/2"	37.5	32.4	39.9	60.1	70 - 100
1"	25	27.3	67.2	32.8	12 - 55
3/4"	19	17.7	84.9	15.1	0 - 2
1/2"	12.5	11.3	96.2	3.8	-
3/8"	9.5	1.6	97.8	2.2	-
N°4	4.75	1.4	99.2	0.8	-
FONDO		0.8	100	0.0	

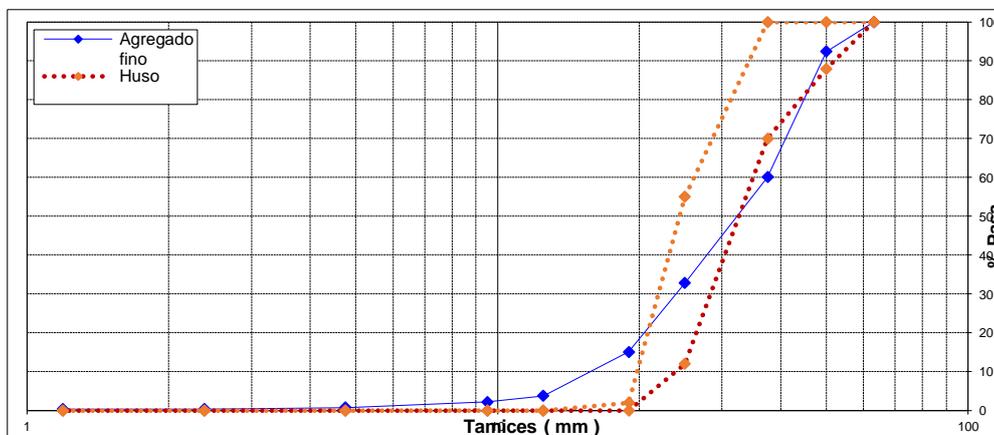


Figura N° 34 Curva granulométrica Cantera C1-agregado grueso (Fuente Propia,2018)

c) Propiedades Físicas

El agregado de la cantera C1 fue sometido a diversos ensayos para determinar sus propiedades físicas siguiendo la normativa vigente.

En el siguiente cuadro se muestran los resultados de los ensayos:

Cuadro N° 11 Propiedades físicas cantera C1-Agregado Fino

Ensayo	Und	Cantidad	Norma Ensayo
Humedad total	%	0.4	ASTM C566
Peso unitario suelto	Kg/m ³	1245	ASTM C29
Peso unitario compactado	Kg/m ³	1407	ASTM C29
Material que pasa el tamiz 75 µm	%	6.15	ASTM C117
Gravedad específica de masa(GEM)	g/cm ³	2.29	ASTM C128
GEM saturada de superficie seca	g/cm ³	2.36	ASTM C128
Absorción	%	2.08	ASTM C128
Módulo de fineza	-	2.65	ASTM C136

Cuadro N° 12 Propiedades físicas cantera C1-Agregado Grueso

Ensayo	Und	Cantidad	Norma Ensayo
Humedad total	%	0.2	ASTM C566
Peso unitario suelto	Kg/m ³	1225	ASTM C29
Peso unitario compactado	Kg/m ³	1403	ASTM C29
Material que pasa el tamiz 75 µm	%	0.93	ASTM C117
Gravedad específica de masa(GEM)	g/cm ³	2.32	ASTM C128
GEM saturada de superficie seca	g/cm ³	2.39	ASTM C128
Absorción	%	3.01	ASTM C128
Módulo de fineza	-	8.39	ASTM C136

3.1.2 Cantera C2

a) Procedencia

El agregado con la denominación C2 procede de la ciudad de Moquegua, de la misma manera que la cantera C1.

Se obtuvo mediante la realización de voladuras, posteriormente su extracción y transporte a la ciudad de Lima mediante bolsas big bag de una tonelada.

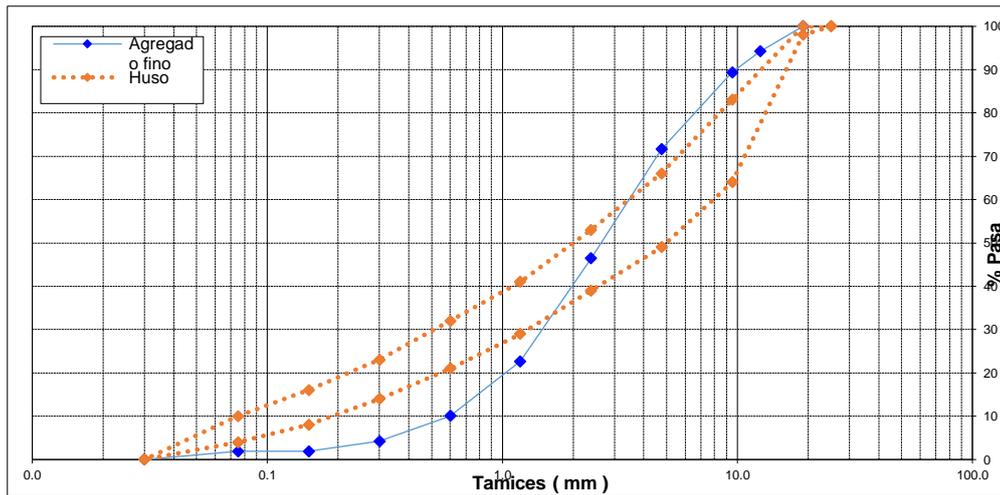


Figura N° 35 Cantera C2 (Fuente Propia, 2018)

b) Análisis granulométrico

Cuadro N° 13 Análisis granulométrico, cantera C2, Agregado fino (Fuente propia, 2018)

TAMIZ		%RET.	% RET. ACUM.	% PASA	% PASA
(Pulg)	(mm)				HUSO
¾"	19	0.0	0.0	100.0	98 - 100
½"	12.5	5.8	5.8	94.2	-
3/8"	9.5	4.9	10.7	89.3	64 - 83
Nº4	4.75	17.7	28.4	71.6	49 - 66
Nº8	2.38	25.2	53.6	46.4	39 - 53
Nº16	1.19	23.8	77.4	22.7	29 - 41
Nº30	0.6	12.6	90.0	10.0	21 - 32
Nº50	0.3	5.8	95.8	4.2	14 - 23
Nº100	0.15	2.4	98.1	1.9	8 - 16
Nº200	0.075	0.0	98.1	1.9	4 - 10
FONDO		1.9	100.0	0.0	



c) Propiedades Físicas

El agregado de la cantera C2 fue sometido a diversos ensayos para determinar sus propiedades físicas siguiendo la normativa vigente.

En el cuadro N°15 se muestran los resultados de los ensayos:

Cuadro N° 15 Propiedades físicas cantera C2-Agregado Fino (Elaboración propia, 2018)

Ensayo	Und	Cantidad	Norma Ensayo
Humedad total	%	0.4	ASTM C566
Peso unitario suelto	Kg/m ³	1245	ASTM C29
Peso unitario compactado	Kg/m ³	1407	ASTM C29
Material que pasa el tamiz 75 µm	%	6.15	ASTM C117
Gravedad específica de masa(GEM)	g/cm ³	2.52	ASTM C128
GEM saturada de superficie seca	g/cm ³	2.57	ASTM C128
Absorción	%	1.9	ASTM C128
Módulo de fineza	-	2.65	ASTM C136

Cuadro N° 16 Propiedades físicas cantera C2-Agregado Grueso (Elaboración propia, 2018)

Ensayo	Und	Cantidad	Norma Ensayo
Humedad total	%	0.2	ASTM C566
Peso unitario suelto	Kg/m ³	1225	ASTM C29
Peso unitario compactado	Kg/m ³	1403	ASTM C29
Material que pasa el tamiz 75 µm	%	0.93	ASTM C117
Gravedad específica de masa(GEM)	g/cm ³	2.64	ASTM C128
GEM saturada de superficie seca	g/cm ³	2.67	ASTM C128
Absorción	%	1.08	ASTM C128
Módulo de fineza	-	8.39	ASTM C136

3.2. CEMENTO

El cemento utilizado en esta investigación corresponde a 2 tipos de cemento: Yura Tipo II y Andino Tipo I, los cuales cumplen con la norma ASTM C 150.

3.3.1 Cemento Yura Tipo II

El cemento tipo II es de uso general, y específicamente cuando se desea moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación (Inacal, 2016)

En lo que se refiere a la construcción de presas, estructuras que requieren de concretos masivos y exigentes requisitos, es importante controlar el calor de hidratación por lo cual deben evaluarse todos los factores y materiales a utilizar, y dentro de ello tenemos que los cementos generalmente más utilizados y los que más se adaptan a estos requerimientos son el moderado calor de hidratación y el bajo calor de hidratación. (Javier, 2018)

Como lo menciona Pasquel (2009) existe un primer criterio que consiste en usar cementos que se fabrican adrede con contenidos de álcalis que no sean mayores a 0.6%, denominados de bajo contenido de álcalis (usualmente Cementos Tipo II y Tipo V), lo cual ayuda mucho a reducir el problema potencial; sin embargo, se han encontrado casos en que esto no ha sido suficiente, por lo que existe un criterio adicional no estandarizado en USA.

Debido a esto, este cemento fue elegido por su moderado calor de hidratación, considerando las características de una obra de presa de CCR.



Figura Nº 38 Cemento Yura portland tipo II (Fuente propia, 2018)

a) Procedencia

El cemento Yura tipo II, procede de la planta de cementos Yura ubicada en Arequipa.

Fue transportado en bolsas de 42.5 Kg hacia la ciudad de Lima.

b) Propiedades

La reacción entre el hidróxido de calcio, liberado en la hidratación del cemento, con el aluminato tricálcico (C3A) presente en el cemento, genera gran calor de hidratación. Los componentes de este cemento generan menor calor de hidratación, evitando contracciones y fisuraciones que afecta la calidad del concreto, principalmente en obra de gran volumen (Yura, 2018)

3.3.2 Cemento Andino Tipo I

El cemento Tipo I es de uso general cuando no se requiera una característica especial en su uso. (Inacal, 2016)

El cemento Andino Tipo I cumple con la Norma Técnica Peruana (NTP) 334.009 y la Norma Técnica Americana ASTM C-150. Este es un producto obtenido de la molienda conjunta de clínker y yeso. (Unacem, 2018)

Este cemento Tipo I fue elegido debido a que se usa como una línea base para las investigaciones, con lo cual se puede comparar con otras investigaciones o con investigaciones futuras.



Figura N° 39 Cemento Andino portland tipo I (Unacem, 2018)

a) Procedencia

El cemento Andino Tipo I procede de la empresa UNACEM cuya planta se encuentra ubicada en Atocongo, Villa María del Triunfo, Lima.

b) Propiedades

Las propiedades del cemento tipo I usado, se encuentran en el siguiente gráfico:

Cuadro N° 17 Propiedades físicas y químicas, Cemento tipo I (Unacem, 2018)

Parámetro	Unidad	Cemento Andino Premium	Requisitos NTP-334.009 / ASTM C-150
Contenido de aire	%	5.08	Máximo 12
Expansión autoclave	%	0.01	Máximo 0.80
Superficie específica	m ² /kg	361	Mínimo 260
Densidad	g/ml	3.15	No específica
Resistencia a la Compresión			
Resistencia a la compresión a 3 días	kg/cm ²	274	Mínimo 122
Resistencia a la compresión a 7 días	kg/cm ²	340	Mínimo 194
Resistencia a la compresión a 28 días	kg/cm ²	440	Mínimo 285*
Tiempo de Fraguado			
Fraguado Vicat inicial	min	116	Mínimo 45
Fraguado Vicat final	min	285	Máximo 375
Composición Química			
MgO	%	1.93	Máximo 6.0
SO ₃	%	2.68	Máximo 3.0
Pérdida al fuego	%	1.49	Máximo 3.0
Residuo insoluble	%	0.69	Máximo 1.5
Fases Mineralógicas			
C ₂ S	%	15.53	No específica
C ₃ S	%	57.35	No específica
C ₃ A	%	7.50	No específica
C ₄ AF	%	10.61	No específica
Álcalis Equivalentes			
Contenido de álcalis equivalentes	%	0.47	Requisito opcional, máximo 0.60
Resistencia a los Sulfatos			
Resistencia al ataque de sulfatos	%	0.083	0.10 % máx. a 180 días

3.3. PUZOLANA

Sustancias naturales o industriales silíceas o silicoaluminosas o una combinación de ambas, que se endurecen si se amasan con agua a temperatura ambiente con hidróxido de calcio disuelto Ca(OH)₂ en la pasta de cemento y forman compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia. (Asocem, 2013)



Figura N° 40 Pozzolana (Fuente propia, 2018)

1. Procedencia

La puzolana usada en esta investigación fue proporcionada por la empresa UNACEM.

Fueron transportadas en bolsas de 25 Kg.

2. Propiedades

a) Peso específico

Para su adición en los especímenes a ensayar se precisó de la determinación de su peso específico. Para esto se realizó el ensayo de peso específico de acuerdo con la norma técnica peruana NTP 334.005.

El resultado del ensayo arrojó un peso específico igual a 2.15 Kg/cm^3

b) Índice de actividad puzolánica

Debido a que el índice de actividad puzolánica, se usa para determinar si la puzolana natural resulta en un nivel aceptable de desempeño de resistencia cuando se usa con cemento en concreto de acuerdo con ASTM(2002), entonces se realizaron ensayos para determinar este índice con cada tipo de cemento: Yura tipo II y Andino tipo I. Además, se usaron agregados de cada cantera por separado con cada tipo de cemento.

Mezcla de control:

-500g de cemento Portland

-1375g de arena grada

-242ml de agua

Mezcla de ensayo:

-400g de cemento Portland

-100g de puzolana

-1375g de arena grada

-Agua necesaria para obtener $\pm 5\%$ del flujo de la mezcla de control

El índice de actividad puzolánica se calcula como sigue:

$$\text{Índice de Actividad Puzolánica} = (A / B) \times 100$$

A=Promedio de resistencia a la compresión de la mezcla ensayo

B=Promedio de resistencia a la compresión de la mezcla de control (ASTM, 2002).

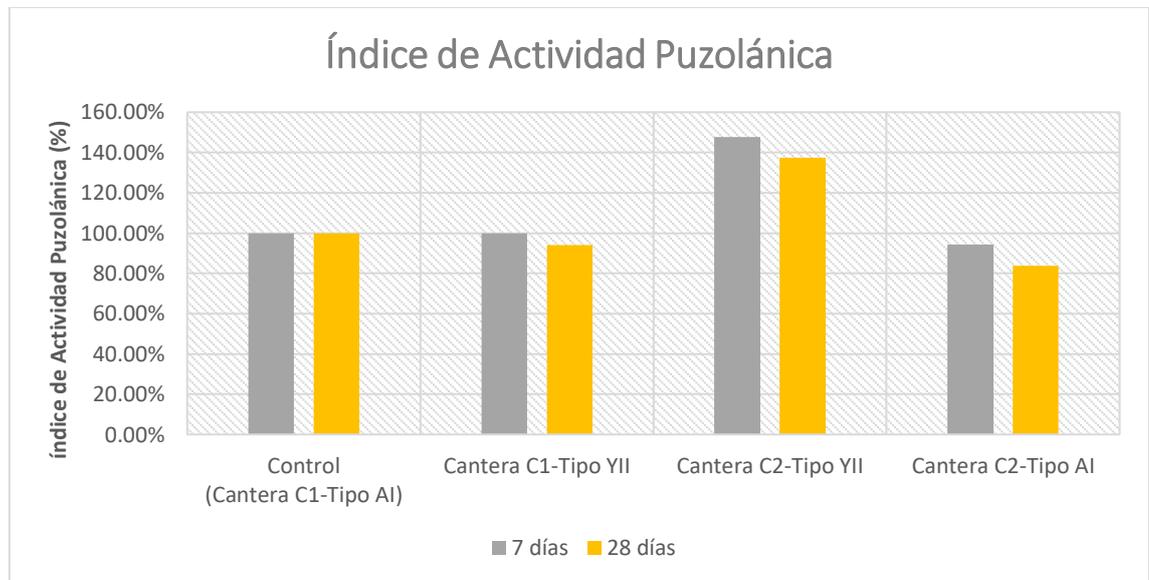


Figura N° 41 Índice de Actividad Puzolánica (Fuente propia, 2018)

El cuadro anterior muestra los resultados de índice de actividad puzolánica, según el tipo de cantera y cemento usado.

3.4. AGUA

Para las muestras se usó agua potable de la ciudad de Lima cumpliendo con la NTP 339.088.

3.5. ADITIVOS

Se usó Sika CCR Plus, este es un aditivo plastificante y retardante de fraguado para concreto compactado con rodillo.

Extiende los tiempos de fraguado de un concreto compactado con rodillo, ayudando a reducir la generación de juntas frías entre capas durante la construcción.

Permite reducir hasta un 12% del agua de mezcla y favorece la consolidación del concreto manteniendo las características de densidad y humedad óptima aumentando las resistencias mecánicas.

También disminuye la tasa y el pico inicial de generación de calor dentro del material producido por la hidratación del cementante.

Tiene densidad igual a 1.31 Kg/L y se adiciona de 0.6% a 1.9% del peso de cemento. (Sika, 2017)

CAPÍTULO IV: PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL

4.1. METODOLOGÍA

Dado la condición que no existen muchos estudios acerca de la incorporación de puzolana en CCR, se optó por una investigación del tipo exploratoria, para así se puedan desarrollar más investigaciones de este tipo.

Además, debido a los ensayos a realizar en laboratorio, se determinó como metodología experimental exploratorio para esta investigación.

La primera etapa consiste en la caracterización de los materiales a usar, donde se realizaron ensayos para determinar las propiedades físicas de los agregados, cemento y puzolana.

En la segunda etapa, con las propiedades de los materiales se realizaron diseños teóricos de CCR y posteriormente se ensayaron en laboratorio con el objetivo de determinar un diseño preliminar como base para la adición de puzolana, de manera que este cumpla con la resistencia a la compresión y esté dentro de los límites del tiempo Vebe (20s a 30s), así como de los coeficientes recomendados para diseños de CCR.

La tercera etapa consistió en determinar el óptimo contenido de puzolana para la mitigación de la reactividad álcali sílice. Para lograr este objetivo esta investigación se basó en ensayos en cubos de mortero y ensayos de reactividad álcali sílice.

Con el ensayo de cubos de mortero, se determinaron resistencias a la compresión para diferentes porcentajes de adición de puzolana, de esta forma se determinó en qué porcentaje disminuye la resistencia, la adición de puzolana.

En el ensayo de reactividad álcali sílice con las barras de mortero, se midió la expansión para diferentes porcentajes de adición de puzolana.

Con la resistencia a la compresión de cubos de mortero y con los ensayos de barras, se obtuvo un óptimo contenido de puzolana, es decir, un porcentaje de puzolana que reduzca la reactividad álcali sílice con la menor reducción de resistencia a la compresión.

Finalmente, con este óptimo contenido de puzolana se elaboró el diseño final de CCR, para luego verificar sus propiedades en estado fresco y húmedo.

4.1.1 Programa Experimental

El programa experimental se dividió de forma que englobe la idea de cada parte de la investigación, se dividió en cuatro etapas:

- Etapa 1: Propiedades físicas y preparación de materiales
- Etapa 2: Diseño preliminar de CCR
- Etapa 3: Determinación de óptimo contenido de puzolana
- Etapa 4: Diseño final de CCR con adición de puzolana

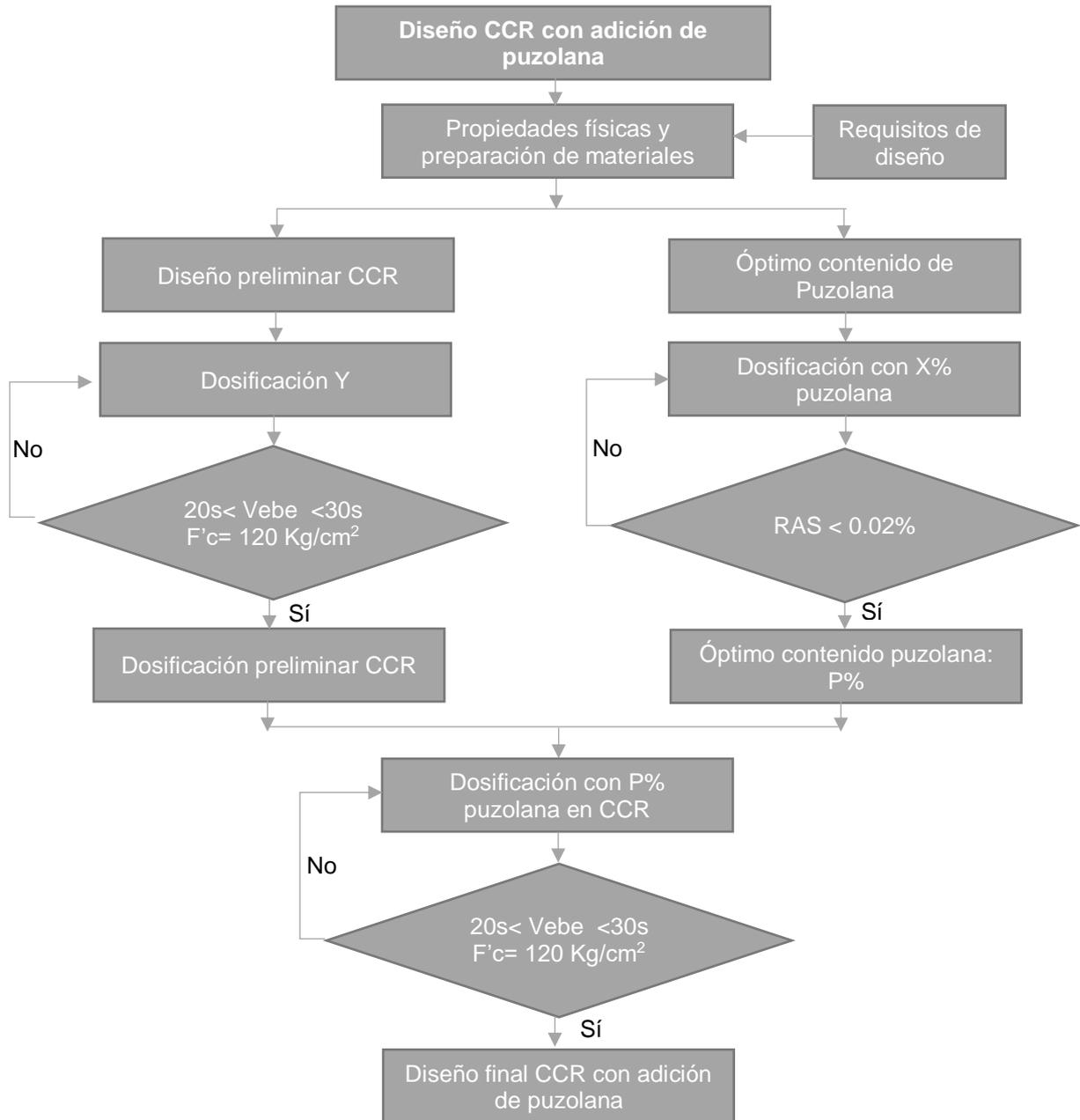


Figura N° 42 Flujograma General de Diseño CCR (Elaboración propia, 2018)

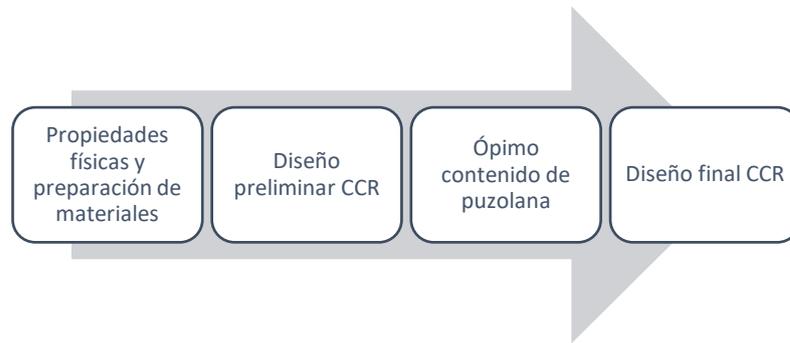


Figura N° 43 Etapas del programa experimental (Elaboración propia, 2018)

4.1.2 Ensayos Previos

Con el objetivo de obtener resultados confiables y reducir la variabilidad, se realizaron ensayos previos en los cuales se aplicaron los procedimientos estandarizados indicados en la normativa vigente.

Los ensayos previos se realizaron en el vaciado del CCR y la medición de la reactividad álcali sílice, debido a su gran importancia en el diseño final.

De esta manera, se buscó instruir al personal involucrado en la aplicación correcta de los procedimientos de ensayos establecidos en las normas.

a) Ensayos de CCR

Con un diseño preliminar de CCR se procedió a vaciar probetas de CCR.

A través de esto, se ordenaron responsabilidades a cada involucrado en el proceso de mezclado y vaciado. Además, se calculó la cantidad de personal necesario para todo este proceso.

Se pudieron calcular los tiempos de vaciado y en cada ensayo, para así programar las fechas de ensayos, de manera que el vaciado no se vea interrumpido con el fin de la jornada laboral.

Esto ayudó a que el CCR no perdiera humedad debido a tiempo muertos y también tener un adecuado flujo durante el proceso de vaciado del CCR.



Figura N° 44 Ensayos previos de CCR (Fuente propia, 2018)

b) Ensayos de Reactividad Álcali Sílice

De la misma manera que para el vaciado de CCR, se realizó un ensayo previo en el ensayo de reactividad álcali sílice.

A través de esto, se observó que, durante el vaciado de las barras de mortero, no se deben ajustar mucho los pernos del encofrado porque generaron el fisuramiento de una muestra. También, se mejoró en el uso del lector de expansiones.

Además, se pudo determinar los recipientes adecuados para el almacenamiento de la muestra y que estos eviten la evaporación de la solución de NaOH.

Con estos ensayos, se pudieron determinar los tiempos de elaboración de las barras de mortero, programar los días de vaciado y medición.



Figura N° 45 Ensayos previos álcali sílice (Fuente propia, 2018)

4.1.3 Tamaño de la Muestra

En los siguientes cuadros se muestran las cantidades de especímenes ensayados por tipo de ensayo:

Cuadro N° 18 Cantidad de especímenes sin adición de puzolana (Elaboración propia, 2018)

Tipo	Cantera	Ensayo	Cemento	Muestra	Cantidad Especímenes
Sin Adición	C1	Reactividad Álcali	Andino I	C1-0P-AI	3
			Yura II	C1-0P-YII	3
		Resistencia Cubos	Andino I	C1-0P-AI	6
			Yura II	C1-0P-YIII	6
	C2	Reactividad Álcali	Andino I	C2-0P-AI	3
			Yura II	C2-0P-YII	3
		Resistencia Cubos	Andino I	C2-0P-AI	6
			Yura II	C2-0P-YIII	6

Cuadro N° 19 Cantidad de especímenes con adición de puzolana para la cantera C1 (Elaboración propia, 2018)

Tipo	Cantera	Ensayo	Cemento	Muestra	Cantidad Especímenes
Con Adición	C1	Reactividad Álcali	Andino I	C1-0P-AI	3
				C1-10P-AI	3
				C1-15P-AI	3
				C1-20P-AI	3
				C1-25P-AI	3
				C1-30P-AI	3
				C1-40P-AI	3
			Yura II	C1-0P-YII	3
				C1-10P-YII	3
				C1-15P-YII	3
				C1-20P-YII	3
				C1-25P-YII	3
				C1-30P-YII	3
				C1-40P-YII	3
Con Adición	C1	Resistencia Cubos	Andino I	C1-0P-AI	6
				C1-10P-AI	6
				C1-15P-AI	6
				C1-20P-AI	6
				C1-25P-AI	6
				C1-30P-AI	6
				C1-40P-AI	6
			Andino I	C1-0P-AI	6
				C1-10P-AI	6
				C1-15P-AI	6
				C1-20P-AI	6
				C1-25P-AI	6
				C1-30P-AI	6
				C1-40P-AI	6
Yura II	C1-0P-YII	6			
	C1-10P-YII	6			
	C1-15P-YII	6			
	C1-20P-YII	6			
	C1-25P-YII	6			
	C1-30P-YII	6			
	C1-40P-YII	6			

Cuadro N° 20 Cantidad de especímenes con adición de puzolana para la cantera C2 (Elaboración propia, 2018)

Tipo	Cantera	Ensayo	Cemento	Muestra	Cantidad Especímenes
Con Adición	C2	Reactividad Álcali	Andino I	C2-0P-AI	3
				C2-10P-AI	3
				C2-15P-AI	3
				C2-20P-AI	3
				C2-25P-AI	3
				C2-30P-AI	3
				C2-40P-AI	3
			Yura II	C2-0P-YII	3
				C2-10P-YII	3
				C2-15P-YII	3
				C2-20P-YII	3
				C2-25P-YII	3
				C2-30P-YII	3
				C2-40P-YII	3
		Resistencia Cubos	Andino I	C2-0P-AI	6
				C2-10P-AI	6
				C2-15P-AI	6
				C2-20P-AI	6
				C2-25P-AI	6
				C2-30P-AI	6
				C2-40P-AI	6
			Yura II	C2-0P-YII	6
				C2-10P-YII	6
				C2-15P-YII	6
C2-20P-YII	6				
C2-25P-YII	6				
C2-30P-YII	6				
C2-40P-YII	6				

Cuadro N° 21 Cantidad de especímenes sin adición de puzolana para mezcla de CCR-cantera C1 y C2 (Elaboración propia, 2018)

Tipo	Cantera	Ensayo	Cemento	Muestra	Cantidad Especímenes
Sin Adición	C1	Probetas CCR	Tipo I	C1-D1	3
				C1-D2	3
				C1-D3	3
				C1-D4	3
	C2	Probetas CCR	Tipo I	C2-D1	3
				C2-D2	3
				C2-D3	3
				C2-D4	3

Cuadro N° 22 Cantidad de especímenes con adición de puzolana para mezcla de CCR-cantera C1 (Elaboración propia, 2018)

Tipo	Cantera	Ensayo	Cemento	Muestra	Cantidad Especímenes
Con Adición	C1	Probetas CCR	Tipo I	D1-XP	2

4.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y PREPARACIÓN DE MATERIALES

En esta etapa se determinaron las propiedades físicas de los materiales a usar y la preparación de los materiales a usarse en los ensayos de esta investigación.



Figura N° 46 Descargar de material para los ensayos (Fuente propia, 2018)

4.2.1 Propiedades Físicas

Las propiedades físicas de los materiales a usarse son necesarias para poder realizar un diseño de mezcla adecuado.

De manera que se realizaron los siguientes ensayos para obtener dichas propiedades físicas:

-Granulometría

Se toma una muestra representativa mediante el método del cuarteo. Se tamiza en el siguiente orden de tamices: 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 y fondo.

Se zarandera dos minutos para agregado fino y tres minutos para agregado grueso. Luego se pesa y se calcula el porcentaje retenido en cada tamiz.

-Malla N°200

Para realizar este ensayo se llena de agua en un recipiente con la muestra, luego se tamiza a través de la malla N°200, sucesivamente con agua de lavado hasta que el agua esté clara. Luego secar al horno y pesar la cantidad inicial y final.

$$A = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1} \times 100$$

P₁=masa inicial seca del agregado

P₂=masa final seca del agregado

-Peso unitario suelto

Según el tamaño máximo nominal del agregado seleccionar el recipiente a utilizar, luego dejar caer el agregado desde una altura de 2" por encima del borde superior del recipiente, eliminar lo sobrante con una varilla compactadora, luego pesar y calcular el peso unitario suelto.

$$M = (G - T) / V$$

M=Peso unitario suelto del agregado en Kg/m³

G=Peso del recipiente de medida más

T= Peso del recipiente de medida en Kg

V= Volumen de la medida en m³

-Peso unitario compactado

Según el tamaño máximo nominal del agregado seleccionar el recipiente a utilizar, luego llenar en 3 capas y compactar cada capa con 25 golpes distribuidos uniformemente en la superficie. Luego el agregado sobrante se elimina con la varilla compactadora.

$$M = (G - T) / V$$

M=Peso unitario compactado del agregado en Kg/m³

G=Peso del recipiente de medida más

T= Peso del recipiente de medida en Kg

V= Volumen de la medida en m³

-Humedad

Según el tamaño máximo nominal del agregado calcular la masa mínima de la muestra del ensayo. Pesar la muestra inicial, luego colocar en un recipiente y secar al horno, posteriormente pesar el recipiente con la muestra final.

$$P = (W - D) / D * 100$$

P = Contenido de humedad total evaporable

W= Masa de la muestra inicial, g

D = Masa de la muestra final, g

-Peso específico

Se satura el material de forma que esté en el estado saturado superficialmente seco. Luego se vierte el material en un recipiente o en un frasco, si es agregado menor a 3/8". Posteriormente se eliminan el aire incorporado, luego se añade agua hasta completar el volumen determinado.

Se seca al horno y se pesa.

$$Pe = W_0 / (V - V_A)$$

Pe= peso específico de masa

W₀= peso en aire de la muestra secada en horno

V= volumen de frasco en centímetros cúbicos

V_A= peso en gramos o volumen en cm³ del agua añadida al frasco

4.2.2. Preparación de Materiales

Luego de obtener las propiedades físicas de los materiales, se procedió a prepararlos para uso en el diseño de mezcla de CCR y la obtención del óptimo contenido de puzolana. Esto consistió en tamizar, triturar, lavar, humedecer o pesar según el requerimiento de cada ensayo.

Diseño de CCR:

El CCR necesita materiales de diversas granulometrías, desde la malla 2 ½" hasta pasantes la malla N°200 y en distintos porcentajes, debido a esto, se tuvo que separar el material según tamices.



Figura N° 47 Material separado según tamices para vaciado de CCR (Fuente propia, 2018)

Para el vaciado del CCR se realizaron los siguientes procesos:

- Agregados: Tamizado, lavado, pesado, mezclado, humedecido y almacenamiento según retenidos en tamices.
- Cemento y puzolana: pesado
- Aditivo: pesado

Óptimo Contenido de Puzolana:

El óptimo contenido de puzolana se halló en función del ensayo de reactividad álcali sílice y el ensayo de resistencia a la compresión de cubos de mortero. Para estos dos ensayos, se requiere materiales que van de la malla N°8 a la malla N°100.

No se contaba con suficiente material perteneciente a estas mallas, por lo tanto, se tuvo que triturar gran cantidad de material para poder realizar los ensayos.

Inicialmente la trituración se realizó de forma manual con bajos rendimientos; sin embargo, en la etapa final de la investigación, se usó una máquina trituradora la cual facilitó la culminación de la tesis.



Figura N° 48 Triturado manual y mecánico (Fuente propia, 2018)

Para obtener el óptimo contenido de puzolana se usaron los siguientes procesos:

-Agregados: tamizado previo, triturado, lavado, tamizado posterior, pesado y dosificación a usar.

-Cemento y puzolana: tamizado por la malla N°20 y pesado.



Figura N° 49 Tamizado, lavado y secado (Fuente propia, 2018)



Figura N° 50 Tamizado cemento y puzolana por la malla N°20 (Fuente propia, 2018)

4.3. DISEÑO PRELIMINAR DE CCR

Se realizó un diseño preliminar de CCR sin puzolana para luego adicionarle puzolana al diseño final obtenido.

4.3.1. Pasos para Diseño de Mezcla de CCR

1-Determinar todos los requerimientos para CCR incluyendo: resistencia especificada y edad, condiciones de exposición, limitaciones de material cementante, requerimientos de aditivos, tamaño máximo y calidad de agregados.

La resistencia especificada para este diseño de CCR se consideró 120 Kg/cm^2 .

Otra consideración es el uso del aditivo CCR Plus, con el objetivo de mejorar la trabajabilidad y evitar la potencial segregación.

2- Determinar las propiedades físicas de los materiales

3-Calcular la cantidad de cemento a ser usado para la resistencia requerida según la figura:

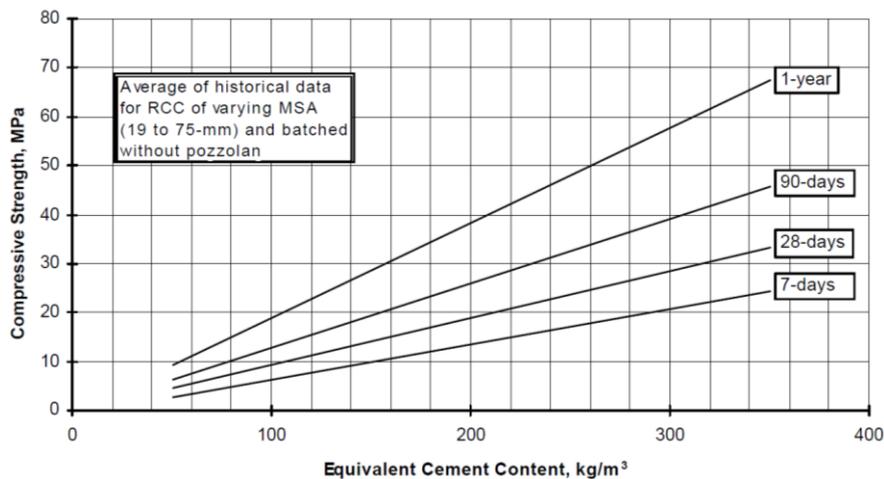


Figura N° 51 Contenido de cemento vs resistencia a la compresión de CCR (Usace, 2006)

Gráficamente el contenido de cemento igual a 130 Kg/m^3 para la resistencia deseada de 120 Kg/cm^2 a los 28 días. Sin embargo, debido a que la adición de puzolana disminuye la resistencia del concreto, se consideró un porcentaje de reducción de resistencia igual a 15%, de los ensayos preliminares de cubos de mortero.

Por lo tanto, se consideró una resistencia inicial de 140 Kg/cm² a los 28 días. Gráficamente, luego se determinó la cantidad de cemento igual a 150 Kg/m³.

4-Determinar cantidad de agua y aire atrapado según el tamaño máximo a ser usado y la Tabla Resumen

Cuadro N° 23 Tabla Resumen para Diseño de CCR (Usace, 2006)

Descripción	Tamaño Nominal del Agregado					
	19.0 mm		50 mm		75 mm	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango
1-Contenido de agua Kg/m³						
a) Vebe<30s	150	133-181	122	107-140	107	85-128
b) Vebe>30s	134	110-154	119	104-125	100	97-112
2-Contenido de arena % del volumen de agregado total						
a) Agregado triturado	55	49-59	43	32-49	34	29-35
b) Agregado redondeado	43	38-45	41	35-45	31	27-34
3-Contenido de mortero, % del volumen						
a) Agregado triturado	70	63-73	55	43-67	45	39-50
b) Agregado redondeado	55	53-57	51	47-59	43	39-48
4-Coef. Pasta: Vpasta/Vmortero:						
	0.41	0.27-0.55	0.41	0.31-0.56	0.44	0.33-0.59
5-Contenido de aire atrapado %:						
	1.5	0.1-4.2	1.1	0.2-4.1	1.1	0.5-3.3

Debido a que se tenían tamaños máximo iguales a 3" para las canteras C1 y C2, además, se requerían tiempos Vebe menores a 30s para tener un concreto de adecuada consistencia, se tomó como valor inicial de agua 105 Kg / m³ debido a ser un valor cercano al promedio y daba relación a/c igual a 0.70.

5-Calcular la cantidad de agregado grueso y agregado fino requerido que se aproxime al agregado ideal según la tabla:

Cuadro N° 24 Granulometría de Agregado Grueso Ideal (Usace, 2006)

Tamaño de Tamiz	Gradación Ideal del Agregado Grueso según Tamaño Máximo		
	75mm a 4.75mm (3" a N°4)	75mm a 4.75mm (3" a N°4)	75mm a 4.75mm (3" a N°4)
75 mm (3")	100		
63 mm (2 1/2")	88		
50 mm (2")	76	100	
37.5 mm (1 1/2")	61	81	
25.0 mm (1")	44	58	
19.0 mm (3/4")	33	44	100
12.5 mm (1/2")	21	28	63
9.5 mm (3/8")	14	18	41
4.75 mm (N°4)	-	-	-

Cuadro N° 25 Granulometría Agregado Fino Ideal (Usace, 2006)

Gradación Ideal del Agregado Fino según Tamaño Máximo	
Tamaño de Tamiz	Porcentaje Acumulado que pasa %
9.5 mm (3/8")	100
4.75 mm (N°4)	95-100
2.36 mm (N°8)	75-95
1.18 mm (N°16)	55-80
0.6 mm (N°30)	35-60
0.3 mm (N°50)	24-0
0.15 mm (N°100)	12-28
0.075 mm (N°200)	6-18

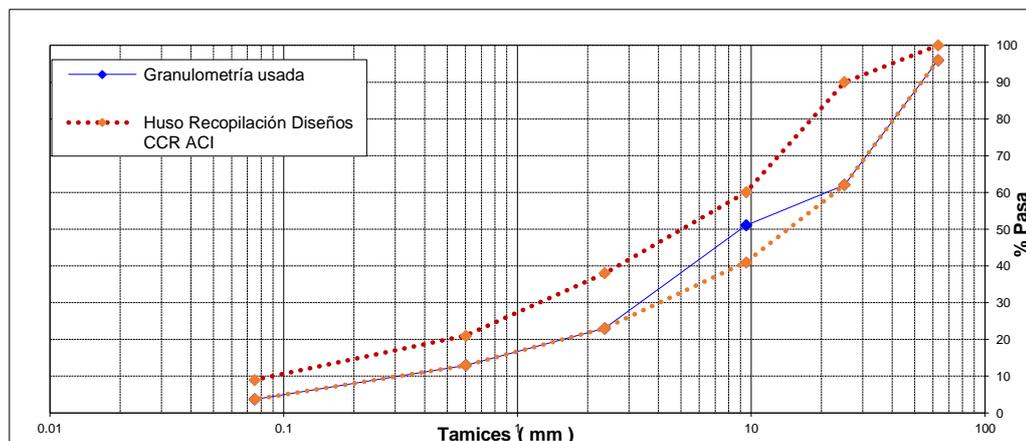


Figura N° 52 Granulometría usada y husos para CCR de (ACI, 2009)

Con el objetivo que cumpla con el huso anterior, los materiales de las canteras C1 y C2, se combinaron de manera que se verifique esto. Para lograr esto se tiene que tener especial cuidado en la producción del agregado en la cantera y que la trituradora nos provee de agregado que cumpla el huso granulométrico, de lo contrario en laboratorio se tiene que tamizar manualmente y combinar el material posteriormente.

Un valor promedio para combinación de mezclas preliminares de ensayo es combinar el 34% de arena con el 66% de piedra, de acuerdo con el Cuadro Resumen de Diseño de CCR.

Cuadro N° 26 Cantidad de agregado grueso por m³ según cantera (Elaboración Propia, 2018)

Tamiz	Cantidad de Agregado (Kg por m ³)	
	Cantera C1	Cantera C2
63mm a 25mm	349.3	351.25
25mm a 9.5mm	632.9	634.94
9.5mm a 2.36mm	483	483.13
2.36mm a 0.6mm	308	308.13
0.6mm a 0	420	419.38

6-Calcular la cantidad de agregado fino según la recomendada, si faltan finos pasantes la malla N°200, la puzolana puede ayudar. Calcular el contenido de agregado fino(arena) para el tamaño máximo.

Para estos diseños se obtuvo un porcentaje de finos igual al 7%, luego de la combinación, lo cual cumple con el rango entre 6 a 18% del Cuadro de Gradación de Agregado Ideal.

7- Calcular la cantidad de pesos de los componentes de la mezcla

Cuadro N° 27 Cantidad de materiales por m3 según cantera (Elaboración Propia, 2018)

Material	Peso por m3 (Kg)	
	Cantera C1	Cantera C2
Cemento	150	150
Agua	105	105
Aditivo 1.3%	1.72	1.72
63mm a 25mm	349.3	351.25
25mm a 9.5mm	632.9	634.94
9.5mm a 2.36mm	483	483.13
2.36mm a 0.6mm	308	308.13
0.6mm a 0	420	419.38

8-Calcular el contenido de mortero y de pasta. Verificar con los valores dados en la tabla resumen.

Volumen de Mortero= Vol. Cemento + Vol. Agua + Vol. Aire+ Vol.Puzolana + Vol. Agregado Menor a 4.75mm (N°4)

Volumen de Pasta = Vol. Cemento + Vol. Agua + Vol. Aire+ Vol.Puzolana + Vol. Agregado Menor a 0.075mm(N°200)

Cuadro N° 28 Verificación de coeficientes (Elaboración Propia, 2018)

Componente	Verificación Mortero y Pasta	
	Cantera C1	Cantera C2
Volumen mortero (m3)	0.45	0.46
Volumen pasta (m3)	0.23	0.23
Coef. Vol.mortero/Vol.Pasta	0.51	0.50
% Finos	7	7

El volumen del mortero incluye todos los agregados menores que la malla N°4, materiales cementicios, agua y aire atrapado.

Ajustar la cantidad de agregado fino si es necesario para incrementar o disminuir la cantidad de mortero.

Para pasta, incluye todos los agregados menores al tamiz N°200, materiales cementicios, agua y aire atrapado.

El mínimo valor para el coeficiente V_p/V_m recomendado es 0.42 para asegurarnos que los vacíos son llenados. Un valor promedio de este coeficiente es 0.51.

Un coeficiente menor a 0.42 indica que la mezcla tiene insuficiente pasta para llenar los vacíos. Esta condición podría afectar negativamente en la resistencia, incrementar la permeabilidad y reducir la trabajabilidad.

9-Evaluar la trabajabilidad y resistencia de la mezcla de CCR mediante ensayos.

También reajustar el contenido de agua según el contenido de humedad al momento del vaciado y absorción de los agregados.

Para compactaciones V_e mayor a 30, la compactación externa no provee la suficiente energía para compactar el concreto. Para estas mezclas, la compactación es lograda con Apisonado con pisones manuales neumáticos o eléctricos. (Usace, 2006)

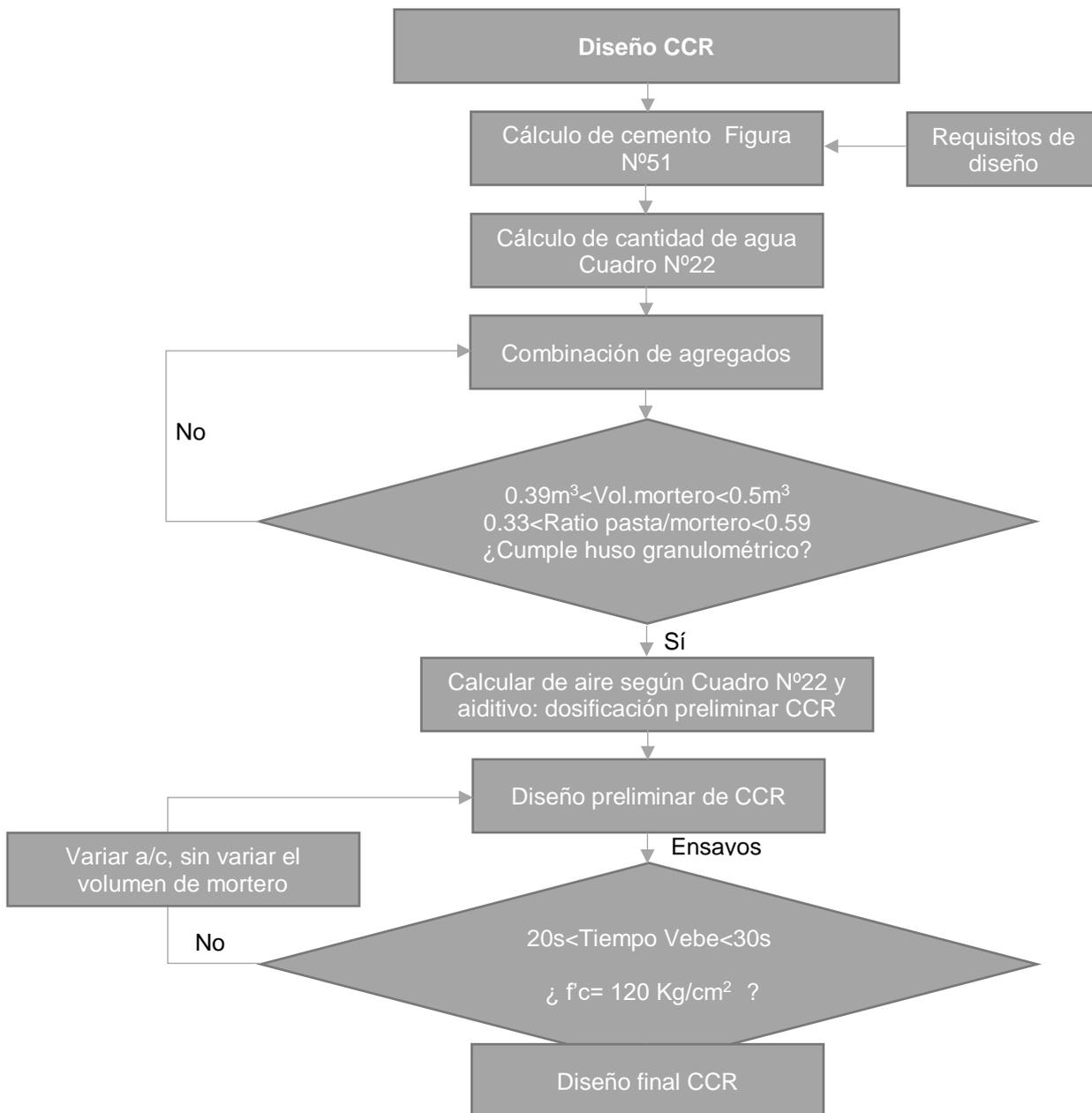


Figura N° 53 Flujograma General de Diseño de CCR (Elaboración propia, 2018)

Luego de aplicar, se obtuvo el siguiente diseño base:

Cuadro N° 29 Peso de materiales según cantera (Elaboración Propia, 2018)

Material	Peso por m3 (Kg)	
	Cantera C1	Cantera C2
Cemento	150	150
Agua inicial	105	105
Aditivo 1.32%	1.98	1.98
63mm a 25mm	349.3	351.25
25mm a 9.5mm	632.9	634.94
9.5mm a 2.36mm	483	483.13
2.36mm a 0.6mm	308	308.13
0.6mm a 0	420	419.38

Finalmente, los agregados fueron humedecidos, de manera que no se adicionó agua adicional en el mezclado.

4.3.2. Proceso de Mezclado de CCR

Enumerar y explicar los pasos

- 1- Acondicionar los materiales en cilindros de plástico que guarden la humedad.
- 2- Pesar la cantidad necesaria a ser usada en baldes, según los tamaños del agregado.
- 3- Limpiar la plataforma metálica sobre la cual se vaciará el CCR.
- 4- Acondicionar las herramientas a ser usadas durante el proceso de mezclado.
- 5- Colocar el agregado grueso en la plataforma metálica.
- 6- Adicionar el cemento en la plataforma metálica y mezclar manualmente.
- 7- Adicionar a la mezcla el agregado grueso de menor tamaño y mezclar manualmente.
- 8- Adicionar a la mezcla el agregado grueso de menor tamaño al anterior y mezclar manualmente.
- 9- Adicionar los finos a la mezcla y mezclar manualmente.
- 10- Adicionar los finos de menor tamaño a la mezcla y continuar mezclando manualmente.
- 11- Terminar de mezclar para homogenizar la muestra.



Figura N° 54 Proceso de mezclado de agregados CCR (Fuente propia, 2018)

- 12- Pasar la mezcla en los baldes.
- 13- Juntar los restos de la mezcla con una escoba seca.
- 14- Encender la mezcladora.
- 15- Mezclar la mitad del agua con aditivo.
- 16- Agregar a la mezcladora el material de los baldes.
- 17- Conforme se va agregando el material, ir agregando el agua.
- 18- Terminado de agregar el material, colocar la tapa de la mezcladora.
- 19- Iniciar el mezclado por 3 min.
- 20- Golpear con martillos de goma toda la mezcladora durante el mezclado.
- 21- Detener mezclador por 2 minutos y raspar el interior con cepillo metálico.
- 22- Humedecer la plataforma metálica con un trapo.
- 23- Tapar y volver a mezclar por 3 min.
- 24- Retirar la tapa y vaciar a los buggies.
- 25- Uniformizar la mezcla manualmente.
- 26- Identificar la muestra de CCR y tomar foto de la muestra.
- 27- Tapar la mezcla de CCR con bolsa plástica para evitar que pierda humedad y tener listo para empezar los ensayos requeridos.



Figura N° 55 Proceso de mezclado y mezcla final de CCR (Fuente propia, 2018)

4.3.3. Ensayos de CCR en Estado Fresco

a) Consistencia Vebe

Se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 1170.

1- Luego de realizar la mezcla de CCR, usar una cantidad para este ensayo.

2- Tamizar en húmedo el CCR a través de la malla 2".

3- Registrar el peso del molde.

4- Seleccionar el tipo método. Generalmente es el método A.

-Método A: Para mezclas de consistencia seca plástica a extremadamente secas. Se coloca una sobre carga tipo disco de 22.7 Kg.

-Método B: Para mezclas de consistencia seca plástica a muy plástica o cuando el tiempo Vebe por el método A es menor a 5s. No se colocar sobrecarga para este método (ASTM, 1998).

5- Asegurar el molde con las tuercas e iniciar la vibración.

6- Comenzar la vibración hasta que se forme un anillo de mortero alrededor de la placa por completo.

7- Registrar este tiempo Vebe para el cual se forma el anillo de mortero.

Cuadro N° 30 Consistencia y tiempo Vebe (ASTM, 1998)

Descripción de la Consistencia	Tiempo Vebe (s)
Extremadamente seca	32 a 18
Muy seca	18 a 10
Seca	10 a 5
Seca plástica	5 a 3
Plástica	3 a 0
Muy plástica	-



Figura N° 56 Ensayo Vebe (Fuente propia, 2018)

b) Densidad de CCR

Se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 1170.

- 1- Para el cálculo de la densidad Vebe se quita la sobrecarga del ensayo de consistencia Vebe y se completa con CCR todo el molde.
- 2- Se Vibra por 5s más para quitar los vacíos.
- 3- Luego se pesa el molde para determinar el peso de molde más mezcla de CCR, luego dividir entre el volumen del molde, el cual es un valor constante.
- 4-El valor de la densidad es la división de los valores anteriores.

c) Contenido de aire - Olla Washington

Se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 231.

1-Taminzar por la malla 2" la mezcla de CCR.

2-Llenar el molde en 2 capas con 20s de vibrado cada una

3-Colocar el presurímetro y cerrar la válvula principal de aire dispuesta entre la cámara de aire y el recipiente de medición, luego abrir ambas válvulas de paso colocadas en la cubierta.

4-Abrir la válvula principal de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medición.

5-Luego que se estabiliza el medidor de presión tomar nota.



Figura N° 57 Ensayo contenido de aire (Fuente propia, 2018)

d) Moldeo de probetas de CCR

Se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 1435.

1-Limpiar las probetas, luego impregnar las paredes interiores con grasa o petróleo.

2-Tamizar el CCR para evitar usar material mayor a 2" en las probetas.

3- Sujetar el molde con una base rígida plana o con los pies, de modo que los bordes de la placa compactadora no toquen las paredes del molde durante el moldeo de probetas.

4- Llenar hasta 1/3 de volumen en la primera cada. Llevar el cucharón hasta abajo y no tirar desde arriba, para evitar segregación.

- 5- Colocar el martillo con la placa compactadora sobre el hormigón y encender el martillo.
- 6- Compactar hasta que se forme completamente un anillo de mortero entre la placa de compactación y las paredes de la probeta o por 20 segundos como máximo.
- 7- Repetir el procedimiento para la segunda capa.
- 8- Para la tercera capa, colocar el collarín para sobrellenar con material por encima del molde.
- 9- Si al compactar, la superficie queda por debajo del molde, apagar el martillo y adicionar más material.
- 10- Luego de compactar la 3ra capa, colocar el capping y terminar de compactar por 5s. Luego retirar el capping.
- 11- Llenar de agua la parte superior de la probeta.
- 12- Colocar plástico encima de la probeta para evitar la pérdida de humedad.



Figura N° 58 Moldeo de probetas de CCR (Fuente propia, 2018)

4.3.4. Ensayos de CCR en Estado Fresco

-Rotura de Probetas

Se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 39.

1- Luego de haber realizado el curado de probetas según la edad a ensayar, se retiran las probetas de la poza de curado considerando las siguientes tolerancias:

Cuadro N° 31 Tolerancia según edad de ensayo (ASTM, 2001)

Edad de ensayo	24h	3d	7d	28d	90d
Tolerancia permisible	± 0.5h	± 2h	± 6h	± 20h	± 48h

2-Medir el diámetro con un vernier, realizando dos lecturas perpendiculares a la mitad de altura, obteniendo un promedio.

3-Medir la altura con una regla milimetrada, tomando dos alturas promedio.

4-Colocar las almohadillas de neopreno en cada extremo y fijar al centro sobre los cabezales.

5-Aplicar la carga con velocidad de carga continua y constante hasta producir la rotura de probeta, registrando el valor.

6-El resultado será el valor de resistencia entre el área.

Fórmula de resistencia probetas: A/B (unidades)

4.4. ÓPTIMO CONTENIDO DE PUZOLANA

El óptimo contenido de puzolana se halló mediante los ensayos de reactividad álcali sílice y de resistencia a la compresión de cubos de mortero.

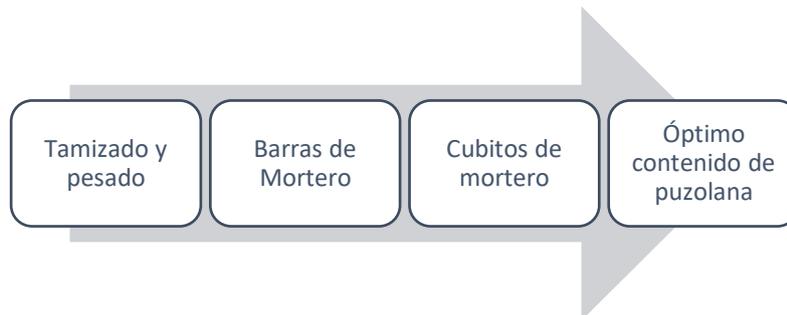


Figura N° 59 Etapas para óptimo contenido de puzolana (Elaboración propia, 2018)

4.4.1. Ensayos de Reactividad Álcali Sílice

Se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 1260.

Este ensayo fue realizando para barras de mortero sin adición de puzolana y con adición de puzolana. La diferencia al adicionar la puzolana consiste en combinar el cemento con la puzolana antes de vaciar a la mezcladora.

Para determinar la reactividad, se debe realizar por separado el ensayo para agregado grueso y para agregado fino; sin embargo, en esta investigación se realizó el ensayo para cada cantera por separado, debido a que el agregado grueso y fino provenían de una misma cantera.

1- Triturar el agregado grueso y fino por separado para obtener la granulometría según el cuadro siguiente:

Cuadro N° 32 Requisitos de gradación (ASTM, 2007)

Requisitos de Gradación de Agregados General			
Pasa	Reten.	Masa (%)	Masa(g)
N°4	N°8	10	99
N°8	N°16	25	247.5
N°16	N°30	25	247.5
N°30	N°50	25	247.5
N°50	N°100	15	148.5

3- Tamizar el cemento por la malla 850 µm (N° 20) y usar solo lo que pasa esta malla.

4- Preparar los moldes de acuerdo con la norma técnica ASTM C 490

5- Usar una parte de cemento por 2.25 partes de agregado graduado. Si $p < 2.45$;
partes agregado = $2.25 \times p / 2.65$

La cantidad de cemento será 440 g y la del agregado las partes de agregado x 440 g. Para $p > 2.45$, será 990 g. Usar 0.47, relación a/c.

Cuadro N° 33 Requisitos de agregado usado según cantera (Elaboración Propia, 2018)

Requisitos de Gradación de Agregados			
Pasa	Reten.	Cantera C1 Masa(g)	Cantera C2 Masa(g)
N°4	N°8	87	99
N°8	N°16	217.6	247.5
N°16	N°30	217.6	247.5
N°30	N°50	217.6	247.5
N°50	N°100	130.6	148.5

6- Mezclar el mortero de acuerdo con la norma técnica ASTM C 305. Llenar los especímenes dentro de los 2 min y 15, en 2 capas compactadas. Nivelar con badilejo.

7- Se deja fraguar por $24 \text{ h} \pm 2\text{h}$. Se retiran los moldes. Realizar la 1ra medición con aproximación al 0.002 mm.

8-Colocar en un recipiente por grupos de muestra en el horno con agua y 1N NaOH a $80 \pm 2.0 \text{ }^\circ\text{C}$.

9- Se sacan las barras y se realiza la lectura dentro de los $15 \pm 5 \text{ s}$. Luego se colocan en una toalla. Volver a la poza dentro de los 10 min.

Fórmula de resistencia al a reactividad álcali: A/B (unidades)

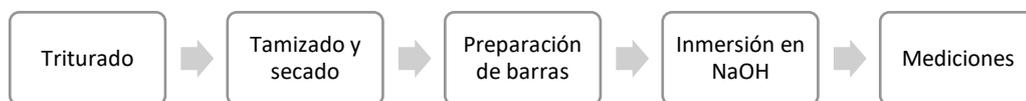


Figura N° 60 Etapas ensayos reactividad álcali-sílice (Elaboración propia, 2018)



Figura N° 61 Barras de mortero para ensayo reactividad álcali sílice (Elaboración propia, 2018)

4.4.2. Ensayos de Resistencia a la Compresión Cubos de Mortero

Se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 109.

Para calcular el óptimo contenido de puzolana, también se determinó su resistencia en la adición de diferentes porcentajes de puzolana a especímenes de cubos de mortero, para así poder analizar su influencia en la resistencia.

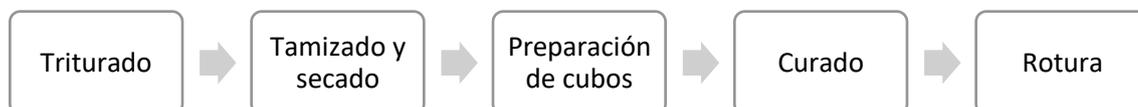


Figura N° 62 Ensayos cubos de mortero (Elaboración propia, 2018)

- 1.- Engrasar los moldes y las superficies de contacto separables. Colocar parafina calentada en las juntas para impermeabilizar.
- 2.- Determinar la cantidad de cemento, arena y agua. Relación 1 cemento: 2.75 arena gradada según el cuadro N°33.

Cuadro N° 34 Cantidad de Material a usar (ASTM, 2013)

	Cemento Portland		Cemento Portland con incorporador de aire		Otros Cementos que den fluidez 110 ± 5 , C 1437	
N° especímenes	6	9	6	9	6	9
Cemento (g)	500	740	500	740	500	740
Arena (g)	1375	2035	1375	2035	1375	2035
Agua (mL)	242	359	230	240	hallar según C 1437	

- 3.- Mezclar el mortero de acuerdo con la norma técnica ASTM C 305
- 4.- Determinar la fluidez de la mezcla de acuerdo con ASTM C 1437, de no cumplir la fluidez, volver a realizar el ensayo.
- 5.- Llenar los compartimientos, antes de los 150 s, contados desde la finalización de la mezcla inicial.
- 6.- Colocar 1 capa de 25mm de espesor, se compacta con 32 golpes, en 4 rondas de 8 golpes según Fig.1. Se realiza el mismo procedimiento para la 2da capa.

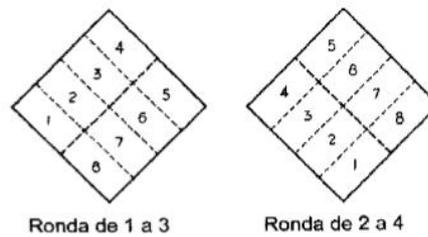


Figura N° 63 Orden de Compactado en el moldeo de cubos (ASTM, 2011)

- 7.- Enrasar la parte superior del molde.
- 8.- Se desmolda a las 24 horas. Se ensayan los cubos que son a las 24 horas.
- 9.- Llevar los cubos a la poza de curado en agua con cal.
- 10.- Antes de ensayar, secar superficialmente con trapo los cubos y medir las caras con el vernier.
- 11.- Finalmente el valor de resistencia es el valor de la carga entre el área del cubo.

Fórmula de resistencia al a compresión: A/B (unidades)

4.4.3. Óptimo Contenido de Puzolana

El óptimo contenido de puzolana (OCP) se refiere a aquel que nos permitirá mitigar en mayor proporción la reactividad álcali sílice y al mismo tiempo que reduzca la resistencia en menor porcentaje.

Este óptimo porcentaje de puzolana se obtiene de la intersección de las gráficas de los resultados de las barras de mortero para el ensayo de reactividad álcali sílice y de la resistencia de los cubos de mortero.

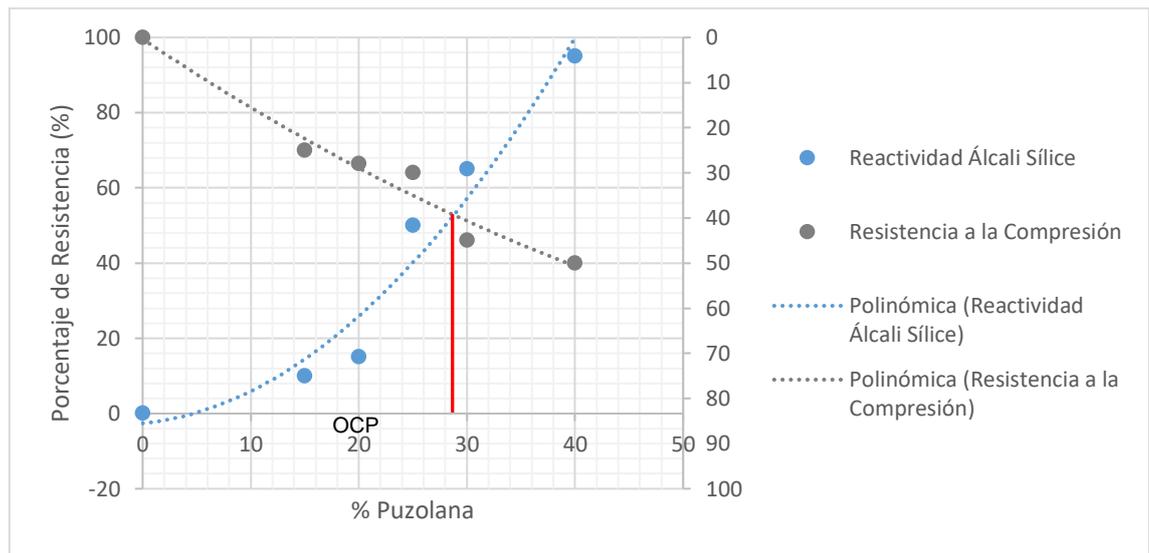


Figura N° 64 Óptimo contenido de puzolana en función de la reactividad y resistencia a la compresión

Este óptimo porcentaje de puzolana variará según la cantera usada y el tipo de cemento usado.

4.5. DISEÑO CCR FINAL CON ADICIÓN DE PUZOLANA

El diseño final se logró a partir del diseño preliminar de CCR y del óptimo contenido de puzolana para especímenes de mortero. Este contenido de puzolana se adicionó al CCR con el objetivo de obtener el diseño final de CCR.

Los procedimientos de mezclado, ensayo en fresco y ensayos en CCR endurecido fueron los mismos.



Figura N° 65 Flujo obtención diseño final de CCR (Elaboración propia, 2018)

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. ADICIÓN DE PUZOLANA

A través de los ensayos se determinó la mitigación

5.1.1 Resistencia a la Compresión de Cubos de Mortero

a) Descripción

Los resultados de este ensayo se realizaron de acuerdo con la norma C-109, con las canteras C1 y C2, utilizando los cementos tipo I y II.

b) Cantera C1

Para la cantera C1 se usó el cemento tipo I y el cemento tipo II.

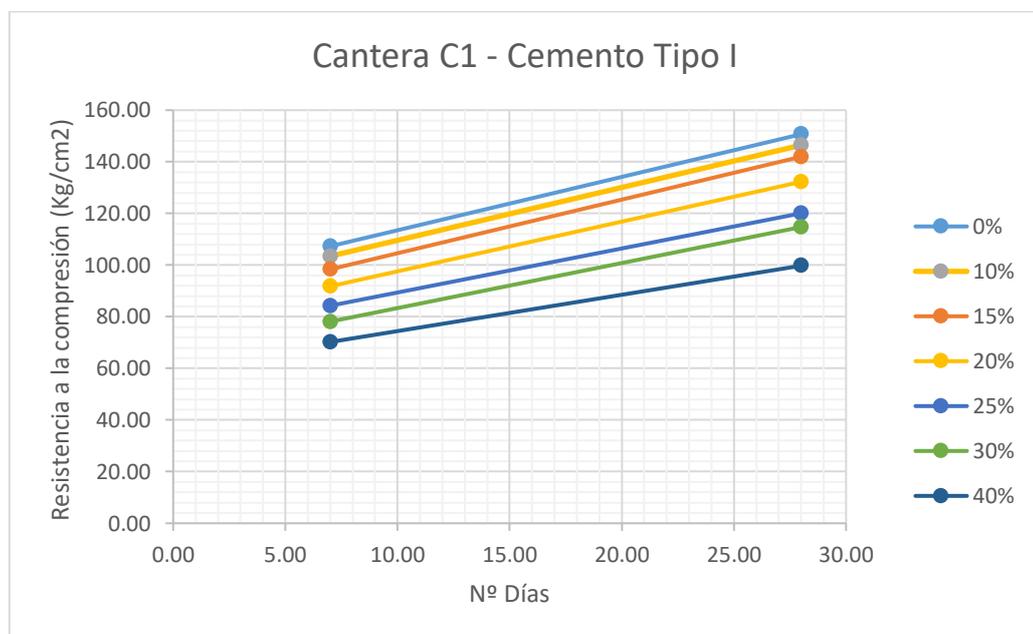


Figura N° 66 Resistencia a la compresión cubos de mortero en diferentes porcentajes de adición de puzolana. Cantera C1-Tipo I (Elaboración propia, 2018)

De la Figura N°66 se observa el aumento de resistencia para edades mayores. Además, un incremento mayor de puzolana ocasiona la disminución de la resistencia. Por lo tanto, una adición de 40% de puzolana, muestran resistencias más bajas en comparación con las demás adiciones. De igual manera, una adición de 0% obtuvo la mayor resistencia a la compresión.

Para 0% de adición, se obtiene un incremento de resistencia de 40% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, $f_c(7 \text{ días}) = 71\% f_c(28 \text{ días})$.

Para 40% de adición, se obtiene un incremento de resistencia de 42% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, f_c (7 días) = 70% f_c (28 días).

Comparando la resistencia con 0% de adición y 40% de adición a los 28 días, se obtiene:

$$f_c (40\%) = 66.21\% f_c (0\%).$$

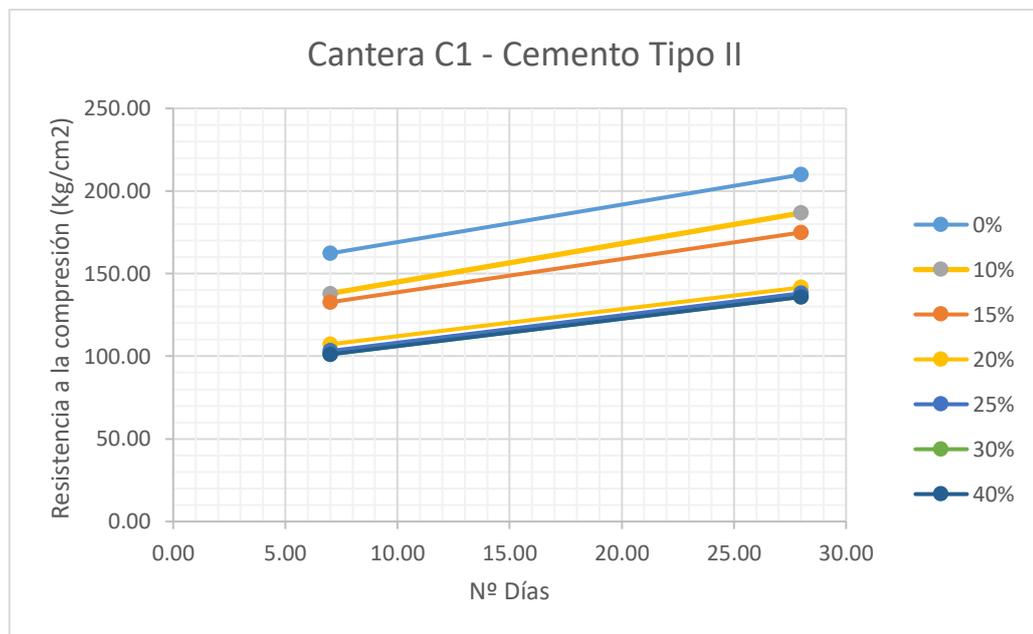


Figura N° 67 Resistencia a la compresión cubos de mortero en diferentes porcentajes de adición de puzolana. Cantera C1-Tipo II (Elaboración propia, 2018)

De la Figura N°67 se observa que de igual forma que para el uso del cemento tipo I, el cemento tipo II presenta un aumento de resistencia para edades mayores. Además, un incremento mayor de puzolana ocasiona la disminución de la resistencia. Por lo tanto, una adición de 40% de puzolana, muestran resistencias más bajas en comparación con las demás adiciones. De igual manera, una adición de 0% obtuvo la mayor resistencia a la compresión.

Para 0% de adición, se obtiene un incremento de resistencia de 29% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, f_c (7 días) = 77% f_c (28 días).

Para 40% de adición, se obtiene un incremento de resistencia de 43% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, f_c (7 días) = 70% f_c (28 días).

Comparando la resistencia con 0% de adición y 40% de adición a los 28 días, se obtiene:

$$f_c (40\%) = 57.73\% f_c (0\%).$$

c) Cantera C2

Para la cantera C2 se usó el cemento tipo I y el cemento tipo II.

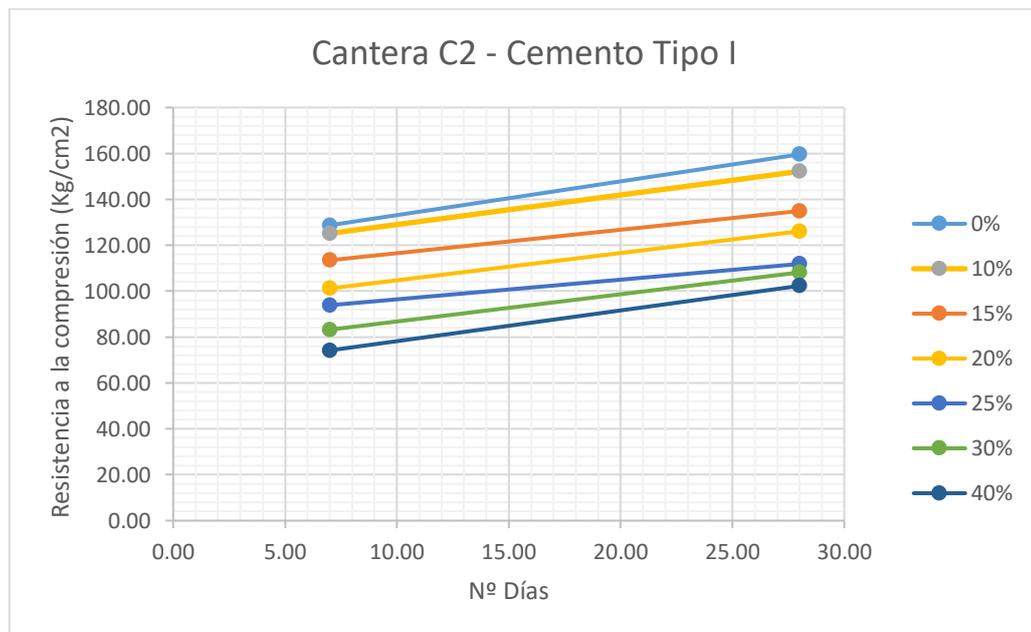


Figura Nº 68 Resistencia a la compresión cubos de mortero en diferentes porcentajes de adición de puzolana. Cantera C2-Tipo I (Elaboración propia, 2018)

De la Figura Nº68 se observa que presenta un aumento de resistencia para edades mayores. Además, un incremento mayor de puzolana ocasiona la disminución de la resistencia. Por lo tanto, una adición de 40% de puzolana, muestran resistencias más bajas en comparación con las demás adiciones. De igual manera, una adición de 0% obtuvo la mayor resistencia a la compresión.

Para 0% de adición, se obtiene un incremento de resistencia de 24% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, f_c (7 días) = 81% f_c (28 días).

Para 40% de adición, se obtiene un incremento de resistencia de 38% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, $f'c(7 \text{ días}) = 73\% f'c(28 \text{ días})$.

Comparando la resistencia con 0% de adición y 40% de adición a los 28 días, se obtiene:

$$f'c(40\%) = 64.11\% f'c(0\%).$$

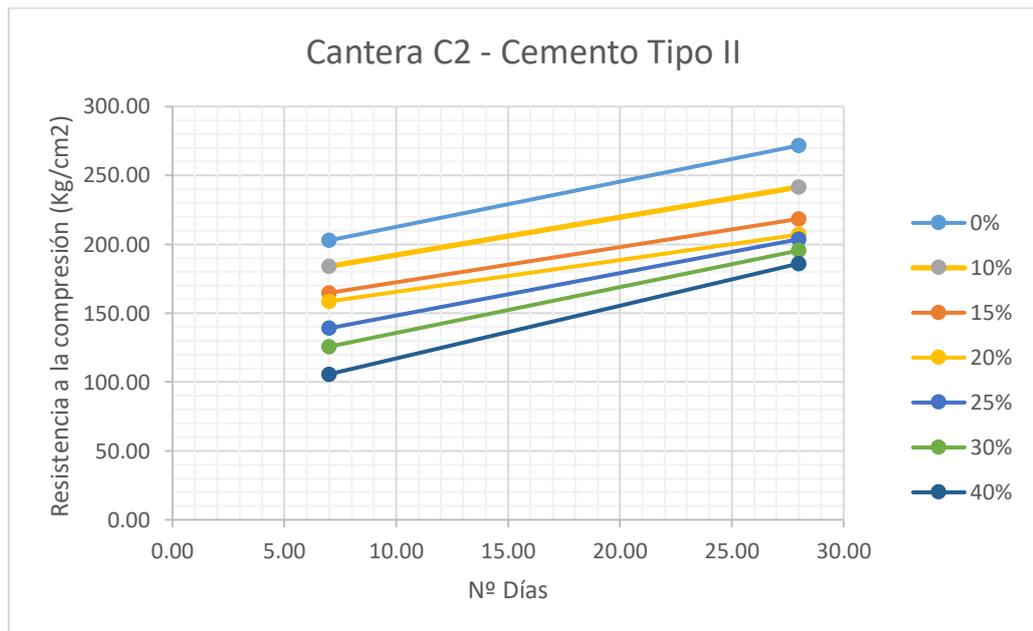


Figura N° 69 Resistencia a la compresión cubos de mortero en diferentes porcentajes de adición de puzolana. Cantera C2-Tipo II (Elaboración propia, 2018)

De la Figura N°69 se observa que de igual forma que para el uso del cemento tipo I, el cemento tipo II presenta un aumento de resistencia para edades mayores. Además, un incremento mayor de puzolana ocasiona la disminución de la resistencia. Por lo tanto, una adición de 40% de puzolana, muestran resistencias más bajas en comparación con las demás adiciones. De igual manera, una adición de 0% obtuvo la mayor resistencia a la compresión.

Para 0% de adición, se obtiene un incremento de resistencia de 34% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, $f'c(7 \text{ días}) = 75\% f'c(28 \text{ días})$.

Para 40% de adición, se obtiene un incremento de resistencia de 76% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, $f'c(7 \text{ días}) = 57\% f'c(28 \text{ días})$.

Comparando la resistencia con 0% de adición y 40% de adición a los 28 días, se obtiene:

$$f'c(40\%) = 68.45\% f'c(0\%).$$

5.1.2 Índice de Actividad Puzolánica

Para el índice de actividad puzolánica se tomó como base la cantera C1 debido a presentar condiciones de no reactividad álcali sílice y el cemento tipo I, debido a que este cemento es de uso masivo y se puede colocar como un estándar para comparación.

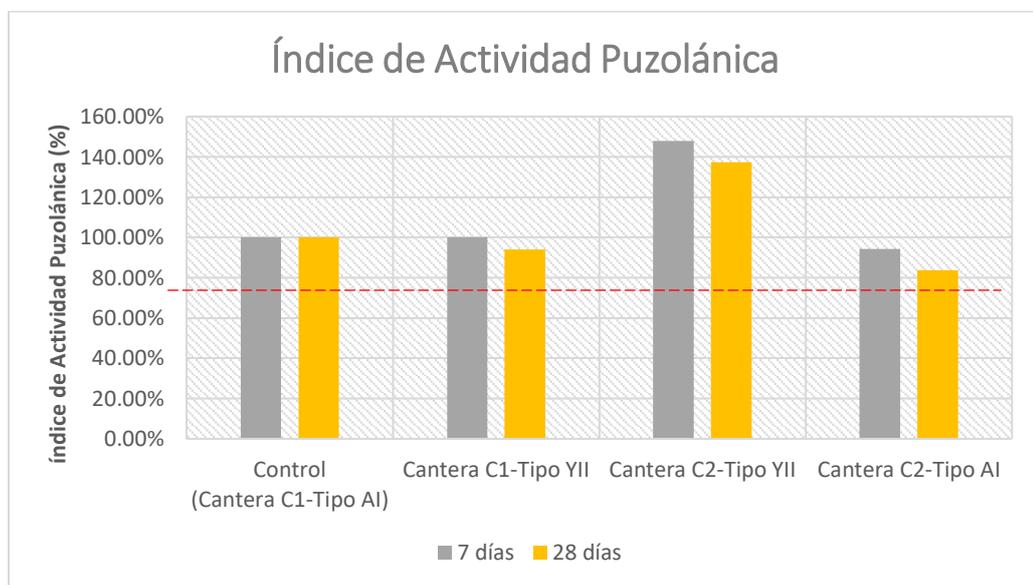


Figura N° 70 Índice de actividad puzolánica usando las canteras C1 y C2, cemento tipo I y II (Elaboración propia, 2018)

De la Figura N°70 se obtiene que para la cantera C1 y cemento Tipo II, tiene un índice de 99% y 94%, para 7 días y 28 días respectivamente.

Para la cantera C2 y cemento tipo II, los valores del índice de actividad puzolánica son mayores a 100%, obteniéndose 148% y 137%, para 7 días y 28 días respectivamente.

Para la cantera C2 y cemento tipo I, los valores del índice de actividad puzolánica son 94% y 84%, para 7 días y 28 días respectivamente.

En todos los casos, el valor de índice de actividad puzolánica supera el 75% por lo que cumple el requerimiento establecido en la ASTM C-618.

5.1.3 Reactividad Álcali Sílice en Barras de Mortero

a) Descripción

Estos ensayos se realizaron de conformidad con la norma C-1260, usando las canteras C1 y C2.

b) Cantera C1

Para los ensayos con la cantera C1 se usaron los cementos tipo I y tipo II.

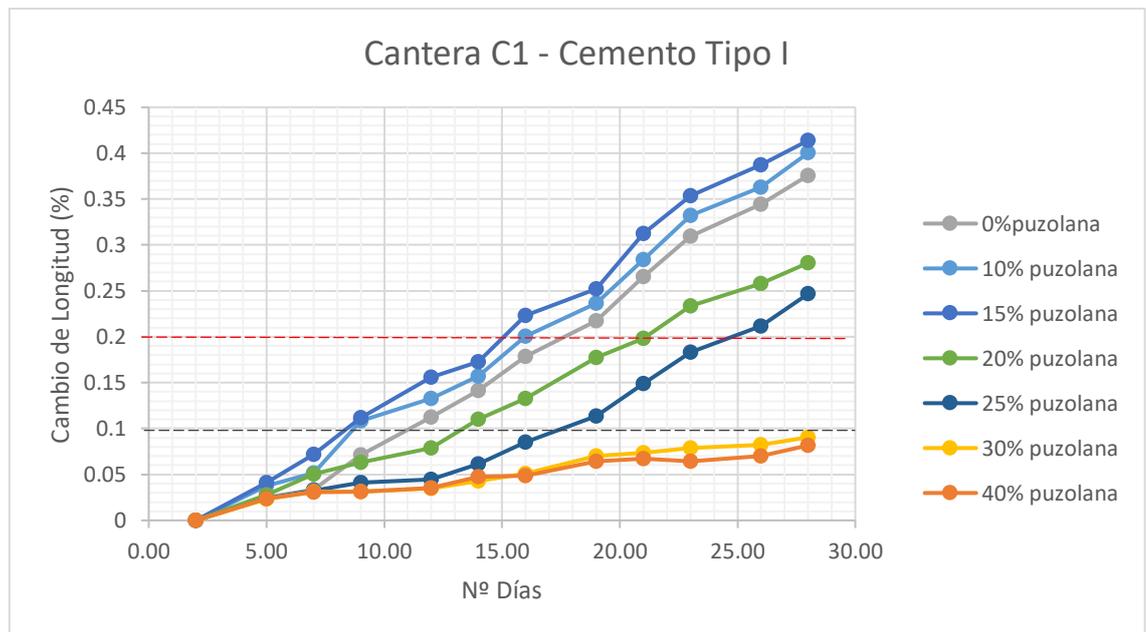


Figura Nº 71 Expansión del ensayo reactividad álcali sílice según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

De la Figura Nº71 se observa que, a los 16 días, adiciones de 10% y 15% generan un incremento de la reactividad álcali sílice.

Incremento expansión adición de 10%= 11%

Incremento expansión adición de 15%= 20%

Los otros porcentajes de adición de puzolana generan la siguiente reducción de expansión:

Reducción expansión adición de 20%=34%

Reducción expansión adición de 25%=109%

Reducción expansión adición de 30%=248%

Reducción expansión adición de 40%=267%

Para 0% de adición, se obtiene un incremento de expansión de 211% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, expansión (7 días) = 48% expansión (28 días).

Para 40% de adición, se obtiene un incremento de expansión de 168% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, expansión (7 días) = 60% expansión (28 días).

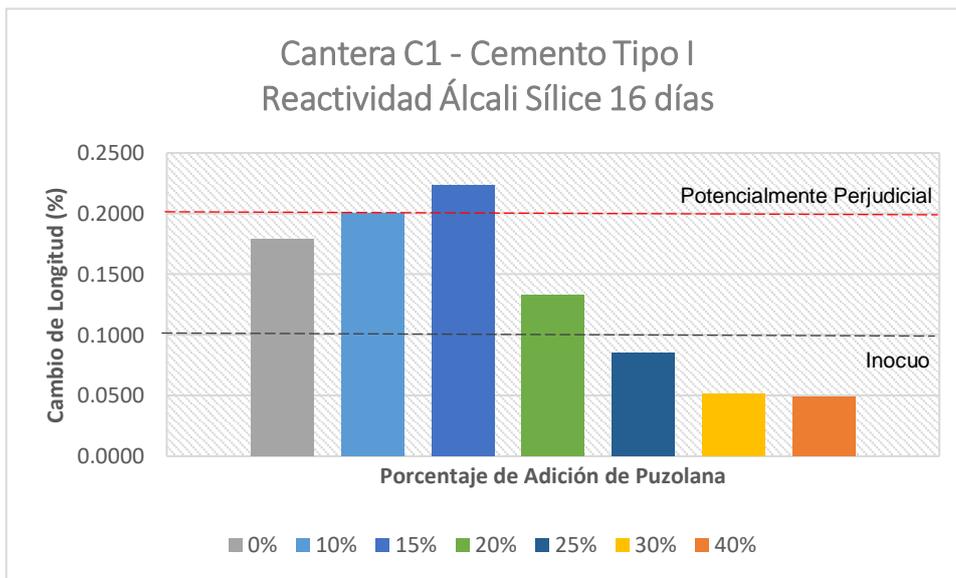


Figura N° 72 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

De la Figura N°72 se observa que porcentajes de adición de 10% y 15% tienen potencial perjudicial por reactividad álcali sílice.

Adiciones de 25%, 30% y 40% se encuentran en una zona inocua, es decir, no presentan potencial perjudicial de reactividad álcali sílice.

Adiciones de 0% y 20% se encuentran en una zona que no descarta el potencial ni lo afirma, es decir, se encuentran en una zona que podría presentar reactividad o no, para esto se recomienda realizar más ensayos.



Figura N° 73 Comparación visual de barras luego del ensayo de reactividad. Adiciones de 0%, 20% y 40%. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

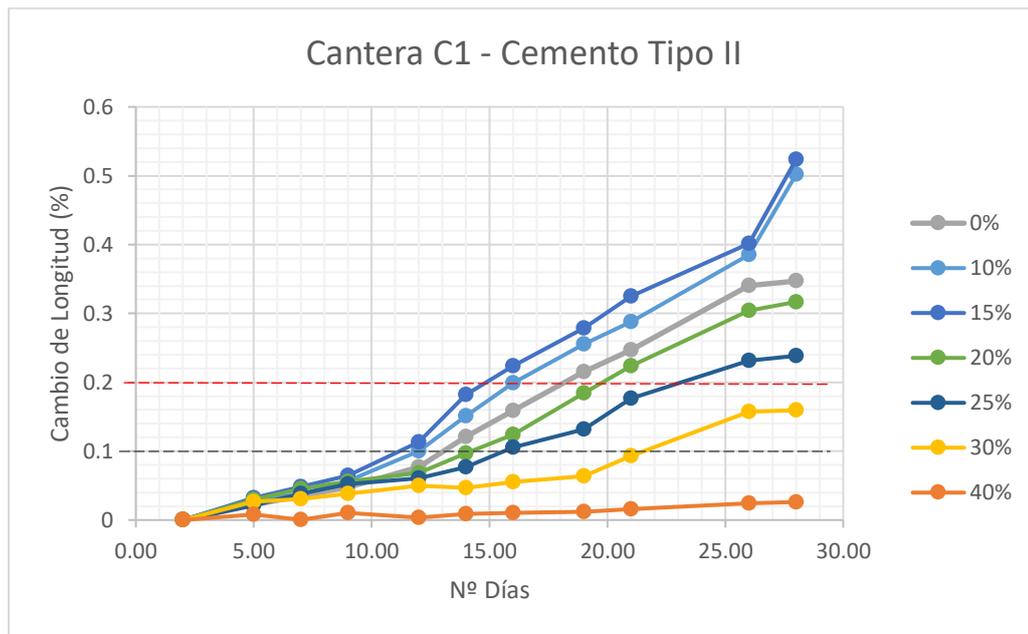


Figura N° 74 Expansión del ensayo reactividad álcali sílice según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)

De la Figura N°74 se observa que, a los 16 días, adiciones de 10% y 15% generan un incremento de la reactividad álcali sílice.

Incremento expansión adición de 10%= 20.5%

Incremento expansión adición de 15%= 29.1%

Los otros porcentajes de adición de puzolana generan la siguiente reducción de expansión:

Reducción expansión adición de 20%=28.0%

Reducción expansión adición de 25%=49.9%

Reducción expansión adición de 30%=188.1%

Reducción expansión adición de 40%=1395.0%

Para 0% de adición, se obtiene un incremento de expansión de 219.1% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, expansión (7 días) = 45.7% expansión (28 días).

Para 40% de adición, se obtiene un incremento de expansión de 246.2% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, expansión (7 días) = 40.6% expansión (28 días).

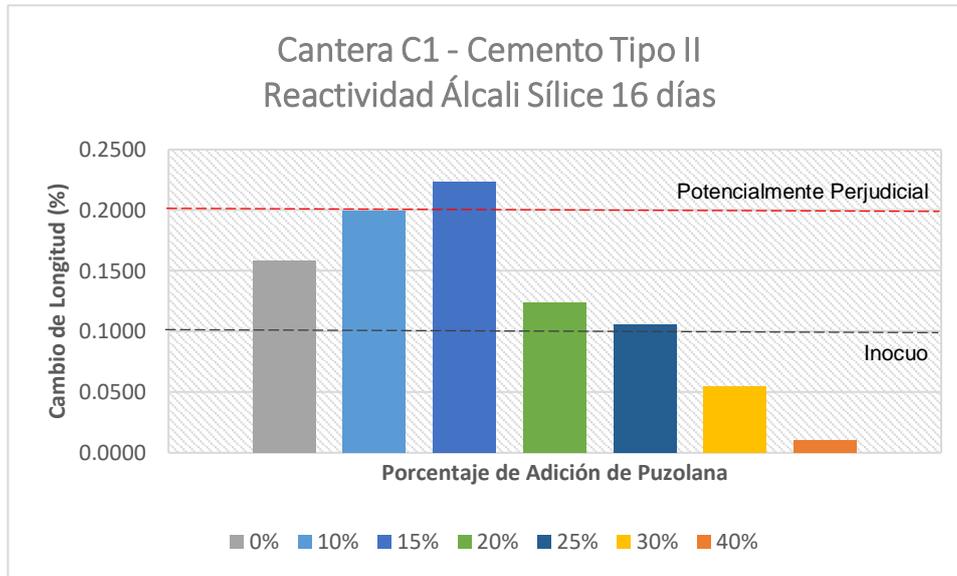


Figura N° 75 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)

De la Figura N°75 se observa que el porcentaje de adición de 15% tiene potencial perjudicial por reactividad álcali sílice.

Adiciones de 25%, 30% y 40% se encuentran en una zona inocua, es decir, no presentan potencial perjudicial de reactividad álcali sílice.

Adiciones de 0%, 10%, 20% y 25% se encuentran en una zona que no descarta el potencial ni lo afirma, es decir, se encuentran en una zona que podría presentar reactividad o no, para esto se recomienda realizar más ensayos.

c) Cantera C2

Para los ensayos con la cantera C2 se usaron los cementos tipo I y tipo II.

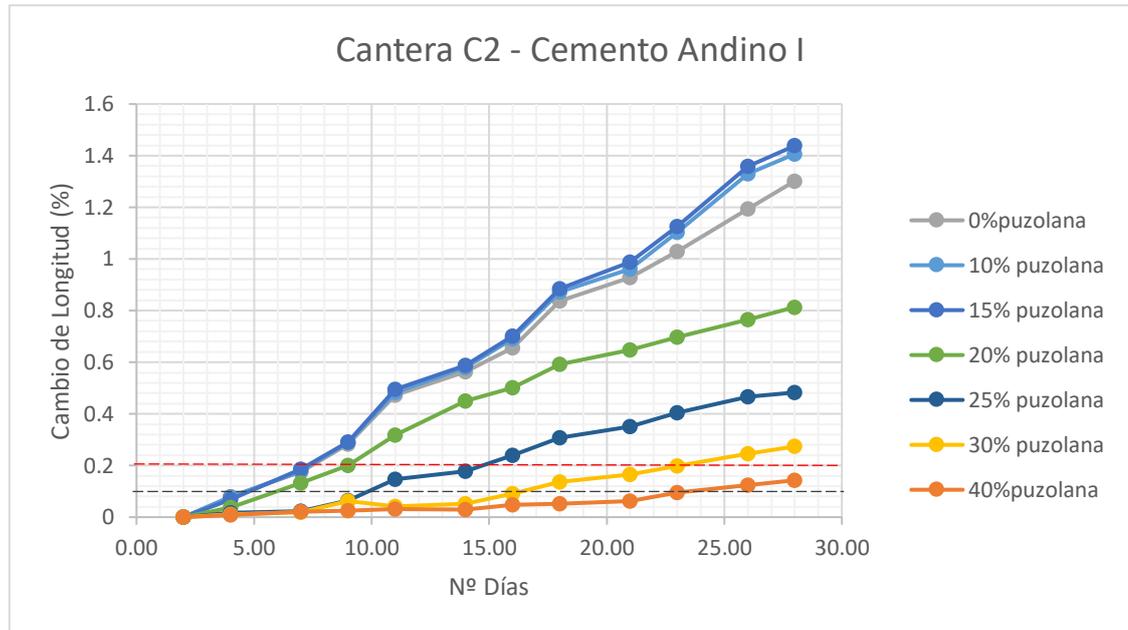


Figura Nº 76 Expansión del ensayo reactividad álcali sílice según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

De la Figura Nº76 se observa que, a los 16 días, adiciones de 10% y 15% generan un incremento de la reactividad álcali sílice.

Incremento expansión adición de 10%= 5.2%

Incremento expansión adición de 15%= 30.6%

Los otros porcentajes de adición de puzolana generan la siguiente reducción de expansión:

Reducción expansión adición de 20%=30.6%

Reducción expansión adición de 25%=173.2%

Reducción expansión adición de 30%=612.1%

Reducción expansión adición de 40%=1258.2%

Para 0% de adición, se obtiene un incremento de expansión de 198.6% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, expansión (7 días) = 50.4% expansión (28 días).

Para 40% de adición, se obtiene un incremento de expansión de 295.8% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, expansión (7 días) = 33.8% expansión (28 días).

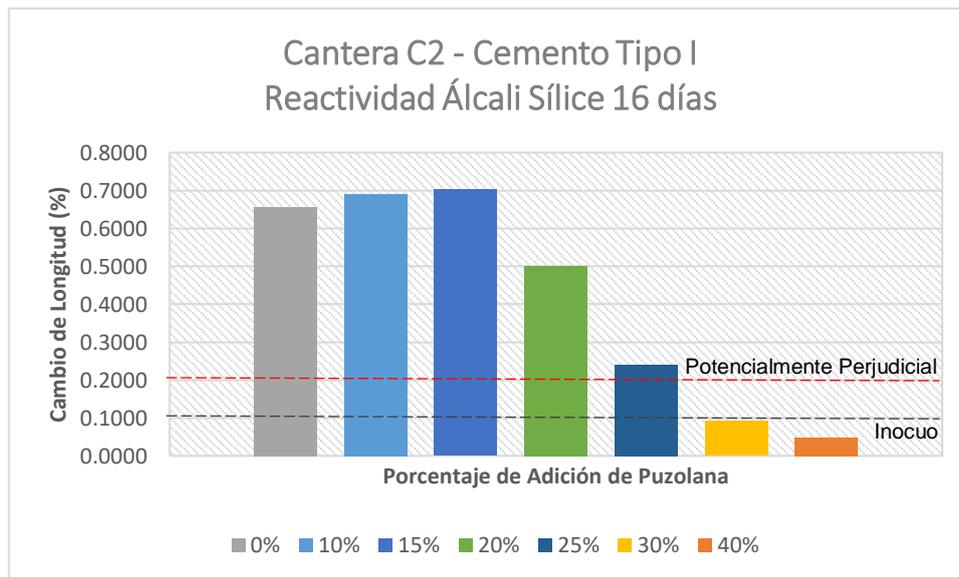


Figura N° 77 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de pozzolana. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

De la Figura N°77 se observa que los porcentajes de adición de 0%, 10%,15%, 20% y 25% tiene potencial perjudicial por reactividad álcali sílice.

Adiciones de 30%y 40% se encuentran en una zona inocua, es decir, no presentan potencial perjudicial de reactividad álcali sílice.

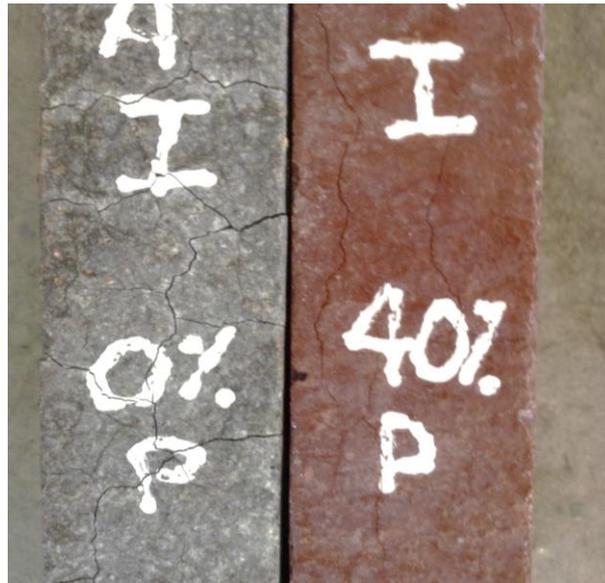


Figura N° 78 Comparación visual de barras luego del ensayo de reactividad. Adiciones de 0% y 40%. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

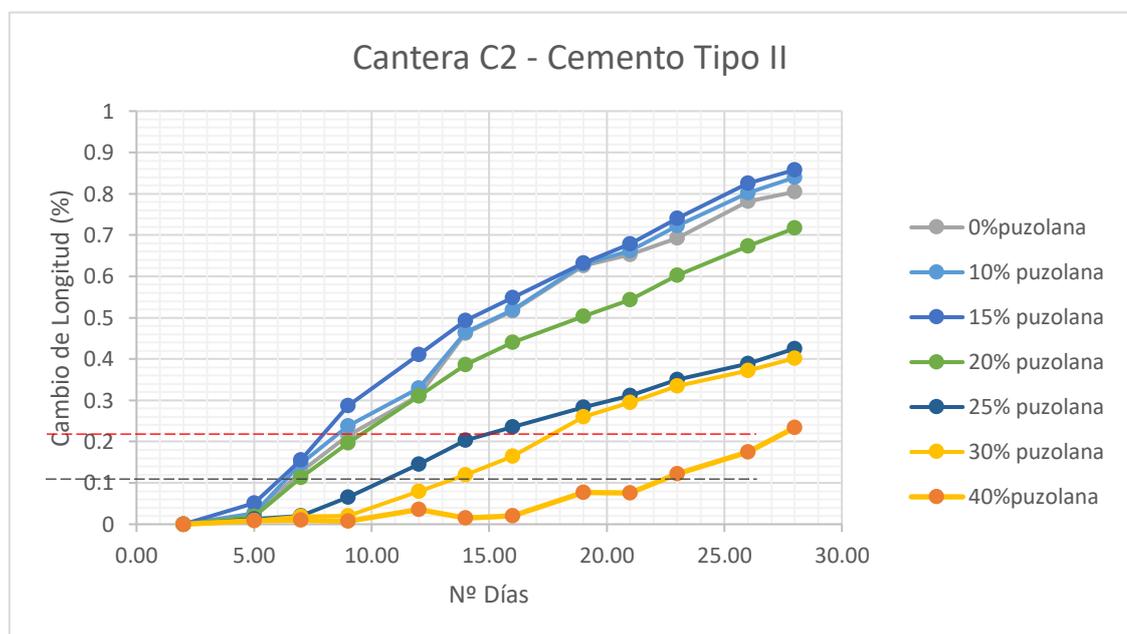


Figura N° 79 Expansión del ensayo reactividad álcali sílice según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)

De la Figura N°79 se observa que, a los 16 días, adiciones de 10% y 15% generan un incremento de la reactividad álcali sílice.

Incremento expansión adición de 10%= 0.5%

Incremento expansión adición de 15%= 5.9%

Los otros porcentajes de adición de puzolana generan la siguiente reducción de expansión:

Reducción expansión adición de 20%=17.3%

Reducción expansión adición de 25%=119.4%

Reducción expansión adición de 30%=213.3%

Reducción expansión adición de 40%=2401.5%

Para 0% de adición, se obtiene un incremento de expansión de 64.2% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, expansión (7 días) = 8.8% expansión (28 días).

Para 40% de adición, se obtiene un incremento de expansión de 155.7% para los 28 días, respecto a los 7 días. Además, expansión (7 días) = 1133.1% expansión (28 días).

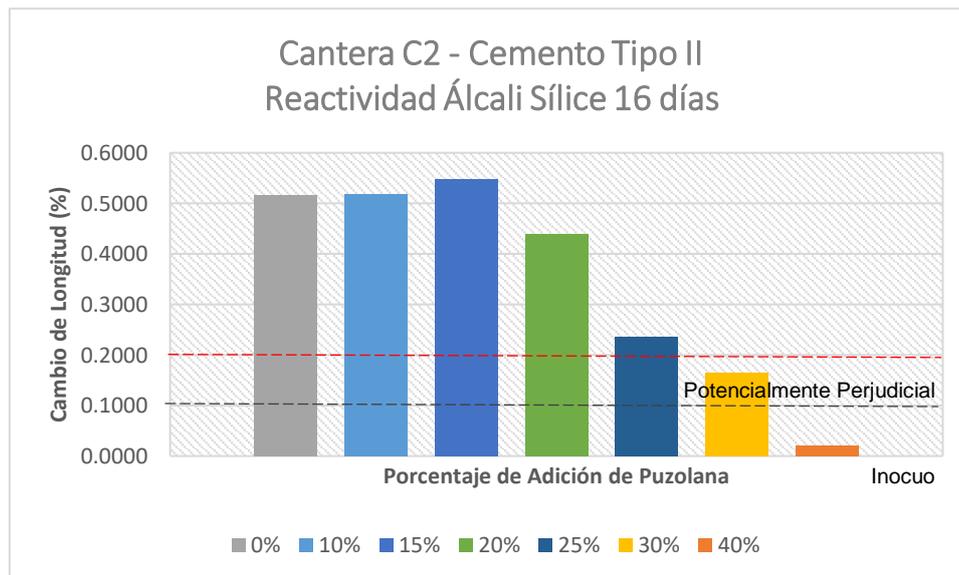


Figura Nº 80 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)

De la Figura Nº80 se observa que porcentajes de adición de 0%, 10%, 15%, 20% y 25% tienen potencial perjudicial por reactividad álcali sílice.

Una adición de 40% se encuentra en una zona inocua, es decir, no presentan potencial perjudicial de reactividad álcali sílice.

Una adición de 30% se encuentra en una zona que no descarta el potencial ni lo afirma, es decir, se encuentran en una zona que podría presentar reactividad o no, para esto se recomienda realizar más ensayos.

d) Comparación 28 días y 16 días

De acuerdo a la norma, el ensayo de reactividad debe ser hasta los 16 días; sin embargo, para comparar estos resultados con los 28 días, se realizaron las mediciones de expansión de reactividad álcali sílice hasta los 28 días.

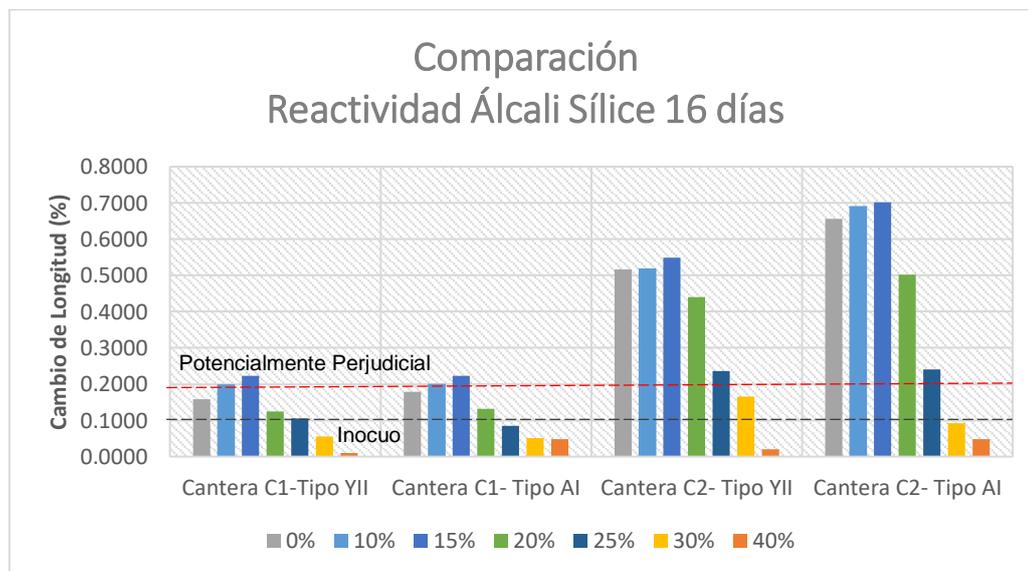


Figura Nº 81 Reactividad álcali sílice a los 16 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 y C2 (Elaboración propia, 2018)

De la figura anterior, se observa que la cantera C1 tiene un mejor comportamiento frente a la reactividad álcali sílice.

Para adiciones de 0%, la cantera C1, se encuentra debajo de un resultado potencialmente perjudicial, aunque no se logra ubicar en la zona con comportamiento inocuo.

Para la cantera C2, se observa que presenta potencial perjudicial para adiciones de 0%, es decir, esta cantera presenta un comportamiento perjudicial frente a la reactividad álcali sílice.

En ambos casos una adición de 40% de puzolana mitiga completamente el potencial perjudicial de la reactividad álcali sílice.

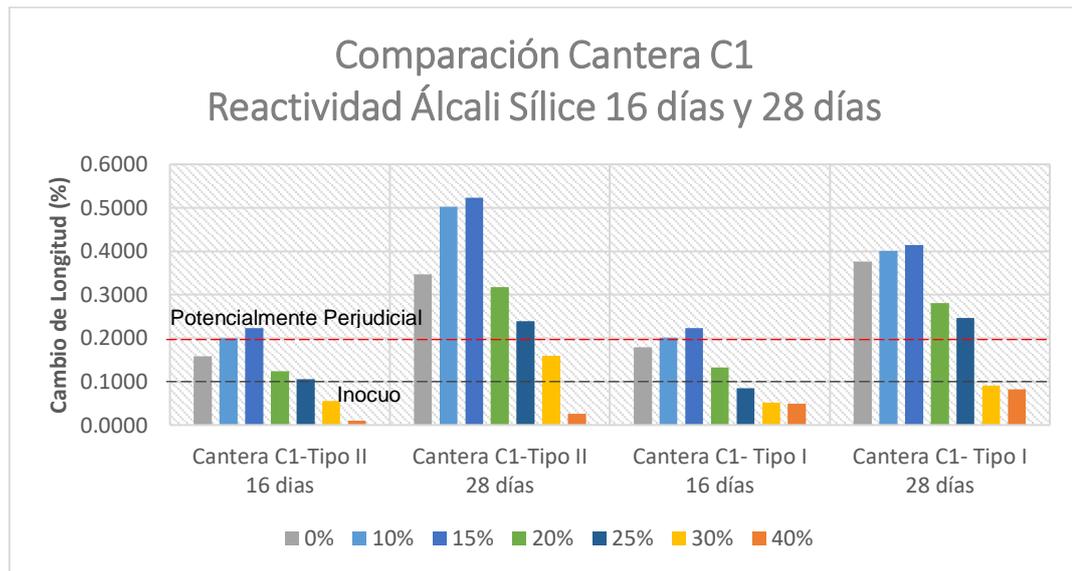


Figura N° 82 Reactividad álcali sílice a los 16 y 28 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C1 (Elaboración propia, 2018)

Del gráfico anterior, se buscó comparar los resultados a los 16 días y 28 días.

Para la cantera C1 y cemento tipo II:

- Con 0% de adición, expansión (28 días) = 219.0% expansión (16 días).
- Con 20% de adición, expansión (28 días) = 255.9% expansión (16 días).
- Con 40% de adición, expansión (28 días) = 246.2% expansión (16 días).

En promedio la expansión a los 28 días es el 246.1% de la expansión a los 16 días.

Para la cantera C1 y cemento tipo I:

- Con 0% de adición, expansión (28 días) = 210.6% expansión (16 días).
- Con 20% de adición, expansión (28 días) = 211.8% expansión (16 días).

- Con 40% de adición, expansión (28 días) = 167.8% expansión (16 días).

En promedio la expansión a los 28 días es el 205.8% de la expansión a los 16 días.

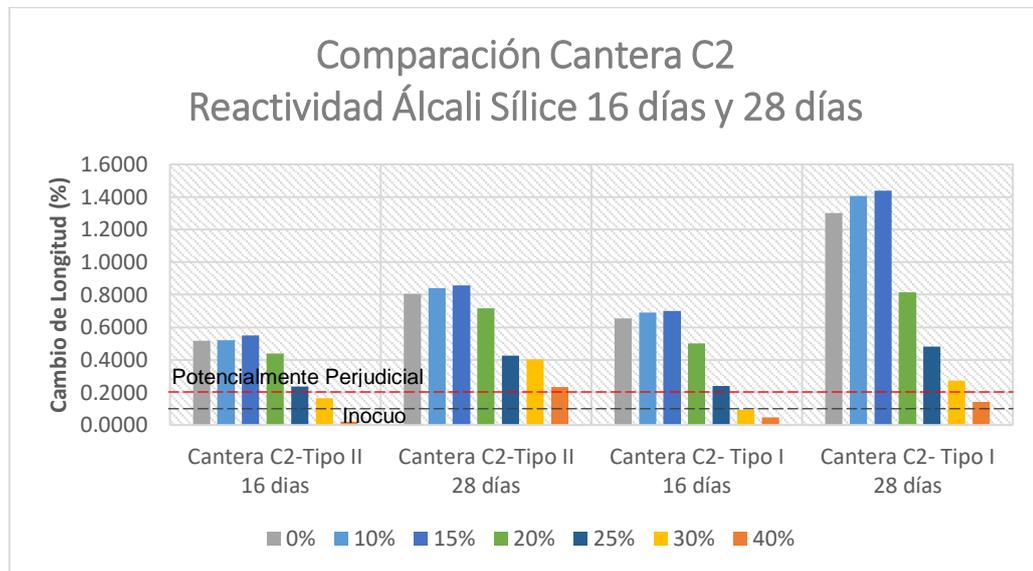


Figura N° 83 Reactividad álcali sílice a los 16 y 28 días según adición de diferentes porcentajes de puzolana. Cantera C2 (Elaboración propia, 2018)

Del gráfico anterior, se buscó comparar los resultados a los 16 días y 28 días.

Para la cantera C2 y cemento tipo II:

- Con 0% de adición, expansión (28 días) = 155.7% expansión (16 días).
- Con 20% de adición, expansión (28 días) = 162.7% expansión (16 días).
- Con 40% de adición, expansión (28 días) = 1113.1% expansión (16 días).

En promedio la expansión a los 28 días es el 313.4% de la expansión a los 16 días.

Para la cantera C2 y cemento tipo I:

- Con 0% de adición, expansión (28 días) = 198.6% expansión (16 días).
- Con 20% de adición, expansión (28 días) = 162.0% expansión (16 días).

- Con 40% de adición, expansión (28 días) = 295.8% expansión (16 días).

En promedio la expansión a los 28 días es el 223.3% de la expansión a los 16 días.

5.2. DETERMINACIÓN DE ÓPTIMO CONTENIDO DE PUZOLANA

A partir de los ensayos de reactividad álcali sílice y resistencia a la compresión se obtuvo el óptimo contenido de puzolana. Este valor consistía en que reduzca expansión álcali sílice y que la reducción de resistencia a la compresión, al mismo tiempo sea menor.

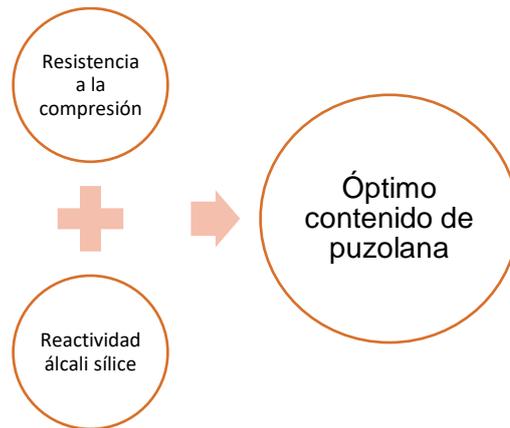


Figura N° 84 Determinación de óptimo contenido de puzolana en función de ensayo de resistencia a la compresión y reactividad álcali sílice (Elaboración propia, 2018).

5.2.1 Resistencia a la Compresión vs Mitigación RAS

Se tomó como base la resistencia de la mezcla patrón, la cual fue 0% de adición, en función de esta resistencia se determinó la resistencia para cada adición de puzolana. Para esto se tomaron los ensayos de resistencia a la compresión de cubos de mortero a los 28 días.

Por otro lado, en función de la expansión base, la cual fue con 0% de adición de puzolana, se graficó la reducción de expansión para cada porcentaje de adición de puzolana. Para esto se usaron los resultados de ensayos de reactividad álcali sílice a los 16 días.

Finalmente se graficaron las líneas de tendencia y se obtuvo la intersección de estas líneas, la cual consistía en el punto que reducía la mayor cantidad de

expansión y al mismo tiempo reduciendo la menor cantidad de resistencia a la compresión.

Además, se adición el límite de reactividad, el cual consistía en el porcentaje para el cual el potencial de reactividad era inocuo o como resultado de expansiones menores a 0.1%.

a) Cantera C1

Para la cantera C1, se obtuvieron los siguientes resultados:

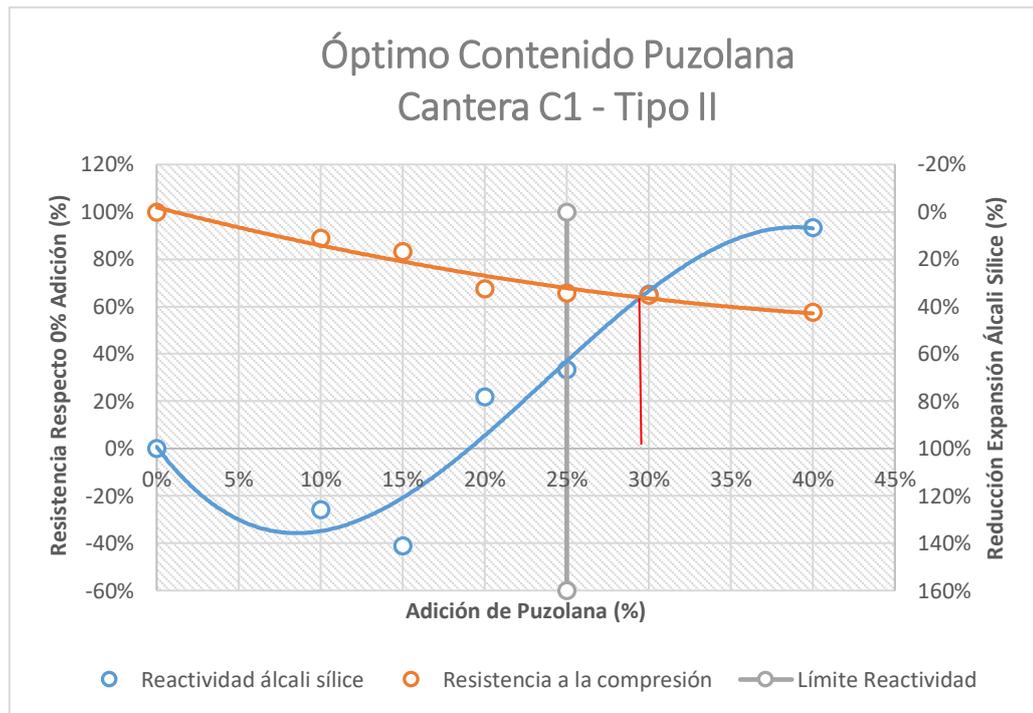


Figura N° 85 Óptimo contenido de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)

Para la cantera C1 y cemento tipo II, se determinó según el ensayo de reactividad álcali sílice, que a partir del 25% se obtenía un potencial de reactividad inocuo, por lo tanto, el óptimo contenido de puzolana tenía que ser mayor a este.

De la intersección de las líneas de tendencia, se obtuvo como óptimo contenido de puzolana un valor igual a 29.5%.

Para la resistencia a la compresión, se empleó una línea de tendencia polinómica de segundo grado. Además, se obtuvo un valor de coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.952.

En el caso de la reactividad álcali sílice, se empleó una línea de tendencia polinómica de tercer grado, debido a los cambios de pendiente en porcentajes de adición de 10% y 15%. Además, se obtuvo un valor de coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.9438.

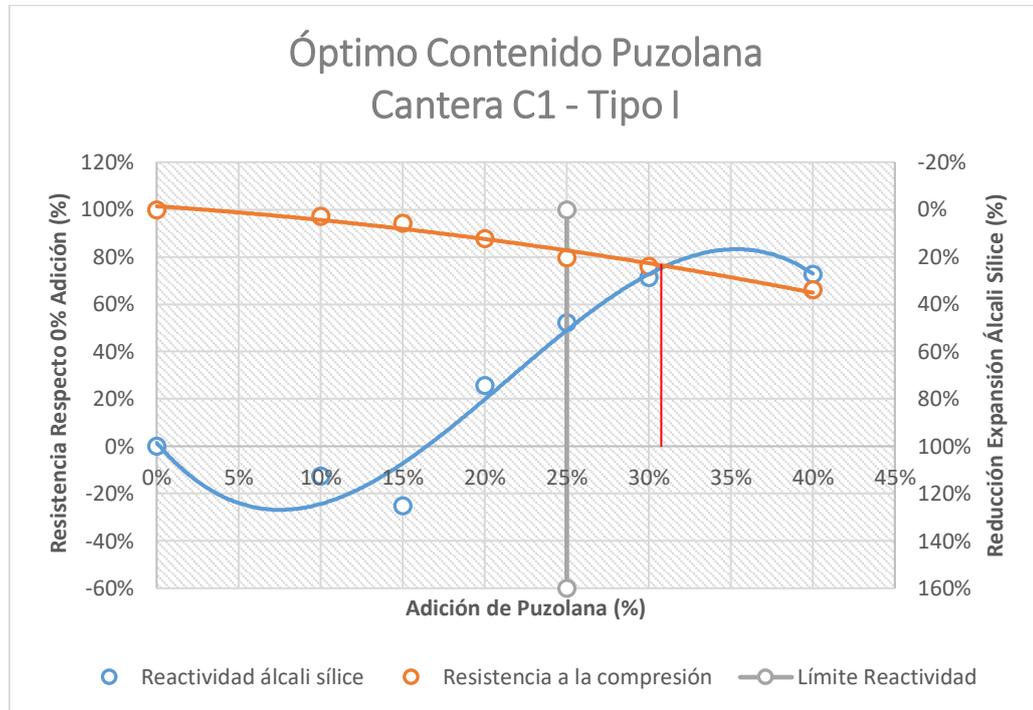


Figura N° 86 Óptimo contenido de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Para la cantera C1 y cemento tipo I, se determinó según el ensayo de reactividad álcali sílice, que a partir del 25% se obtenía un potencial de reactividad inocuo, por lo tanto, el óptimo contenido de puzolana tenía que ser mayor a este.

De la intersección de las líneas de tendencia, se obtuvo como óptimo contenido de puzolana un valor igual a 31.0%.

Para la resistencia a la compresión, se empleó una línea de tendencia polinómica de segundo grado. Además, se obtuvo un valor de coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.9755.

En el caso de la reactividad álcali sílice, se empleó una línea de tendencia polinómica de tercer grado, debido a los cambios de pendiente en porcentajes de

adición de 10% y y 15%. Además, se obtuvo un valor de coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.947.

b) Cantera C2

Para la cantera C1, se obtuvieron los siguientes resultados:

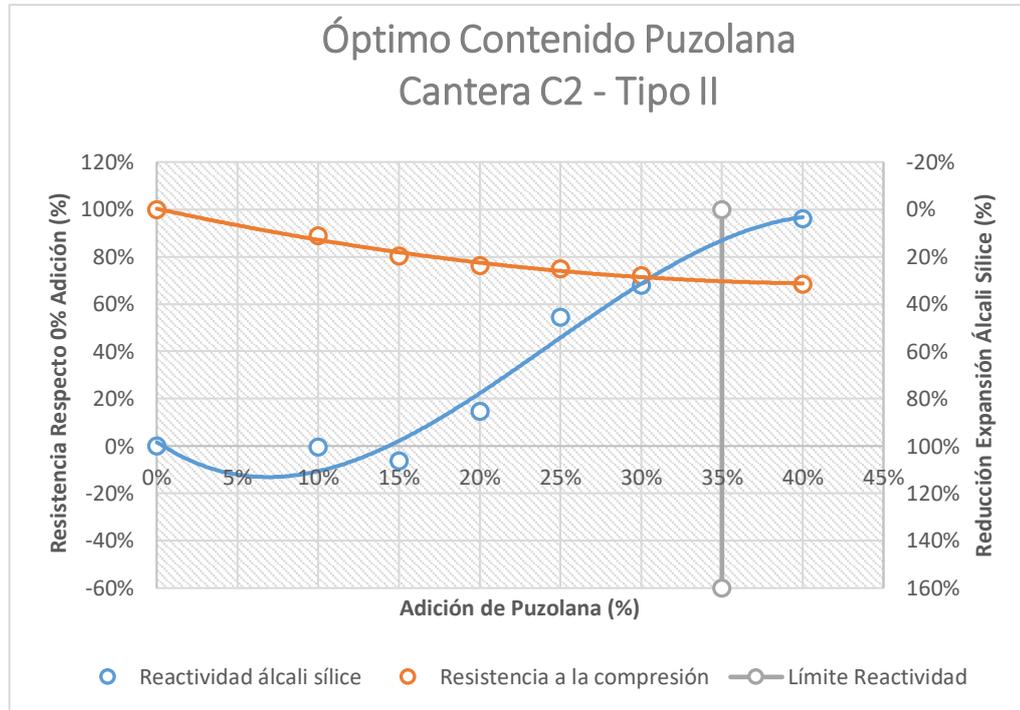


Figura N° 87 Óptimo contenido de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo II (Elaboración propia, 2018)

Para la cantera C2 y cemento tipo II, se determinó según el ensayo de reactividad álcali sílice, que a partir del 35% se obtenía un potencial de reactividad inocuo, por lo tanto, el óptimo contenido de puzolana tenía que ser mayor a este.

Debido a que la intersección de las líneas de tendencia se encontraba en una zona de potencial perjudicial de reactividad álcali sílice, se tomó como óptimo contenido de puzolana un valor igual a 35.0%.

Para la resistencia a la compresión, se empleó una línea de tendencia polinómica de segundo grado. Además, se obtuvo un valor de coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.9881.

En el caso de la reactividad álcali sílice, se empleó una línea de tendencia polinómica de tercer grado, debido a los cambios de pendiente en porcentajes de adición de 10% y 15%. Además, se obtuvo un valor de coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.9683.

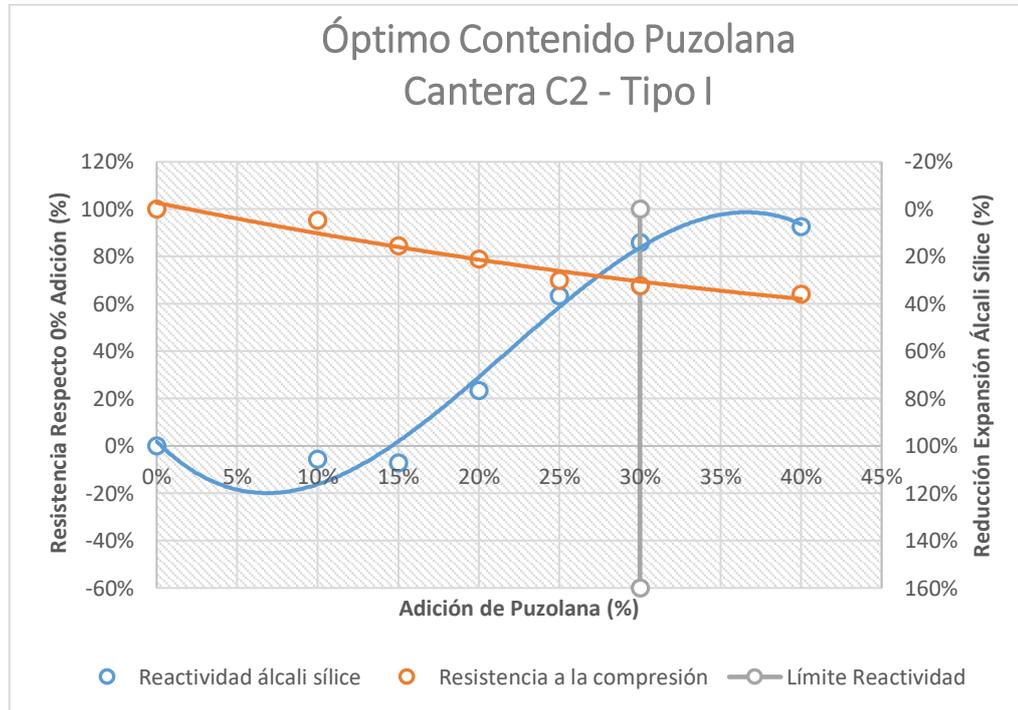


Figura N° 88 Óptimo contenido de puzolana. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Para la cantera C2 y cemento tipo II, se determinó según el ensayo de reactividad álcali sílice, que a partir del 35% se obtenía un potencial de reactividad inocuo, por lo tanto, el óptimo contenido de puzolana tenía que ser mayor a este.

Debido a que la intersección de las líneas de tendencia se encontraba en una zona de potencial perjudicial de reactividad álcali sílice, se tomó como óptimo contenido de puzolana un valor igual a 30.0%.

Para la resistencia a la compresión, se empleó una línea de tendencia polinómica de segundo grado. Además, se obtuvo un valor de coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.9483.

En el caso de la reactividad álcali sílice, se empleó una línea de tendencia polinómica de tercer grado, debido a los cambios de pendiente en porcentajes de adición de 10% y 15%. Además, se obtuvo un valor de coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.9774.

5.2.2 Óptimo Contenido de Puzolana

En el siguiente cuadro se indica el óptimo contenido de puzolana según cantera y tipo de cemento:

Cuadro N° 35 Óptimo contenido de puzolana (Elaboración Propia, 2018)

Óptimo Contenido de Puzolana (%)		
Cemento	Cantera	
	C1	C2
Tipo I	31.0	30.0
Tipo II	29.5	35.0

5.3. DISEÑO EXPERIMENTAL DE CCR

Del diseño en el capítulo anterior, se obtuvo que el diseño inicial fue para requerimientos de una resistencia igual a 140 Kg/cm^2 , debido a que se consideró que la incorporación de puzolana reduciría en 15% la resistencia del concreto, esto quiere decir que, al adicionar la puzolana, la resistencia de 140 Kg/cm^2 se convertiría en una resistencia de 120 Kg/cm^2 .

Gráficamente se obtuvo que para una resistencia de 140 Kg/cm^2 , se necesita una cantidad de cemento igual a 150 Kg por m^3 , entonces también se hicieron dos diseños con 130 y 110 Kg por m^3 para la Cantera C1. Para la cantera C2, se diseñaron con $130, 110$ y 90 Kg por m^3 .

Con estos diseños variando la relación agua/cemento y verificando su resistencia, se halló el que se aproxime más a 140 Kg/cm^2 , y a partir de este, se adicionó la puzolana.

5.3.1 Cantera C1

Se realizaron diseños para la cantera C1 con cemento tipo I.

a) Diseño

A partir de las tablas y gráficos usados para el diseño del CCR se obtuvo el siguiente diseño base, como se obtuvo en el capítulo anterior:

Cuadro N° 36 Cantidad por m³ de mezcla. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Material	Peso (Kg)
63mm a 25mm	369.20
25mm a 9.5mm	669.07
9.5mm a 2.36mm	507.87
2.36mm a 0.6mm	324.13
0.6mm a -	442.00
Cemento	150.00
Agua	105
Aditivo	1.98
Aire	0

Luego se fue cambiando el contenido de cemento (relación a/c), manteniendo la cantidad de pasta constante. A partir del valor constante de pasta se obtuvo la cantidad de cemento. Obteniéndose los siguientes diseños:

Cuadro N° 37 Coeficientes importantes de mezcla de CCR. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Diseño	Relación a/c	Porcentaje de finos (%)	Volumen de mortero (m ³)	Volumen de pasta (m ³)	Ratio pasta/mortero
D1	0.70	7	0.45	0.23	0.51
D2	0.87	7	0.45	0.23	0.51
D3	0.87	7	0.45	0.23	0.51
D4	1.08	7	0.45	0.23	0.51

A partir de 150 Kg por m³ de cemento, se varió en 20 Kg la cantidad de cemento, manteniendo constante la cantidad de pasta y variando la cantidad de agua, de forma que esta cantidad de pasta sea constante.

Cuadro N° 38 Cantidades por m³ de mezcla de CCR según diseño. Cantera C1 y cemento tipo I
(Elaboración propia, 2018)

Resumen de Cantidades por m³ Cantera C1				
Material	Diseño D1 Peso (Kg)	Diseño D2 Peso (Kg)	Diseño D3 Peso (Kg)	Diseño D4 Peso (Kg)
63mm a 25mm	369.20	369.20	369.20	369.20
25mm a 9.5mm	669.07	669.07	669.07	669.07
9.5mm a 2.36mm	507.87	507.87	507.87	507.87
2.36mm a 0.6mm	324.13	324.13	324.13	324.13
0.6mm a -	442.00	442.00	442.00	442.00
Cemento	150	130	130	110
Agua inicial	105	113	113	119
Aditivo 1.32%	1.98	1.72	0	1.45
Aire	-	-	-	-

b) Propiedades en Estado Fresco

En lo que se refiere a las propiedades en estado fresco, fueron el tiempo Vebe para determinar su consistencia y el contenido de aire.

Cuadro N° 39 Propiedades en estado fresco de CCR según diseño. Cantera C1 y cemento tipo I
(Elaboración propia, 2018)

Diseño	Tiempo Vebe (s)	Contenido de Aire (%)
D1	43	1.5
D2	31	1.4
D3	36	1.0
D4	30	1.8

Para el diseño D3 no se consideró uso de aditivo y como se puede apreciar, el tiempo Vebe aumenta, es decir se reduce su trabajabilidad, por lo tanto, el aditivo mejora la trabajabilidad del CCR.

Debido a que el diseño D3 no tenía aditivo, no se consideró en el siguiente gráfico.

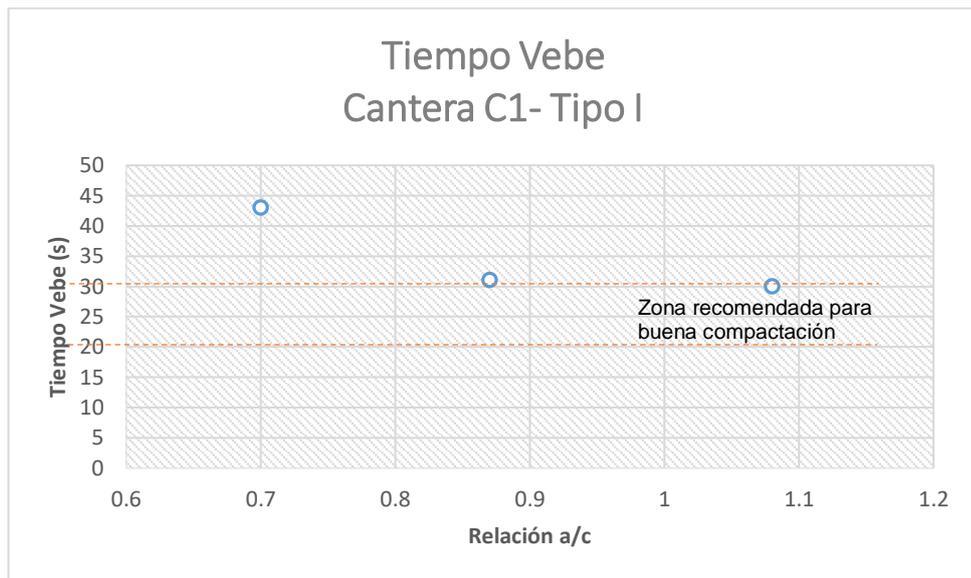


Figura N° 89 Tiempo Vebe versus relación a/c. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

c) Propiedades en Estado Endurecido

En esta etapa se obtuvo la resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas a los 28 días.

Cuadro N° 40 Resistencia a la compresión según diseño. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Diseño	Resistencia a la Compresión 28 días (Kg/cm ²)
D1	168.04
D2	104.89
D3	74.63
D4	77.24

En el caso del diseño D3 no se consideró uso de aditivo y como se puede apreciar, la resistencia a la compresión se redujo en un 28.85%. Para el gráfico no se consideró este diseño, pues todos los demás tenían aditivo.

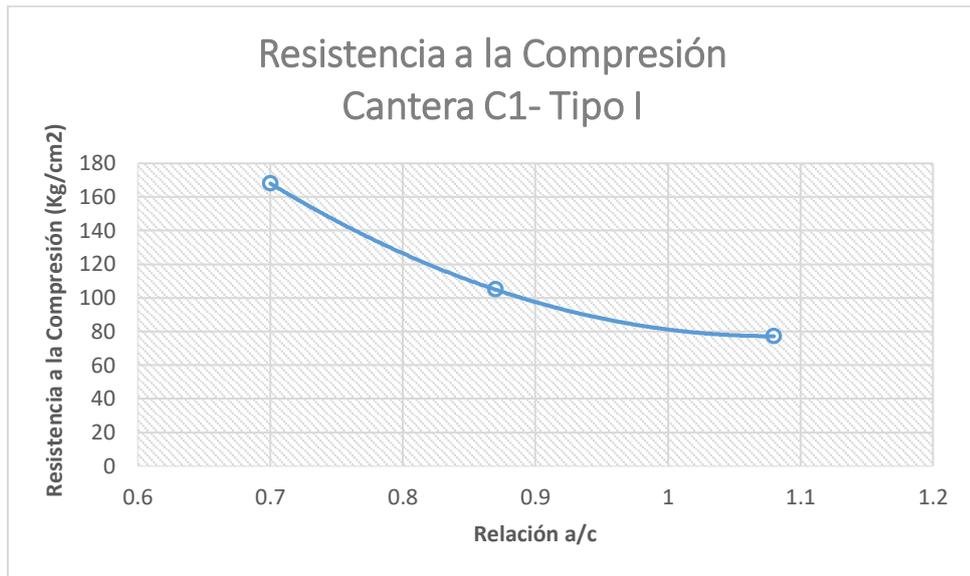


Figura N° 90 Resistencia a la compresión versus relación a/c. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

A partir del diseño D1, D2 y D4 se graficó la resistencia a la compresión versus la relación a/c.

El coeficiente de determinación (R) es igual a 1, esto debido a que solo se usaron 3 puntos y la línea de tendencia presenta un ajuste polinómico de grado 2.

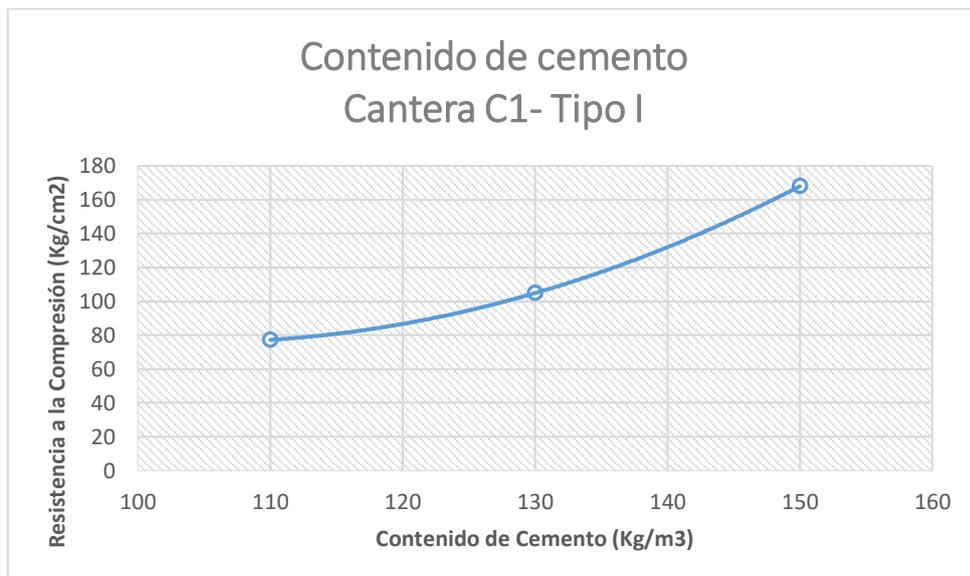


Figura N° 91 Resistencia a la compresión versus contenido de cemento. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

A partir del diseño D1, D2 y D4 se graficó la resistencia a la compresión versus el contenido de cemento.

El coeficiente de determinación (R) es igual a 1, esto debido a que solo se usaron 3 puntos y la línea de tendencia presenta un ajuste polinómico de grado 2.

5.3.2 Cantera C2

Se realizaron diseños para la cantera C2 con cemento tipo I.

a) Diseño

A partir de las tablas y gráficos usados para el diseño del CCR se obtuvo el siguiente diseño base, como se obtuvo en el capítulo anterior:

Cuadro N° 41 Cantidad por m3 de mezcla. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Diseño	Relación a/c	Porcentaje de finos (%)	Volumen de mortero (m3)	Volumen de pasta (m3)	Ratio pasta/mortero
D1	0.70	7	0.46	0.23	0.50
D2	0.86	7	0.46	0.23	0.50
D3	0.86	7	0.46	0.23	0.50
D4	1.08	7	0.46	0.23	0.50

Luego se fue cambiando el contenido de cemento (relación a/c), manteniendo la cantidad de pasta constante. A partir del valor constante de pasta se obtuvo la cantidad de cemento. Obteniéndose los siguientes diseños:

Cuadro N° 42 Cantidades por m3 de mezcla de CCR según diseño. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Resumen de Cantidades por m3 Cantera C2				
Material	Diseño D1 Peso (Kg)	Diseño D2 Peso (Kg)	Diseño D3 Peso (Kg)	Diseño D4 Peso (Kg)
63mm a 25mm	351.25	351.25	351.25	351.25
25mm a 9.5mm	634.94	634.94	634.94	634.94
9.5mm a 2.36mm	483.13	483.13	483.13	483.13
2.36mm a 0.6mm	308.13	308.13	308.13	308.13
0.6mm a -	419.38	419.38	419.38	419.38
Cemento	150	130	110	90
Agua inicial	105	113	121	128
Aditivo 1.32%	1.98	1.72	1.45	1.19
Aire	-	-	-	-

b) Propiedades en Estado Fresco

En lo que se refiere a las propiedades en estado fresco, fueron el tiempo Vebe para determinar su consistencia y el contenido de aire.

Cuadro N° 43 Propiedades en estado fresco de CCR según diseño. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Diseño	Tiempo Vebe (s)	Contenido de Aire (%)
D1	33	2.0
D2	29	1.6
D3	20	1.9
D4	18	1.6

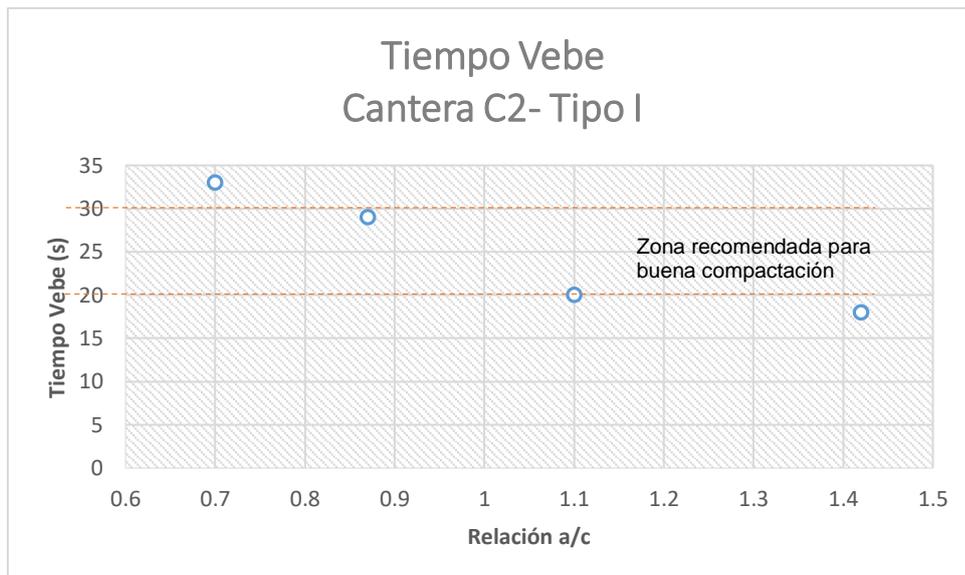


Figura N° 92 Tiempo Vebe versus relación a/c. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

c) Propiedades en Estado Endurecido

En esta etapa se obtuvo la resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas a los 28 días.

Cuadro N° 44 Resistencia a la compresión según diseño. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Diseño	Resistencia a la Compresión 28 días (Kg/cm ²)
D1	191.00
D2	111.16
D3	70.45

D4	40.18
----	-------

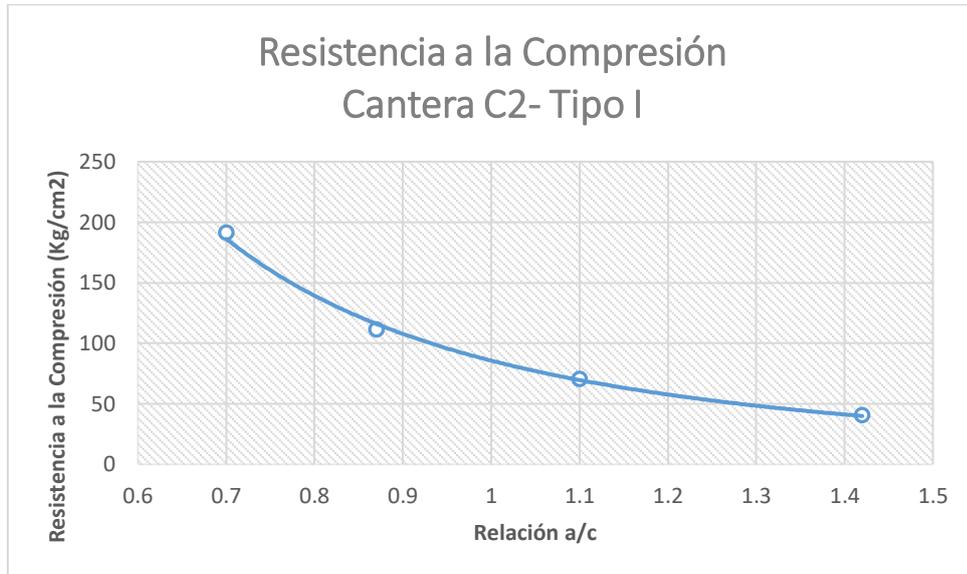


Figura Nº 93 Resistencia a la compresión versus relación a/c. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

A partir del diseño D1, D2, D3 y D4 se graficó la resistencia a la compresión versus la relación a/c.

El coeficiente de determinación (R) es igual a 0.998, la línea de tendencia presenta un ajuste polinómico de grado 2.

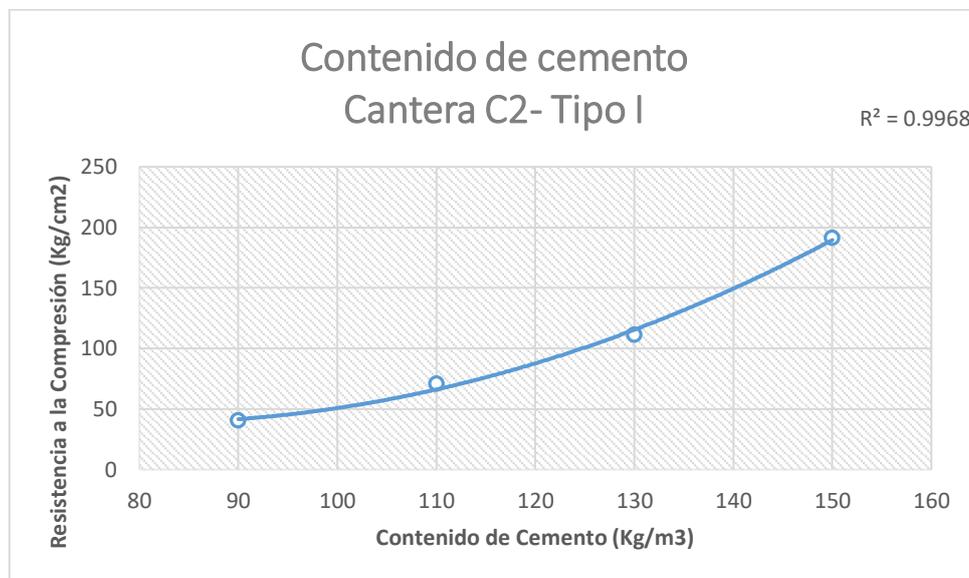


Figura Nº 94 Resistencia a la compresión versus contenido de cemento. Cantera C2 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

A partir del diseño D1, D2, D3 y D4 se graficó la resistencia a la compresión versus el contenido de cemento.

El coeficiente de determinación (R) es igual a 0.9968, esto debido a que solo se usaron 3 puntos y la línea de tendencia presenta un ajuste polinómico de grado 2.

5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO CON Y SIN PUZOLANA

Luego de haber obtenido resultados para mezclas de CCR sin adición, se procedió a diseñar la una mezcla de CCR que de un valor de 120 Kg/cm² a los 28 días.

5.4.1 Diseño con óptimo contenido de puzolana

Para diseñar el CCR con adición de puzolana, considerando los porcentajes óptimos hallados, se consideró los valores de reducción de resistencia del ensayo de resistencia a la compresión de cubos de mortero.

La cantera seleccionada fue C1, debido a que tenía un mejor comportamiento frente a la reactividad álcali sílice, los resultados indicaban que tenía menor potencial reactivo que la cantera C2.

Para una adición de 30% de puzolana, en la cantera C1 y usando cemento tipo I, se determinó, que la resistencia se reducía en un 24%. Por lo tanto, si se el objetivo era tener un CCR de resistencia igual a 120 Kg/cm², el valor de diseño debería ser un 24% mayor a 120 Kg/cm², es decir, igual a 157.89 Kg/cm². Este valor se redondeó a 160 Kg/cm².

Cuadro N° 45 Óptimo contenido de puzolana (Elaboración Propia, 2018)

Óptimo Contenido de Puzolana (%)		
Cemento	Cantera	
	C1	C2
Tipo I	31.0 (-24% resis.)	30.0 (-28% resis.)
Tipo II	29.5 (-35% resis.)	35.0 (-34% resis.)

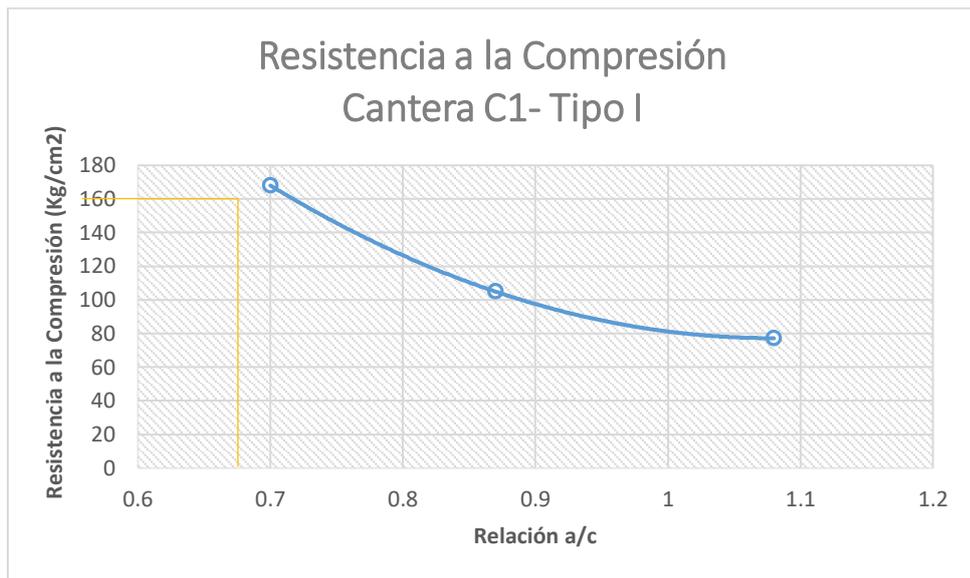


Figura N° 95 Resistencia a la compresión versus relación a/c. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Del gráfico anterior, se determinó que para una resistencia igual a 160 Kg/cm² sin adición de puzolana, se requería una relación a/c igual a 0.72.

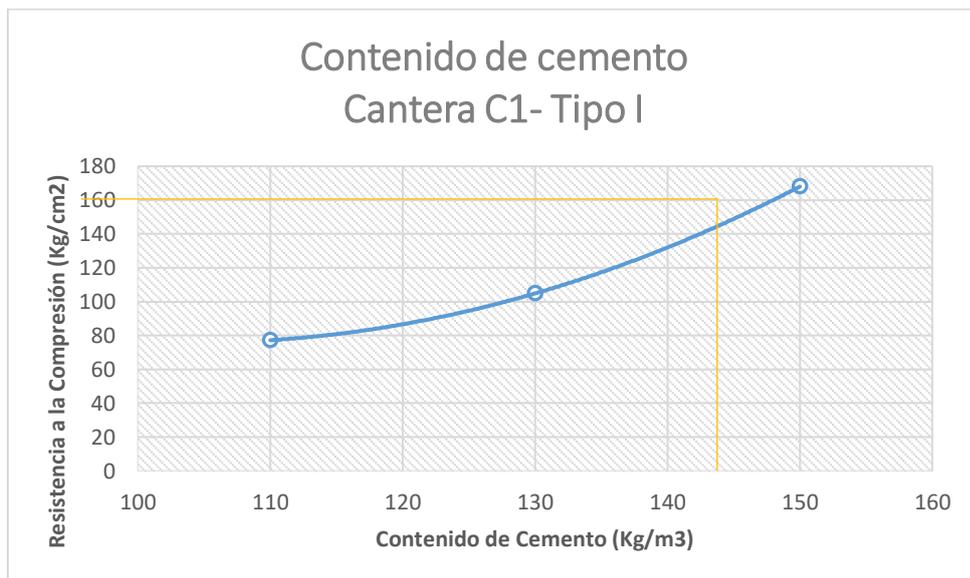


Figura N° 96 Resistencia a la compresión versus contenido de cemento. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Del gráfico, se determinó que para una resistencia igual a 160 Kg/cm² sin adición de puzolana, se necesitaba un contenido de cemento igual a 148Kg por m³.

Cuadro N° 46 Cantidades por m³ de mezcla de CCR según diseño con 30% de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Material	Diseño D-30P Peso (Kg)
63mm a 25mm	369.20
25mm a 9.5mm	669.07
9.5mm a 2.36mm	507.87
2.36mm a 0.6mm	324.13
0.6mm a -	442.00
Cemento	103.6
Puzolana 30%	44.4
Agua inicial	106.6
Agua corregida	105
Aditivo 1.32%	1.98
Aire	-

5.4.2 Propiedades del CCR con adición de puzolana

De los ensayos en estado fresco se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro N° 47 Resistencia a la compresión mezcla de CCR con 30% de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Diseño	Tiempo Vebe (s)	Contenido de Aire (%)
D-30P	33	1.6

Cuadro N° 48 Resistencia a la compresión mezcla de CCR con 30% de puzolana. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Diseño	Resistencia a la Compresión 28 días (Kg/cm²)
D-30P	111.68

Este resultado tiene una variación de 6.93%, respecto el resultado buscado de 120 Kg/cm².

5.4.3 Comparación con y sin puzolana

De los ensayos en estado fresco se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro N° 49 Comparación de mezcla de CCR con y sin adición de. Cantera C1 y cemento tipo I (Elaboración propia, 2018)

Diseño	Cantidad de cemento (Kg por m3)	Resistencia a la Compresión 28 días (Kg/cm2)	Tiempo Vebe (s)	Contenido de Aire (%)
D-30P	103.6 (44.4P)	111.68	33	1.6
D1-C1	150	168.04	43	1.5

5.5. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La hipótesis planteada era la siguiente: Con la adición de puzolana se puede controlar la expansión de la reacción álcali - sílice para los CCR de resistencia $f_c=120$ Kg/cm2.

Entonces, con los resultados de reactividad álcali sílice, se pudo determinar que la puzolana en porcentajes cercanos al 30% o mayores son efectivos para mitigar esta reactividad. Además, se puede llegar a alcanzar resistencias similares a 120 Kg/cm2 a los 28 días en mezclas de CCR adicionadas de puzolana.

Por lo tanto, se comprobó la validez de la hipótesis planteada en esta investigación.

CONCLUSIONES

1. Como conclusión principal es que se ha logrado determinar la efectividad de la puzolana natural para mitigar la reactividad álcali sílice en CCR.
2. Se ha logrado determinar las propiedades de los agregados de las canteras C1 y C2; además de la puzolana natural empleada.
3. Las dosificaciones de adición de puzolana empleadas fueron 10%,15%,20%,25%,30% y 40%.
4. El índice de actividad puzolánica para la puzolana usada varía entre 84% a 137%, por lo que al ser mayor a 75% es considerada una puzolana apta para su uso.
5. Los porcentajes de óptimo contenido de puzolana varían de acuerdo con el tipo de cantera y cemento usado, pero de manera general es mayor al 25%.
6. En adiciones de puzolana menores al 15%, el potencial reactivo se incrementa. Es probable que esto se deba a la composición interna de la puzolana como lo mencionan otras investigaciones.
7. La adición de puzolana en cualquier porcentaje disminuye la resistencia a la compresión.
8. En el diseño del CCR, se considera el tiempo Vebe, la granulometría y el volumen de pasta como factores principales.
9. El contenido de finos en CCR es mayor que un concreto convencional con el objetivo de evitar la segregación.
10. A medida que la relación a/c se incrementa, el tiempo Vebe disminuye.
11. El tiempo Vebe obtenido del diseño base de CCR es igual a 43s y con la adición de 30% de puzolana el tiempo Vebe es igual a 33s, por lo que la puzolana mejora la trabajabilidad de la mezcla.
12. El empleo del aditivo plastiment CCR plus PE ayuda a mejorar la trabajabilidad e incrementar la resistencia a la compresión del CCR.
13. Usando la relación a/c igual a 0.72, se diseñó la mezcla final de CCR con adición de 30% de puzolana, al cual obtuvo 111.68 Kg/cm² de resistencia a la compresión.

RECOMENDACIONES

Densificar los puntos de dosificación en un intervalo cercano al valor óptimo de puzolana obtenido.

Se recomienda acopiar gran cantidad de material fino antes de empezar los ensayos y analizar su disponibilidad para evitar demoras en el proceso experimental.

Elegir recipientes adecuados para el ensayo de reactividad, de manera que no se produzca evaporación de la solución de NaOH, con la posible pérdida del ensayo.

Realizar ensayos previos para determinar los tiempos de ensayo y familiarizarse con estos, para así poder programar los días de ensayo en la etapa experimental.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI. "Guía para seleccionar las proporciones de un concreto con cero slump –ACI 211.3R-02" Norma Internacional, American Concrete Institute, Michigan, Estados Unidos, 2009.
2. ACI. "Reporte del Estado del Arte en Reactividad Alkali Agregado-211.1R-98" Norma Internacional, American Concrete Institute, Michigan, Estados Unidos, 1998.
3. ACI. "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete – ACI 232-1R" Norma Internacional, American Concrete Institute, Michigan, Estados Unidos, 2000.
4. Álvarez J. "Uso del agua: los retos del Perú, un país rico en este recurso" Artículo de Investigación, El Comercio, Lima, Perú, 2015
5. ASTM. "Método de ensayo. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice en los agregados. Método de la barra de mortero - C1260" Norma Internacional, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, Estados Unidos, 2007.
6. ASTM. "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete- C 618" Norma Internacional, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, Estados Unidos, 2003.
7. ASTM. "Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete- C311" Norma Internacional, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, Estados Unidos, 2002.

8. ASTM. "Terminología Estándar Relativa a Concreto y Agregados de Concreto- C 125" Norma Internacional, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, Estados Unidos, 2001.
9. Cemex," Experiencias En Presas de Hormigón Compactado con Rodillo", Artículo de Investigación, Cemex, Nuevo León, México, 2015.
10. CP Tech center "Guía para pavimentos compactados con rodillo". Norma Internacional, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa, Estados Unidos, 2010.
11. Córdova Sánchez C., "Análisis del concreto simple utilizando vidrio pulverizado como adición para concreto de alta resistencia con agregados de la ciudad de Chiclayo", Tesis de Pre-grado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Perú, 2018
12. Cox, H.P., Coleman, R.B. and White, L. , "Effect of blastfurnace-slag cement on alkali-aggregate reaction in concrete." Artículo de Investigación, Pit and Quarry, Cleveland, Estados Unidos, 1950.
13. Del Carmen M., Ramos A. & Ulo C. "Inhibición de la reacción álcali-agregado utilizando puzolana natural" Artículo de investigación, Universidad Mayor San Andrés, La Paz, Bolivia, 2011.
14. Díaz Tello O., 2017 "Análisis de la influencia de la reactividad álcali sílice de los agregados en la durabilidad del concreto $f'c$: 280 kg/cm² según la norma ASTM c-1260 evaluado en canteras de Cajamarca", Tesis de Pre-grado, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú, 2017.
15. Diamond, S., "ASR—Another Look at Mechanisms," Artículo de Investigación, Eighth International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japón, 1989.

16. Escalaya Advíncula M., "Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos" Tesis de Post-grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2006.
17. Feng, X., Thomas, M.D.A., Bremner, T.W., Balcom, B.J. and Folliard, K.J. , "Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review." Artículo de Investigación, Cement and Concrete Research, 2005.
18. Foroughi M., Tabatabaei R. & Shamsadeini M. "Efecto de puzolanas naturales en la reacción álcali-sílice en especímenes reales de concreto" Artículo de investigación, Universidad Islámica Azad, Kerman, Irán, 2012.
19. Graña y Montero, "Central hidroeléctrica Cerro del Águila", Artículo de investigación, Lima, Perú, 2016.
20. Gobierno Regional de Arequipa "Proponen construcción de 8 presas ", Artículo, La República, Lima, Perú, 2017.
21. Gobierno Regional de Cajamarca "Ejecutarán cinco proyectos de represas para Cajamarca" Artículo, La República, Lima, Perú, 2017.
22. HCC, "Construyendo 196m de una presa de CCR en 196 días" Artículo de Investigación, Hindustan Construction Company, Mumbai, India, 2015.
23. Huamán Sánchez A., "Influencia de la reactividad álcali-sílice de los agregados en la durabilidad del concreto" Tesis de Pre-grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2017.
24. Husein A., Ehab S. & Husein D. "Estudio comparativo de las propiedades físicas y químicas de diferentes materiales puzolánicos usados para concreto

compactado con rodillo en presas” Conferencia Internacional, Sharjah, Emiratos Árabes Unidos, 2017.

25. Fujii K., “Shimajigawa Dam”, Artículo de investigación, Fujii K., Chugoju, Japón 2012.

26. Melo Jiménez L., “Reactividad álcali-agregado: experiencias en presas colombianas, análisis comparativo de principales variables que intervienen en el fenómeno” Tesis Pre-grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2014.

27. McCoy, W.J. and Caldwell, A.G. 1951. “New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion.” Artículo de investigación, American Concrete Institute, Michigan, Estados Unidos, 1951.

28. Munir M., Qazi A., Kazmi S., Khitab A., Ashiq S. and Ahmed I., 2016, “A literature review on alkali silica reactivity of concrete in Pakistan” Artículo de investigación, University of Engineering and Technology, Lahore, Pakistan, 2016.

29. Nam Ngiep1 Power Company, “First Roller Compacted Concrete Placement at Main Dam “, Artículo de investigación, Nam Ngiep1 Power Company, Vientiane, Laos, 2016.

30. New Central Soil and Materials Research Station “Monograph on alkali-aggregate reaction in concrete” Artículo de investigación, Ministry of Water Resources , New Delhi, India, 2008.

31. Pasquel Carbajal, E., “Reacción álcali-agregado: el VIH del concreto” Artículo de Investigación, CITEDEC, Lima, Perú, 2009.

32. PCA, “Design and Control of Concrete Mixtures” Libro, Portland Cement Association , Illinois, Estados Unidos, 2008.

33. Sika. “Plastiment CCR Plus”, Hoja Técnica, Sika, Lurín, Perú, 2015.

34. Stanton, T. E., "California Experience with the Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate," Artículo de Investigación, American Concrete Institute, Michigan, Estados Unidos, 1942.

35. Sydney Marie D. "Mitigación de la reacción álcali-sílice usando alto volumen de ceniza volante clase C", Tesis de Pre-grado, Universidad de Arkansas, Fayetteville, Estados Unidos, 2015.

36. Stokes D., Wang H. and Diamond S., "A lithium-based admixture for ASR control that does not increase the pore solution pH." Artículo de investigación, American Concrete Institute, Detroit, 1997.

37. Reeza A., Abdul A., Fadhil M. and Ahmad J., "Construcción de la presa de Concreto Compactado con Rodillo: Un caso de estudio de la presa Batu Hampar" Artículo de investigación, Universidad de Tecnología MARA, Shah Alam Selangor, Malasia, 2015.

38. Rotec, "Ralco RCC Dam", Artículo de investigación, Rotec, Illinois, Estados Unidos, 2017.

39. Rumbo Minero, "Central Hidroeléctrica de Chaglla: Una de las más Grandes del Perú" Artículo, Rumbo Minero, Lima, Perú, 2016.

40. Tabra S. "La preocupante y desigual situación del agua en el Perú", Artículo de investigación, Universidad de Arkansas, Fayetteville, Estados Unidos, 2015.

41. Trejo D., Mazarei V., Ideker J. & Burkan I., "Influencia de la reactividad de la reacción álcali sílice en la corrosión del concreto reforzado" Artículo de investigación, Servindi, Lima, Perú, 2017.

42. Thomas, M.D., 2011, "The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review." Artículo de Investigación, Cement and Concrete Research, 2011.
43. Thomas, M.D. and Folliard, K.J., "Concrete aggregates and the durability of concrete." Artículo de Investigación, Cambridge, Reino Unido, 2007
44. Thomas, M.D, Fournier, B. & Folliard, K.J., "Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book" Libro, U.S. Department of Transportation, Washington DC, Estados Unidos, 2013.
45. Villegas Martínez, C. "Utilización de puzolanas naturales en la elaboración de prefabricados con base cementicia a la construcción de viviendas de bajo costo" Tesis de Post-Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2012.
46. Unacem, "Cemento andino Premium", Ficha técnica, Unacem, Lima, Perú, 2018.
47. U.S. Department of the Interior "Design and Construction Considerations for Hydraulic Structures Roller-Compacted Concrete" Libro, Bureau of Reclamation, Colorado, Estados Unidos, 2017.
48. USACE, "Ingeniería y Diseño del Concreto Compactado con Rodillo" Libro, US Army Corps of Engineering, Washington, Estados Unidos, 2006.
49. Wikipedia, "Presa de Gravedad" Artículo de investigación, Wikipedia, California, Estados Unidos, 2009.

ANEXOS

PROCEDIMIENTO MEZCLA DE CCR	
 <p>1-Acondicionar material en cilindros de plástico</p>	 <p>6-Añadir agregado de menor tamaño</p>
 <p>2-Pesar material en baldes</p>	 <p>7-Agregar material fino</p>
 <p>3-Acondicionar herramientas</p>	 <p>8-Agregar material más fino</p>
 <p>4-Colocar agregado grueso y luego el cemento</p>	 <p>9-Terminar de mezclar manualmente</p>
 <p>5-Colocar agregado grueso de menor tamaño</p>	 <p>10-Llenar la mezcla seca en los baldes y vaciar en la mezcladora</p>

PROCEDIMIENTO MEZCLA DE CCR	
 <p>11-Juntar los restos de mezcla con una escoba y luego del balde pasar a la mezcladora</p>	 <p>16-Volver a mezclar por 3 min y golpear con los martillos de goma</p>
 <p>12-Luego de vaciado el material colocar la tapa de la mezcladora</p>	 <p>17-Retirar la tapa de la mezcladora y vaciar a los buggies</p>
 <p>13-Mezclar por 3 min y golpear con los martillos de goma</p>	 <p>18-Vaciar a la plataforma y uniformizar manualmente</p>
 <p>14-Detener la mezcladora por 2 min y raspar los bordes</p>	 <p>19-Identificar la muestra y tomar foto</p>



15-Humedecer la plataforma metálica con un trapo



20-Tapar con bolsa plástica para evitar que pierda la humedad

PROCEDIMIENTO ENSAYO CONSISTENCIA VEBE



1-Luego de tener la mezcla de CCR realizar el ensayo



4-Llenar el molde y pesar hasta obtener la cantidad requerida por el ensayo



2-Tamizar en húmedo a través de la malla 2"



5-Colocar el molde en la mesa Vebe



3-Pesar el molde



6-Iniciar el ensayo controlando con cronómetro y registrar el tiempo Vebe

PROCEDIMIENTO MOLDEO DE PROBETAS DE CCR



1-Engrasar probetas



6-Limpiar el disco y regresar la pasta a la probeta



2-Limpiar martillo compactador



7-Colocar el collarín para la 3ra capa. Llenar y compactar



3-Tamizar el CCR por tamiz de 2"



8-Colocar el capping y terminar de compactar por 5s



4-Llenar las probetas y medir el espesor de la capa



9-Llenar de agua la parte superior de la probeta



5-Compactar cada capa por 20s



10-Colocar un plástico para evitar la pérdida de la humedad

PROCEDIMIENTO REACTIVIDAD ÁLCALI SÍLICE-1



1-Triturar el material, si es que no hay suficiente



6- Llenar los moldes en 2 capas



2-Tamizar material según malla



7- Compactar el mortero



3-Tamizar cemento por malla N°20



8-Acabado final con badilejo y dejar por 24h



4- Tamizar puzolana por malla N°20



9-Desmoldar y sumergir en agua



5-Mezclar mortero



10-Colocar en el horno por 24h a 80°C

PROCEDIMIENTO REACTIVIDAD ÁLCALI SÍLICE-2	
 <p>11-Para la medición, colocar la barra patrón de lectura cero</p>	 <p>14-Realizar la lectura</p>
 <p>12-Retirar las barras del horno</p>	 <p>15-Volver a sumergir en agua</p>
 <p>13-Secar la barra a ser medida</p>	

PROCEDIMIENTO RESISTENCIA CUBOS DE MORTERO



1-Limpiar los moldes



6-Si pasa la fluidez compactar en 2 capas de 32 golpes



2-Pesar los materiales requeridos



7-Enrasar la superficie del molde



3-Mezclar los agregados, cemento, puzolana y agua



8-Desenformar a las 24h y sumergir en agua con cal



4-Calcular la fluidez según C 1437



9-Retirar del agua por 15 min y luego medir los lados



5-Medir diámetro y calcular la fluidez



10-Ensayar los cubos en la cara medida



Ficha Técnica

CEMENTO ANDINO PREMIUM

Descripción:

- Es un Cemento Pórtland Tipo I, obtenido de la molienda Clinker Tipo I y yeso.

Beneficios:

- Alta resistencia a mediano y largo plazo, alta durabilidad.
- Excelente trabajabilidad y acabado.
- Bajo contenido de álcalis. Buena resistencia a los agregados álcali reactivos.
- Moderada resistencia al salitre.

Usos:

- Estructuras sólidas de acabados perfectos.
- Construcciones en general de gran envergadura como, puentes, estructuras industriales y conjuntos habitacionales.

Características Técnicas:

- Cumple con la Norma Técnica Peruana NTP-334.009 y la Norma Técnica Americana ASTM C-150.

Formato de Distribución:

- Bolsas de 42.5 Kg: 04 pliegos (03 de papel + 01 film plástico).
- Granel: A despacharse en camiones bombonas y Big Bags.



Recomendaciones

Dosificación:

- Se debe dosificar según la resistencia deseada.
- Respetar la relación agua/cemento (a/c) a fin de obtener un buen desarrollo de resistencias, trabajabilidad y performance del cemento.
- Realizar el curado con agua a fin de lograr un buen desarrollo de resistencia y acabado final.

Manipulación:

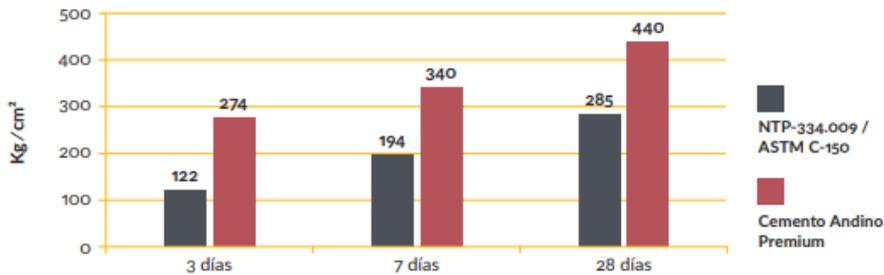
- Se debe manipular el cemento en ambientes ventilados.
- Se recomienda utilizar equipos de protección personal.
- Se debe evitar el contacto del cemento con la piel, los ojos y su inhalación.

Almacenamiento:

- Almacenar las bolsas bajo techo, separadas de paredes y pisos. Protegerlas de las corrientes de aire húmedo.
- No apilar más de 10 bolsas para evitar su compactación.
- En caso de un almacenamiento prolongado, se recomienda cubrir los sacos con un cobertor de polietileno y en dos pallet de altura.

Requisitos mecánicos

Comparación resistencias NTP-334.009 / ASTM C-150 vs. Cemento Andino Premium



Propiedades físicas y químicas

Parámetro	Unidad	Cemento Andino Premium	Requisitos NTP-334.009 / ASTM C-150
Contenido de aire	%	5.08	Máximo 12
Expansión autoclave	%	0.01	Máximo 0.80
Superficie específica	m ² /kg	361	Mínimo 260
Densidad	g/ml	3.15	No específica
Resistencia a la Compresión			
Resistencia a la compresión a 3 días	kg/cm ²	274	Mínimo 122
Resistencia a la compresión a 7 días	kg/cm ²	340	Mínimo 194
Resistencia a la compresión a 28 días	kg/cm ²	440	Mínimo 285*
Tiempo de Fraguado			
Fraguado Vicat inicial	min	116	Mínimo 45
Fraguado Vicat final	min	285	Máximo 375
Composición Química			
MgO	%	1.93	Máximo 6.0
SO ₃	%	2.68	Máximo 3.0
Pérdida al fuego	%	1.49	Máximo 3.0
Residuo insoluble	%	0.69	Máximo 1.5
Fases Mineralógicas			
C ₂ S	%	15.53	No específica
C ₃ S	%	57.35	No específica
C ₃ A	%	7.50	No específica
C ₄ AF	%	10.61	No específica
Álcalis Equivalentes			
Contenido de álcalis equivalentes	%	0.47	Requisito opcional, máximo 0.60
Resistencia a los Sulfatos			
Resistencia al ataque de sulfatos	%	0.083	0.10 % máx. a 180 días

*Requisito opcional

BUILDING TRUST



HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

Plastiment CCR Plus PE

ADITIVO PLASTIFICANTE Y RETARDANTE DE FRAGUADO PARA CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Plastiment® CCR Plus PE es un aditivo específicamente desarrollado para concreto compactado con rodillo.

USOS

Plastiment® CCR Plus PE puede usarse para:

- Extender los tiempos de fraguado de un concreto compactado con rodillo, ayudando a reducir la generación de juntas frías entre capas durante la construcción.
- Permite reducir hasta un 12% del agua de la mezcla.
- Favorece la consolidación del concreto manteniendo las características de densidad y humedad óptima aumentando resistencias mecánicas.
- Es recomendable para Concreto Compactado con Rodillo tanto de bajo como de alto contenido de cementante, indicado para la elaboración, transporte, extendido y compactado en diferentes climas.

CARACTERÍSTICAS / VENTAJAS

El aditivo Plastiment® CCR Plus PE, en concreto compactado con rodillo permite:

- Extender los tiempos de fraguado de la mezcla, aumentando el tiempo disponible para obtener una junta caliente (no requiere tratamiento superficial y/o mortero de pega).
- Ajustar los tiempos de colocación entre capas de acuerdo al proceso constructivo, reduciendo el número y el área de juntas frías.
- Disminuir el volumen de mortero de pega entre juntas.
- Aumentar la tasa de colocación del concreto y por lo tanto el avance de la obra.
- Disminuir la cantidad de agua (menor relación a/c) en la mezcla para obtener una misma consistencia.
- Mejor dispersión del cemento aumentando su eficiencia.
- Disminuir la tasa y el pico inicial de generación de calor dentro del material producido por la hidratación.

- Retardar el pico inicial de temperatura dando la posibilidad de proteger el material con una nueva capa sin que se sumen las temperaturas ambiente y el pico inicial de generación de calor en el caso de climas cálidos.
- En el concreto compactado con rodillo en estado endurecido Plastiment® CCR Plus PE permite:
- Incrementar las resistencias mecánicas.
- Aumentar la compacidad y disminuir la permeabilidad.
- Disminuir la posibilidad de filtraciones de agua a través de las juntas por una mejor calidad de pega.

Hoja De Datos Del Producto
Plastiment CCR Plus PE
Octubre 2017, Versión 01.02
02130901:1000000747

1 / 3

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Empaques	Granel x1L
Apariencia / Color	Marrón claro – marrón oscuro
Vida Útil	9 meses en su envase original bien cerrado y bajo techo.
Condiciones de Almacenamiento	Mantener en su envase original bien cerrado y bajo techo en lugar fresco. Para el transporte debe tomarse las precauciones normales para el manejo de un producto químico.
Densidad	1,32 +/- 0,02 Kg/L

INFORMACIÓN DE APLICACIÓN

Dosificación Recomendada	Para aplicaciones típicas 0.5% al 2.0% del peso del material cementante.
---------------------------------	--------------------------------------------------------------------------

DOCUMENTOS ADICIONALES

PARA MÁS INFORMACIÓN SOBRE Plastiment® CCR Plus PE:

1.- SIKA PRODUCT FINDER: APLICACIÓN DE CATÁLOGO DE PRODUCTOS



2.- SIKA CIUDAD VIRTUAL

**NOTAS**

Todos los datos técnicos recogidos en esta hoja técnica se basan en ensayos de laboratorio. Las medidas de los datos actuales pueden variar por circunstancias fuera de nuestro control.

RESTRICCIONES LOCALES

Nótese que el desempeño del producto puede variar dependiendo de cada país. Por favor, consulte la hoja técnica local correspondiente para la exacta descripción de los campos de aplicación del producto

ECOLOGÍA, SALUD Y SEGURIDAD

REGULACIÓN (EC) Nº 1907/2006 - REACH

DIRECTIVA 2004/42/CE - LIMITACIÓN DE LAS EMISIONES DE VOC

NOTAS LEGALES

La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y el uso final de los productos Sika son proporcionadas de buena fe, en base al conocimiento y experiencia actuales en Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados, manipulados y transportados; así como aplicados en condiciones normales. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra en donde se aplicarán los productos Sika son tan particulares que de esta información, de alguna recomendación escrita o de algún asesoramiento técnico, no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad particular, así como ninguna responsabilidad contractual. Los derechos de propiedad de las terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos aceptados por Sika Perú S.A.C. están sujetos a Cláusulas Generales de Contratación para la Venta de Productos de Sika Perú S.A.C. Los usuarios siempre deben remitirse a la última edición de la Hojas Técnicas de los productos; cuyas copias se entregarán a solicitud del interesado o a las que pueden acceder en Internet a través de nuestra página web www.sika.com.pe. La presente edición anula y reemplaza la edición anterior, misma que deberá ser destruida.

Hoja De Datos Del Producto
Plastiment CCR Plus PE
Octubre 2017, Versión 01.02
02130301100000747

2 / 3

BUILDING TRUST

